



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 PLYNOVOU TURBÍNU,
137,4KG/S SPALIN, 569°C**

HRSG WITH TWO PRESSURE LEVELS, 137,4KG/S, 569°C

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PETR ŠMEJKAL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ZDENĚK SKÁLA, Csc.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Petr Šmejkal

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:

Dvoutlakový horizontální kotel na odpadní teplo za plynovou turbínu, 137,4 kg/s spalín, 569° C

v anglickém jazyce:

HRSG with two pressure levels, 137,4 kg/s, 569° C

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte horizontální parní kotel za spalovací turbínu.

vysokotlakový okruh 5,5 MPa, 481°C

nízkotlakový okruh 0,5 MPa, 169°C

teplota napájecí vody 65°C, složení spalín:

O₂=13,7%, Ar=0,9%, N₂=71,2%, CO₂= 4,5%, H₂O=9,7%

Cíle diplomové práce:

Návrh uspořádání teplosměných ploch kotle a jejich dimenzování.

Tepelný výpočet kotle,

výpočtový projekt

Seznam odborné literatury:

Černý V. ,Teysler J., Janeba B.: Parní kotle,technický průvodce,SNTL Praha,
Budaj F.: Parní kotle, podklady pro tepelný výpočet,skriptum VUT v Brně
Dlouhý T.:Výpočty kotlů a spalinových výměníků, skriptum ČVUT Praha

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

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

V Brně, dne 20.11.2012

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá tepelným výpočtem a návrhem rozměrů a uspořádání výhřevných ploch kotle na odpadní teplo za plynovou turbínu pro zadané výstupní parametry páry a vstupní parametry spalin. Dále jsou navrženy ještě rozměry bubnů a zavodňovacích a převáděcích potrubí a je proveden výpočet ztráty v tahu.

Klíčová slova

Kotel na odpadní teplo, dvoutlaký, horizontální, spaliny, pára

ABSTRACT

This thesis deals with thermal calculation and design of proportions and layout of calorific components of a heat recovery steam generator according to given output parameters of steam and input parameters of flue gas. Furthermore, the proportions of boiler drums and irrigation and transfer pipes are designed and draught losses are calculated.

Key words

Heat recovery steam generator, two pressure levels, horizontal, flue gas, steam

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠMEJKAL, P. *Dvoutlaký horizontální kotel na odpadní teplo za plynovou turbínu, 137,4kg/s spalin, 569°C*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 115 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Skála, Csc..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Dvoutlaký horizontální kotel na odpadní teplo za plynovou turbínu vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce doc. Ing. Zdeňka Skály, Csc. a konzultanta Ing. Pavla Křemínského a s užitím uvedených podkladů a odborné literatury.

V Brně dne 24.5.2013

Podpis:

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Zdeňku Skálovi, Csc. a panu Ing. Pavlu Křemínskému za přínosné rady a připomínky v průběhu tvorby této práce. Také bych chtěl poděkovat rodině a přátelům za projevenou podporu.

Obsah

Úvod	19
1 Popis kotle	20
1.1 Zadané parametry	21
2 Tepelný výpočet	22
2.1 Parametry vody a páry v jednotlivých bodech pilového diagramu	22
2.1.1 Parametry vody a páry ve vysokotlakém okruhu.....	23
2.1.2 Parametry vody a páry v nízkotlakém okruhu	24
2.2 Tepla předaná v jednotlivých částech vysokotlakého okruhu	25
2.2.1 Entalpie spalin v bodě A	25
2.2.2 Tepelné ztráty sáláním	26
2.2.3 Teplota a entalpie spalin v bodě D.....	26
2.2.4 Předané teplo mezi body 1V a 6V	27
2.2.5 Hmotnostní průtok páry vysokotlakým okruhem	27
2.2.6 Tepla předaná v jednotlivých teplosměnných plochách vysokotlakého okruhu....	27
2.3 Tepla předaná v jednotlivých částech nízkotlakého okruhu.....	27
2.3.1 Teplota a entalpie spalin v bodě G.....	27
2.3.2 Teplota a entalpie spalin v bodě E	28
2.3.3 Předané teplo mezi body 1N a 4N.....	28
2.3.4 Výpočet hmotnostního průtoku páry nízkotlakým okruhem.....	28
2.3.5 Tepla předaná v jednotlivých teplosměnných plochách nízkotlakého okruhu.....	28
2.4 Přehled vypočtených hodnot a zobrazení v pilovém diagramu.....	29
3 Návrh spalinového kanálu	30
3.1 Návrh rozměrů žebrovaných trubek VP11	30
3.2 Počet trubek v jedné podélné řadě VP11.....	30
3.3 Výpočet objemového průtoku a volba rychlosti spalin ve VP11.....	31
3.4 Výpočet rozměrů spalinového kanálu.....	32
3.5 Přehled vypočtených hodnot	33

4 Návrh výhřevných ploch	34
4.1 Návrh druhého stupně vysokotlakého přehříváku (VP II)	37
4.1.1 Vstupní parametry a návrh rozměrů trubek VP II	37
4.1.2 Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalín VP II	38
4.1.3 Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany páry VP II	40
4.1.4 Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu VP II	40
4.1.5 Volba počtu podélných řad VP II	41
4.1.6 Výpočet skutečného předaného tepla ve VP II	41
4.1.7 Výpočet skutečné teploty spalín v bodě B	41
4.1.8 Přehled vypočtených hodnot a nákres VP II	42
4.2 Návrh prvního stupně vysokotlakého přehříváku (VP I)	42
4.2.1 Vstupní parametry a návrh rozměrů trubek VP I	42
4.2.2 Počet trubek v jedné podélné řadě VP I	43
4.2.3 Výpočet objemového průtoku a rychlosti spalín ve VP I	44
4.2.4 Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalín VP I	44
4.2.5 Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany páry VP I	46
4.2.6 Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu VP I	46
4.2.7 Volba počtu podélných řad VP I	47
4.2.8 Výpočet skutečného předaného tepla ve VP I	47
4.2.9 Výpočet skutečné teploty spalín v bodě C	48
4.2.10 Přehled vypočtených hodnot a nákres VP I	48
4.3 Návrh vysokotlakého výparníku (VV)	49
4.3.1 Vstupní parametry a návrh rozměrů trubek VV	49
4.3.2 Počet trubek v jedné podélné řadě VV	49
4.3.3 Výpočet objemového průtoku a rychlosti spalín ve VV	50
4.3.4 Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalín VV	50
4.3.5 Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu VV	52
4.3.6 Volba počtu podélných řad VV	52

4.3.7 Výpočet skutečného předaného tepla ve VV	53
4.3.8 Výpočet skutečné teploty spalín v bodě D	53
4.3.9 Přehled vypočtených hodnot a nákres VV	53
4.4 Návrh třetího stupně vysokotlakého ekonomizéru (VE3)	54
4.4.1 Vstupní parametry a návrh rozměrů trubek VE3	54
4.4.2 Počet trubek v jedné podélné řadě VE3	55
4.4.3 Výpočet objemového průtoku a rychlosti spalín ve VE3	56
4.4.4 Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalín VE3	56
4.4.5 Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmičkého teplotního spádu VE3	58
4.4.6 Volba počtu podélných řad VE3	58
4.4.7 Výpočet skutečného předaného tepla ve VE3	59
4.4.8 Výpočet skutečné teploty spalín v bodě E	59
4.4.9 Přehled vypočtených hodnot a nákres VE3	59
4.5 Návrh nízkotlakého přehříváku (NP)	60
4.5.1 Vstupní parametry a návrh rozměrů trubek NP	60
4.5.2 Počet trubek v jedné podélné řadě NP	61
4.5.3 Výpočet objemového průtoku a rychlosti spalín v NP	61
4.5.4 Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalín NP	62
4.5.5 Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany páry NP	65
4.5.6 Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmičkého teplotního spádu NP	66
4.5.7 Volba počtu podélných řad NP	66
4.5.8 Výpočet skutečného předaného tepla v NP	66
4.5.9 Výpočet skutečné teploty spalín v bodě F	67
4.5.10 Přehled vypočtených hodnot a nákres NP	67
4.6 Návrh nízkotlakého výparníku (NV)	68
4.6.1 Vstupní parametry a návrh rozměrů trubek NV	68
4.6.2 Počet trubek v jedné podélné řadě NV	68
4.6.3 Výpočet objemového průtoku a rychlosti spalín ve NV	69

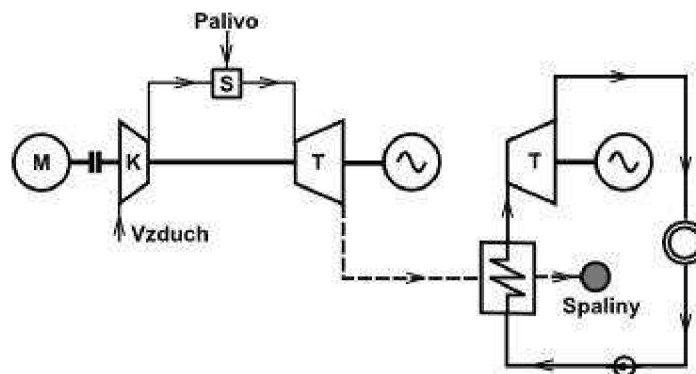
4.6.4	Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalín NV.....	69
4.6.5	Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu NV.....	71
4.6.6	Volba počtu podélných řad NV	71
4.6.7	Výpočet skutečného předaného tepla ve NV.....	72
4.6.8	Výpočet skutečné teploty spalín v bodě G.....	72
4.6.9	Přehled vypočtených hodnot a nákres NV	72
4.7	Návrh druhého stupně vysokotlakého ekonomizéru (VE2)	73
4.7.1	Vstupní parametry a návrh rozměrů trubek VE2	73
4.7.2	Počet trubek v jedné podélné řadě VE2.....	74
4.7.3	Výpočet objemového průtoku a rychlosti spalín ve VE2	75
4.7.4	Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalín VE2	75
4.7.5	Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu VE2	77
4.7.6	Volba počtu podélných řad VE2	77
4.7.7	Výpočet skutečného předaného tepla ve VE2	78
4.7.8	Výpočet skutečné teploty spalín v bodě H.....	78
4.7.9	Přehled vypočtených hodnot a nákres VE2	78
4.8	Návrh nízkotlakého ekonomizéru (NE)	79
4.8.1	Vstupní parametry a návrh rozměrů trubek NE.....	79
4.8.2	Počet trubek v jedné podélné řadě NE	80
4.8.3	Výpočet objemového průtoku a rychlosti spalín v NE	81
4.8.4	Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalín NE.....	81
4.8.5	Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu NE	83
4.8.6	Volba počtu podélných řad NE.....	83
4.8.7	Výpočet skutečného předaného tepla v NE.....	84
4.8.8	Výpočet skutečné teploty spalín v bodě I	84
4.8.9	Přehled vypočtených hodnot a nákres NE	84
4.9	Návrh prvního stupně vysokotlakého ekonomizéru (VE1).....	85
4.9.1	Vstupní parametry a návrh rozměrů trubek VE1	85

4.9.2 Počet trubek v jedné podélné řadě VE1.....	86
4.9.3 Výpočet objemového průtoku a rychlosti spalín ve VE1	87
4.9.4 Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalín VE1	87
4.9.5 Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu VE1	89
4.9.6 Volba počtu podélných řad VE1	89
4.9.7 Výpočet skutečného předaného tepla ve VE1	89
4.9.8 Výpočet skutečné teploty spalín v bodě J	90
4.9.9 Přehled vypočtených hodnot a nákres VE1	90
4.10 Návrh materiálů trubek.....	91
4.11 Návrh rozměrů vstupních a výstupních potrubí výhřevných ploch	91
4.11.1 Výstupní potrubí VP11	92
4.11.2 Výstupní potrubí VP1 a vstupní potrubí VP11.....	92
4.11.3 Vstupní potrubí VP1	93
4.11.4 Výstupní potrubí VE3.....	93
4.11.5 Výstupní potrubí VE2 a vstupní potrubí VE3.....	94
4.11.6 Výstupní potrubí VE1 a vstupní potrubí VE2.....	94
4.11.7 Vstupní potrubí VE1	94
4.11.8 Výstupní potrubí NP	95
4.11.9 Vstupní potrubí NP	95
4.11.10 Výstupní potrubí NE	95
4.11.11 Vstupní potrubí NE	96
4.11.12 Přehled vypočtených rozměrů	96
5 Návrh bubnů.....	97
5.1 Návrh rozměrů a kontrola zatížení vysokotlakého bubnu	97
5.2 Návrh rozměrů a kontrola zatížení nízkotlakého bubnu.....	98
6 Návrh rozměrů zavodňovacích potrubí.....	99
6.1 Návrh rozměrů zavodňovacího potrubí pro vysokotlaký okruh	99
6.2 Návrh rozměrů zavodňovacího potrubí pro nízkotlaký okruh	100

7 Návrh rozměrů převáděcích potrubí.....	101
7.1 Návrh rozměrů převáděcího potrubí pro vysokotlaký okruh.....	101
7.2 Návrh rozměrů převáděcího potrubí pro nízkotlaký okruh	102
8 Výpočet tahové ztráty kotle	103
8.1 Výpočet tlakových ztrát jednotlivých výhřevných ploch.....	103
8.1.1 Tlaková ztráta na VPII	104
8.1.2 Tlaková ztráta na VPI	104
8.1.3 Tlaková ztráta na VV	105
8.1.4 Tlaková ztráta na VE3	105
8.1.5 Tlaková ztráta na NP	105
8.1.6 Tlaková ztráta na NV	105
8.1.7 Tlaková ztráta na VE2	106
8.1.8 Tlaková ztráta na NE.....	106
8.1.9 Tlaková ztráta na VE1	106
8.2 Tlaková ztráta v komíně	106
8.2.1 Tlaková ztráta třením v komíně	106
8.2.2 Tlaková ztráta na vstupu a výstupu z komína	107
8.3 Celková tahová ztráta.....	107
Závěr	108
Použité zdroje a literatura	109
Seznam použitých symbolů a zkratk	110
Seznam příloh.....	115

Úvod

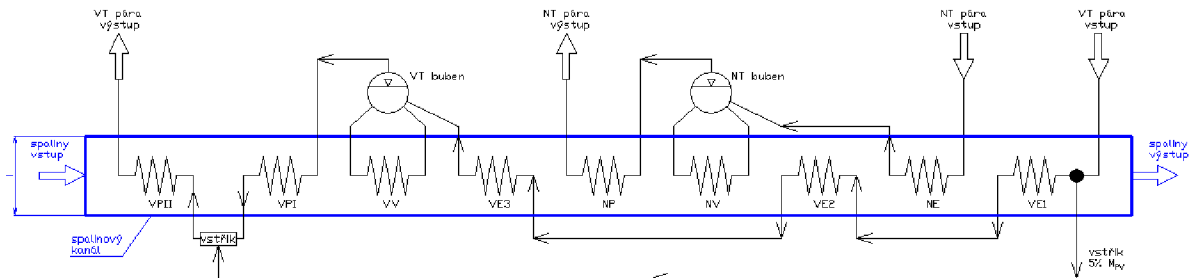
Kotel na odpadní teplo lze využít v různých průmyslových odvětvích, kde slouží k hospodárnějšímu využití teploty spalin produkcí horké vody nebo páry a podílí se tak na zvýšení účinnosti výrobního procesu. Dnes moderním zdrojem výroby elektřiny jsou paroplynové elektrárny, dosahující v porovnání s klasickou uhelnou elektrárnou znatelně vyšší účinnosti. V paroplynovém cyklu (viz obr. 1.1) slouží kotel na odpadní teplo k výrobě páry využitím zbytkového tepla spalin vzniklých spalováním zemního plynu, které odchází z plynové turbíny. Spaliny protékají spalínovým kanálem kotle, kde jsou postupně za sebou řazeny jednotlivé výhřevné plochy (ekonomizéry, výparníky a přehříváky) sloužící k výrobě páry požadovaných parametrů k pohonu parní turbíny. Ze spalínového kanálu spaliny vstupují do komína opatřeného tlumičem hluku.



Obr. 1.1. Schéma paroplynového cyklu [3]

1 Popis kotle

Kotel na odpadní teplo, kterým se zabývá tato práce má horizontální provedení. Jedná se o dvoutlaký bubnový kotel s přirozenou cirkulací. Po délce je kotel rozdělen na několik modulů z důvodu převozu a opatřen průlezovými otvory. Celkem se skládá z devíti výhřevných ploch řazených dle obr. 1.2.



Obr. 1.2. Náčrtek řazení výhřevných ploch kotle

Nízkotlaký okruh je tvořen ekonomizérem, výparníkem a přehřívákem. Do ekonomizéru vstupuje napájecí voda, která je dále vedena do bubnu, odkud zavodňovacím potrubím odtéká do výparníku a poté převáděcím potrubím do bubnu, kde je separována sytá pára od syté kapaliny. Z nejvyššího místa bubnu je poté odváděna sytá pára do přehříváku, kde je vyrobena výstupní přehřátá pára předepsaných parametrů (viz kap. 1.1). Výhřevné plochy ve vysokotlakém okruhu jsou řazeny obdobně, avšak ekonomizér je zde rozdělen na tři stupně a přehřívák na dva stupně. Výstupní teplota z vysokotlakého okruhu je regulována vstříkem napájecí vody před druhý stupeň přehříváku.

Podle pilového diagramu, který je sestaven na základě navrženého řazení výhřevných ploch (viz obr. 1.2), je v práci proveden tepelný výpočet stanovující parametry spalín a páry v jednotlivých bodech diagramu a celkové předané teplo v kotli. Dále je proveden návrh rozměrů spalínového kanálu podle jedné zvolené výhřevné plochy a návrh jednotlivých výhřevných ploch tvořených, s výjimkou nízkotlakého přehříváku, žebrovanými trubkami. Poté jsou navrženy rozměry bubnů a zavodňovacích a převáděcích potrubí a nakonec je provedena kontrola ztráty v tahu.

1.1 Zadané parametry

Zadané hodnoty pro vysokotlaký okruh:

- výstupní teplota: $t_{1V} = 481^\circ C$,
- výstupní tlak: $p_{1V} = 5,5MPa$.

Zadané hodnoty pro nízkotlaký okruh:

- výstupní teplota: $t_{1N} = 169^\circ C$,
- výstupní tlak: $p_{1N} = 0,5MPa$.

Teplota napájecí vody: $t_{nv} = 65^\circ C$,

hmotnostní průtok spalin, které slouží pro výrobu páry: $M_{sp} = 137,4kg \cdot s^{-1}$,

vstupní teplota spalin: $t_A = 569^\circ C$,

objemové složení spalin:

- objemový podíl O₂: $x_{O_2} = 0,137$,
- objemový podíl CO₂: $x_{CO_2} = 0,045$,
- objemový podíl N₂: $x_{N_2} = 0,712$,
- objemový podíl H₂O: $x_{H_2O} = 0,097$,
- objemový podíl Ar: $x_{Ar} = 0,009$,

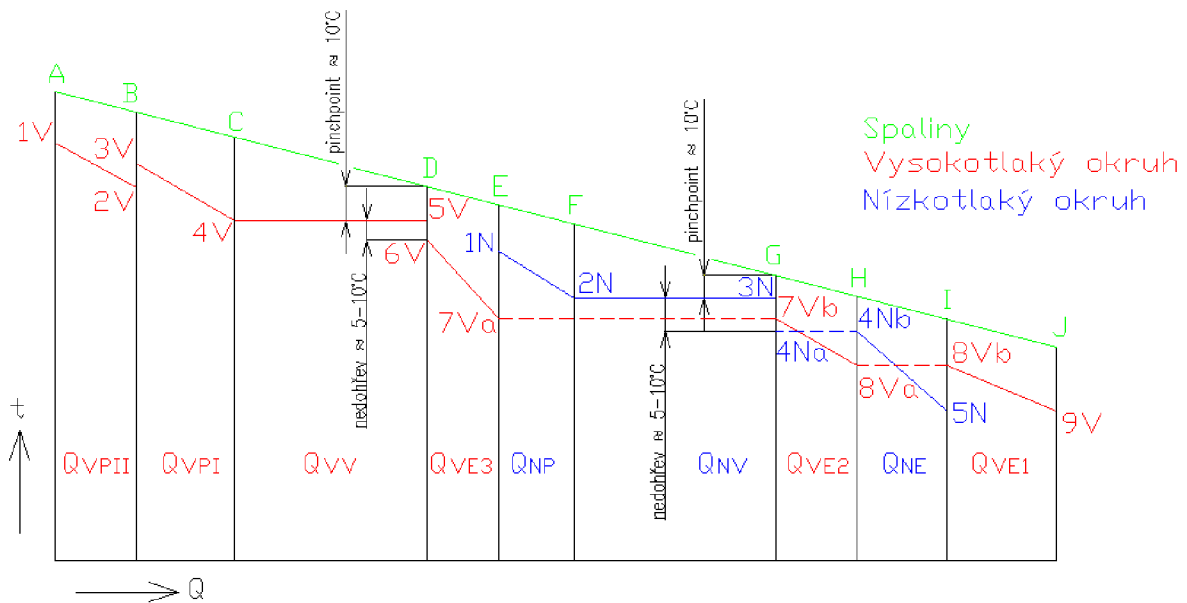
hustoty jednotlivých složek spalin:

- hustota O₂: $\rho_{O_2} = 1,4289kg \cdot m^{-3}$,
- hustota CO₂: $\rho_{CO_2} = 1,9768kg \cdot m^{-3}$,
- hustota N₂: $\rho_{N_2} = 1,2505kg \cdot m^{-3}$,
- hustota H₂O: $\rho_{H_2O} = 0,804kg \cdot m^{-3}$,
- hustota Ar: $\rho_{Ar} = 1,7839kg \cdot m^{-3}$.

2 Tepelný výpočet

2.1 Parametry vody a páry v jednotlivých bodech pilového diagramu

Nejprve byl sestaven pilový diagram s ohledem na co nejlepší možné využití tepelné energie spalín a jejich co největšího vychlazení před odchodem do komína. Z tohoto důvodu byl ekonomizér u vysokotlakého okruhu rozdělen na tři části (VE1, VE2 a VE3). U vysokotlakého okruhu je dále i přehřívák rozdělen na dva stupně (VPI a VPII). Předběžný náčrt pilového diagramu je na obr. 2.1.



Obr. 2.1. Náčrt pilového diagramu.

Parametry v jednotlivých bodech jsou buďto určeny ze zadaných hodnot pomocí parních tabulek X-Steam [4] a nebo voleny na základě konzultací (jedná se především o nedohřevy, pinchpointy nebo teploty pro rozdělení jednotlivých stupňů ekonomizérů, viz tab. 2.1).

Tab. 2.1. Volené hodnoty pro tepelný výpočet

Volená veličina	Značení	Hodnota
Tlaková diference ve vysokotlakých přehřívácích	Δp_{VPX}	0,15MPa
Tlaková diference v nízkotlakém přehříváku	Δp_{NP}	0,15MPa
Tlaková diference v každé části vysokotlakého ekonomizéru	Δp_{VEX}	0,1MPa
Tlaková diference nízkotlakého ekonomizéru	Δp_{NE}	0,1MPa
Zpracovaný entalpický spád na 2. stupni vysokotlakého přehříváku (VPII)	Δi_{VPII}	250kJ · kg ⁻¹
Teplota nedohřevu u vysokotlakého okruhu	Δt_{NedV}	5° C
Teplota nedohřevu u nízkotlakého okruhu	Δt_{NedN}	10° C
Pinchpoint pro vysokotlaký okruh	Δt_{PV}	10° C
Pinchpoint pro nízkotlaký okruh	Δt_{PN}	10° C

2.1.1 Parametry vody a páry ve vysokotlakém okruhu

Parametry páry v bodě 1V:

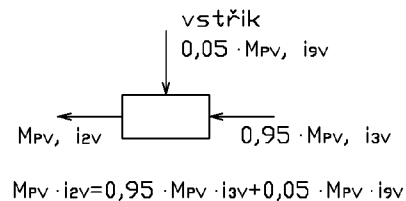
- $p_{1V} = 5,5 \text{ MPa}$ (zadaný tlak),
- $t_{1V} = 481^\circ \text{C}$ (zadaná teplota),
- $i_{1V} = 3383,8575 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (určeno pomocí X-Steam pro zadaný tlak a teplotu),
- $v_{1V} = 0,0602664 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (určeno pomocí X-Steam pro zadaný tlak a teplotu).

Parametry páry v bodě 2V:

- $p_{2V} = p_{1V} + \Delta p_{VPX} = 5,5 + 0,15 = 5,65 \text{ MPa}$,
- $i_{2V} = i_{1V} - \Delta i_{VPII} = 3383,8575 - 250 = 3133,8575 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,
- $t_{2V} = 380,16^\circ \text{C}$ (určeno pomocí X-Steam pro daný tlak a entalpii),
- $v_{2V} = 0,0485803 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (určeno pomocí X-Steam pro daný tlak a entalpii).

Parametry páry v bodě 3V:

Teplota páry je zde regulována vstřikem napájecí vody o teplotě $t_{9V} = t_{nv}$ (entalpie páry v bodě i_{9V} je vypočtena dále, spolu s ostatními parametry v bodě 9V). Vstřík byl volen 5% z celkové hodnoty průtoku vysokotlakým okruhem. Při výpočtu entalpie zde budeme vycházet z bilance vstříku (obr. 2.2).



Obr. 2.2. Bilance vstříku

- $p_{3V} = p_{2V} = 5,65 \text{ MPa}$,
- $i_{3V} = \frac{i_{2V} - 0,05 \cdot i_{9V}}{0,95} = \frac{3133,8575 - 0,05 \cdot 277,11}{0,95} = 3284,21 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,
- $t_{3V} = 440,26^\circ \text{C}$ (určeno pomocí X-Steam pro daný tlak a entalpii),
- $v_{3V} = 0,0546786 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (určeno pomocí X-Steam pro daný tlak a entalpii).

Parametry páry v bodě 4V:

- $p_{4V} = p_{2V} + \Delta p_{VPX} = 5,65 + 0,15 = 5,8 \text{ MPa}$,
- $t_{4V} = 273,38^\circ \text{C}$ (teplota saturace, určeno pomocí X-Steam pro daný tlak),
- $i_{4V} = 2786,7 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (entalpie syté páry, určeno pomocí X-Steam),
- $v_{4V} = 0,0336587 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (měrný objem syté páry, určeno pomocí X-Steam).

Parametry páry v bodě 5V:

- $p_{5V} = p_{4V} = 5,8 \text{ MPa}$,
- $t_{5V} = t_{4V} = 273,38^\circ \text{C}$,
- $i_{5V} = 1202,4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (entalpie syté kapaliny, určeno pomocí X-Steam),
- $v_{5V} = 0,00131275 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (měrný objem syté kapaliny, určeno pomocí X-Steam).

Parametry páry v bodě 6V:

- $p_{6V} = p_{5V} = 5,8 \text{ MPa}$,
- $t_{6V} = t_{5V} - \Delta t_{\text{nedV}} = 273,38 - 5 = 268,38^\circ \text{C}$ (teplota snížena o nedohřev),
- $i_{6V} = 1176,73 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (určeno pomocí X-Steam pro daný tlak a teplotu),
- $v_{6V} = 0,0012974 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (určeno pomocí X-Steam pro daný tlak a teplotu).

Parametry páry v bodě 7V (7Va=7Vb=7V):

- $p_{7V} = p_{6V} + \Delta p_{\text{VEX}} = 5,8 + 0,1 = 5,9 \text{ MPa}$,
- $t_{7V} = 158^\circ \text{C}$ (teplota byla navržena),
- $i_{7V} = 670,0425 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (určeno pomocí X-Steam pro daný tlak a teplotu),
- $v_{7V} = 0,0010959 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (určeno pomocí X-Steam pro daný tlak a teplotu).

Parametry páry v bodě 8V (8Va=8Vb=8V):

- $p_{8V} = p_{7V} + \Delta p_{\text{VEX}} = 5,9 + 0,1 = 6 \text{ MPa}$,
- $t_{8V} = 140^\circ \text{C}$ (teplota byla navržena),
- $i_{8V} = 592,87 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (určeno pomocí X-Steam pro daný tlak a teplotu),
- $v_{8V} = 0,0010762 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (určeno pomocí X-Steam pro daný tlak a teplotu).

Parametry páry v bodě 9V:

- $p_{9V} = p_{8V} + \Delta p_{\text{VEX}} = 6 + 0,1 = 6,1 \text{ MPa}$,
- $t_{9V} = t_{\text{nv}} = 65^\circ \text{C}$ (zadáno, teplota napájecí vody),
- $i_{9V} = 277,11 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (určeno pomocí X-Steam pro daný tlak a teplotu),
- $v_{9V} = 0,0010171 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (určeno pomocí X-Steam pro daný tlak a teplotu).

Z vypočtených hodnot entalpií v bodech 3V a 4V lze vypočítat zpracovaný entalpický spád na 1. stupni vysokotlakého přehříváku (VPI):

$$\Delta i_{\text{VPI}} = i_{3V} - i_{4V} = 3284,21 - 2786,7 = 497,51 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

2.1.2 Parametry vody a páry v nízkotlakém okruhu**Parametry páry v bodě 1N:**

- $p_{1N} = 0,5 \text{ MPa}$ (zadáno),
- $t_{1N} = 169^\circ \text{C}$ (zadáno),
- $i_{1N} = 2787,936 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (určeno pomocí X-Steam pro daný tlak a teplotu),
- $v_{1N} = 0,3932049 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (určeno pomocí X-Steam pro daný tlak a teplotu).

Parametry páry v bodě 2N:

- $p_{2N} = p_{1N} + \Delta p_{NP} = 0,5 + 0,15 = 0,65 \text{ MPa}$,
- $t_{2N} = 162^\circ \text{C}$ (teplota saturace, určeno pomocí X-Steam pro daný tlak),
- $i_{2N} = 2759,6 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (entalpie syté páry, určeno pomocí X-Steam),
- $v_{2N} = 0,2923977 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (měrný objem syté páry, určeno pomocí X-Steam).

Parametry páry v bodě 3N:

- $p_{3N} = p_{2N} = 0,65 \text{ MPa}$,
- $t_{3N} = t_{2N} = 162^\circ \text{C}$,
- $i_{3N} = 684,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (entalpie syté kapaliny, určeno pomocí X-Steam),
- $v_{3N} = 0,0011044 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (měrný objem syté kapaliny, určeno pomocí X-Steam).

Parametry páry v bodě 4N (4Na=4Nb=4N):

- $p_{4N} = p_{3N} = 0,65 \text{ MPa}$,
- $t_{4N} = t_{3N} - \Delta t_{NedN} = 162 - 10 = 152^\circ \text{C}$,
- $i_{4N} = 641 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (určeno pomocí X-Steam pro daný tlak a teplotu),
- $v_{4N} = 0,0010926 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (určeno pomocí X-Steam pro daný tlak a teplotu).

Parametry páry v bodě 5N:

- $p_{5N} = p_{4N} + \Delta p_{NE} = 0,65 + 0,1 = 0,75 \text{ MPa}$,
- $t_{5N} = t_{nv} = 65^\circ \text{C}$ (zadáno, teplota napájecí vody),
- $i_{5N} = 272,68 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (určeno pomocí X-Steam pro daný tlak a teplotu),
- $v_{5N} = 0,0010195 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (určeno pomocí X-Steam pro daný tlak a teplotu).

2.2 Tepla předaná v jednotlivých částech vysokotlakého okruhu**2.2.1 Entalpie spalin v bodě A**

Nejprve je nutno vypočítat entalpie spalin pro jednotlivé teploty v tab. 2.2 při zadaném složení spalin. Názorná ukázka výpočtu entalpie spalin pro 100°C:

$$I_{SP100} = x_{O_2} \cdot 132 + x_{CO_2} \cdot 170 + x_{N_2} \cdot 130 + x_{H_2O} \cdot 150 + x_{Ar} \cdot 93 = 0,137 \cdot 132 + 0,045 \cdot 170 + 0,712 \cdot 130 + 0,097 \cdot 150 + 0,009 \cdot 93 = 133,7 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

Tab. 2.2. Entalpie složek spalin [1]

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

Ostatní hodnoty entalpie spalín byly vypočteny obdobně a jednotlivé hodnoty jsou uvedeny v tab. 2.3.

Tab. 2.3. Entalpie zadaného složení
spalín při různých teplotách

Teplota [°C]	Entalpie [kJ/m ³]
100	133,7
200	268,9
300	407,4
400	549,5
500	696
600	843

Entalpii spalín v bodě A pilového diagramu (pro teplotu $t_A = 569^\circ C$) pak lze určit interpolací hodnot pro 500°C a 600°C:

$$I_{SPA} = I_{SP500} + \frac{(I_{SP600} - I_{SP500}) \cdot 69}{100} = 696 + \frac{(843 - 696) \cdot 69}{100} = 797,43 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

2.2.2 Tepelné ztráty sáláním

Pro dané hustoty složek spalín a zadané složení spalín se vypočte hustota spalín ρ_{SP} :

$$\rho_{SP} = x_{O_2} \cdot \rho_{O_2} + x_{CO_2} \cdot \rho_{CO_2} + x_{N_2} \cdot \rho_{N_2} + x_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} + x_{Ar} \cdot \rho_{Ar} = 0,137 \cdot 1,4289 + 0,045 \cdot 1,9768 + 0,712 \cdot 1,2505 + 0,097 \cdot 0,804 + 0,009 \cdot 1,7839 = 1,269 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Hmotnostní tok spalín se převede na objemový tok spalín:

$$M_{SPO} = \frac{M_{SP}}{\rho_{SP}} = \frac{137,4}{1,269} = 108,264 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Maximální využitelný tepelný výkon:

$$Q_A = I_{SPA} \cdot M_{SPO} = 797430 \cdot 108,264 = 86,34 \text{ MW}$$

Konstanta C byla zvolena pro kotle na kapalná paliva a na zemní plyn:

$$C = 0,0113$$

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

$$Q_{RC} = C \cdot (Q_A)^{0,7} = 0,0113 \cdot (86,34)^{0,7} = 0,2561 \text{ MW}$$

Stanovení poměrné ztráty sáláním a konvekcí:

$$z_S = \frac{Q_{RC}}{Q_A} = \frac{0,2561}{86,34} = 0,003 = 0,3\%$$

2.2.3 Teplota a entalpie spalín v bodě D

Teplota spalín v bodě D se navrhuje ze zvoleného pinchpointu $\Delta t_{PV} = 10^\circ C$:

$$t_D = t_{5V} + \Delta t_{PV} = 273,38 + 10 = 283,38^\circ C$$

Entalpie spalín v bodě D se určí pro teplotu $t_D = 283,38^\circ C$ interpolací hodnot vypočtených v kap. 2.2:

$$I_{SPD} = I_{SP200} + \frac{(I_{SP300} - I_{SP200}) \cdot 83,38}{100} = 268,9 + \frac{(407,4 - 268,9) \cdot 83,38}{100} = 384,4 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

2.2.4 Předané teplo mezi body 1V a 6V

Vypočte se rozdíl entalpií spalín v těchto bodech:

$$\Delta I_{SPA-D} = I_{SPA} - I_{SPD} = 797,43 - 384,4 = 413,03 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3},$$

teplo dodané spalínami mezi body A a D:

$$Q_{SPA-D} = \Delta I_{SPA-D} \cdot M_{SPO} = 413,03 \cdot 108,264 = 44,716 \text{ MW},$$

a teplo předané páře mezi body 1V a 6V je potom:

$$Q_{1V-6V} = Q_{SPA-D} \cdot (1 - z_s) = 44,716 \cdot (1 - 0,003) = 44,582 \text{ MW}.$$

2.2.5 Hmotnostní průtok páry vysokotlakým okruhem

Hmotnostní průtok páry se vypočítá ze zjištěných hodnot předaného tepla (dosazováno je v jednotkách kW) a entalpií (vstřík byl volen 5%, viz obr. 2.2):

$$Q_{1V-6V} = M_{PV} \cdot (i_{1V} - i_{2V}) + 0,95 \cdot M_{PV} \cdot (i_{2V} - i_{6V}) + 0,05 \cdot M_{PV} \cdot (i_{2V} - i_{9V}) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow M_{PV} = \frac{Q_{1V-6V}}{(i_{1V} - i_{2V}) + 0,95 \cdot (i_{2V} - i_{6V}) + 0,05 \cdot (i_{2V} - i_{9V})} =$$

$$= \frac{44582}{(3383,8575 - 3313,8575) + 0,95 \cdot (3313,8575 - 1176,8) + 0,05 \cdot (3313,8575 - 277,11)} = 19,797 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

2.2.6 Tepla předaná v jednotlivých teplosměnných plochách vysokotlakého okruhu

Teplo předané ve vysokotlakém přehříváku VP II:

$$Q^{VPII} = M_{PV} \cdot (i_{1V} - i_{2V}) = 19,797 \cdot (3383,8575 - 3133,8575) = 4,95 \text{ MW}$$

Teplo předané ve vysokotlakém přehříváku VPI:

$$Q^{VPI} = 0,95 \cdot M_{PV} \cdot (i_{3V} - i_{4V}) = 0,95 \cdot 19,797 \cdot (3284,21 - 2786,7) = 9,357 \text{ MW}$$

Teplo předané ve vysokotlakém výparníku:

$$Q^{VV} = 0,95 \cdot M_{PV} \cdot (i_{4V} - i_{6V}) = 0,95 \cdot 19,797 \cdot (2786,7 - 1176,8) = 30,277 \text{ MW}$$

Teplo předané ve vysokotlakém ekonomizéru 3:

$$Q^{VE3} = 0,95 \cdot M_{PV} \cdot (i_{6V} - i_{7V}) = 0,95 \cdot 19,797 \cdot (1176,8 - 670,0425) = 9,53 \text{ MW}$$

Teplo předané ve vysokotlakém ekonomizéru 2:

$$Q^{VE2} = 0,95 \cdot M_{PV} \cdot (i_{7V} - i_{8V}) = 0,95 \cdot 19,797 \cdot (670,0425 - 592,87) = 1,4514 \text{ MW}$$

Teplo předané ve vysokotlakém ekonomizéru 1:

$$Q^{VE1} = 0,95 \cdot M_{PV} \cdot (i_{8V} - i_{9V}) = 0,95 \cdot 19,797 \cdot (592,87 - 277,11) = 5,94 \text{ MW}$$

2.3 Tepla předaná v jednotlivých částech nízkotlakého okruhu**2.3.1 Teplota a entalpie spalín v bodě G**

Teplota spalín v bodě G se navrhuje ze zvoleného pinchpointu $\Delta t_{PN} = 10^\circ \text{C}$:

$$t_G = t_{3N} + \Delta t_{PN} = 162 + 10 = 172^\circ \text{C}$$

Entalpie spalín v bodě G se určí pro teplotu $t_G = 172^\circ \text{C}$ interpolací hodnot vypočtených v kap.

2.2:

$$I_{SPG} = I_{SP100} + \frac{(I_{SP200} - I_{SP100}) \cdot 72}{100} = 133,7 + \frac{(268,9 - 133,7) \cdot 72}{100} = 231,1 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

2.3.2 Teplota a entalpie spalin v bodě E

Teplo dodané mezi body 1V a 7V je součtem tepel předaných v obou vysokotlakých přehřívácích, vysokotlakém výparníku a posledním dílu vysokotlakého ekonomizéru:

$$Q_{1V-7V} = Q_{VPII} + Q_{VPI} + Q_{VV} + Q_{VE3} = 4,95 + 9,357 + 30,277 + 9,53 = 54,114 MW$$

Teplo předané spalinami se vypočte z dodaného tepla mezi body 1V a 7V a ztrát sáláním:

$$Q_{1V-7V} = Q_{SPA-E} \cdot (1 - z_s) \Rightarrow Q_{SPA-E} = \frac{Q_{1V-7V}}{(1 - z_s)} = \frac{54,114}{(1 - 0,003)} = 54,27 MW$$

Rozdíl entalpií spalin mezi body A a E (hodnota tepla Q_{SPA-E} dosazena v kW):

$$Q_{SPA-E} = \Delta I_{SPA-E} \cdot M_{SPO} \Rightarrow \Delta I_{SPA-E} = \frac{Q_{SPA-E}}{M_{SPO}} = \frac{54270}{108,264} = 501,3 kJ \cdot m^{-3}$$

Entalpie spalin v bodě E:

$$\Delta I_{SPA-E} = I_{SPA} - I_{SPE} \Rightarrow I_{SPE} = I_{SPA} - \Delta I_{SPA-E} = 797,43 - 501,3 = 296,13 kJ \cdot m^{-3}$$

Teplota spalin v bodě E se určí pro entalpii $I_{SPE} = 296,13 kJ \cdot m^{-3}$ interpolací hodnot vypočtených v kap. 2.2:

$$t_E = 200 + \frac{(300 - 200) \cdot (296,13 - I_{SP200})}{100} = 200 + \frac{(300 - 200) \cdot (296,13 - 268,9)}{100} = 227,23^\circ C$$

2.3.3 Předané teplo mezi body 1N a 4N

Vypočte se rozdíl entalpií spalin v těchto bodech:

$$\Delta I_{SPE-G} = I_{SPE} - I_{SPG} = 296,13 - 231,1 = 65,03 kJ \cdot m^{-3},$$

teplo dodané spalinami mezi body E a G:

$$Q_{SPE-G} = \Delta I_{SPE-G} \cdot M_{SPO} = 65,03 \cdot 108,264 = 7,045 MW,$$

a teplo předané parou mezi body 1N a 4N je potom:

$$Q_{1N-4N} = Q_{SPE-G} \cdot (1 - z_s) = 7,045 \cdot (1 - 0,003) = 7,024 MW.$$

2.3.4 Výpočet hmotnostního průtoku páry nízkotlakým okruhem

Hmotnostní průtok páry se vypočítá ze zjištěných hodnot předaného tepla (dosazuje se v jednotkách kW) a entalpií:

$$M_{PN} = \frac{Q_{1N-4N}}{i_{1N} - i_{4N}} = \frac{7024}{2787,936 - 641} = 3,272 kg \cdot s^{-1}$$

2.3.5 Tepla předaná v jednotlivých teplosměnných plochách nízkotlakého okruhu

Teplo předané v nízkotlakém přehříváku:

$$Q^{NP} = M_{PN} \cdot (i_{1N} - i_{2N}) = 3,272 \cdot (2787,936 - 2759,6) = 92,71 kW$$

Teplo předané v nízkotlakém výparníku:

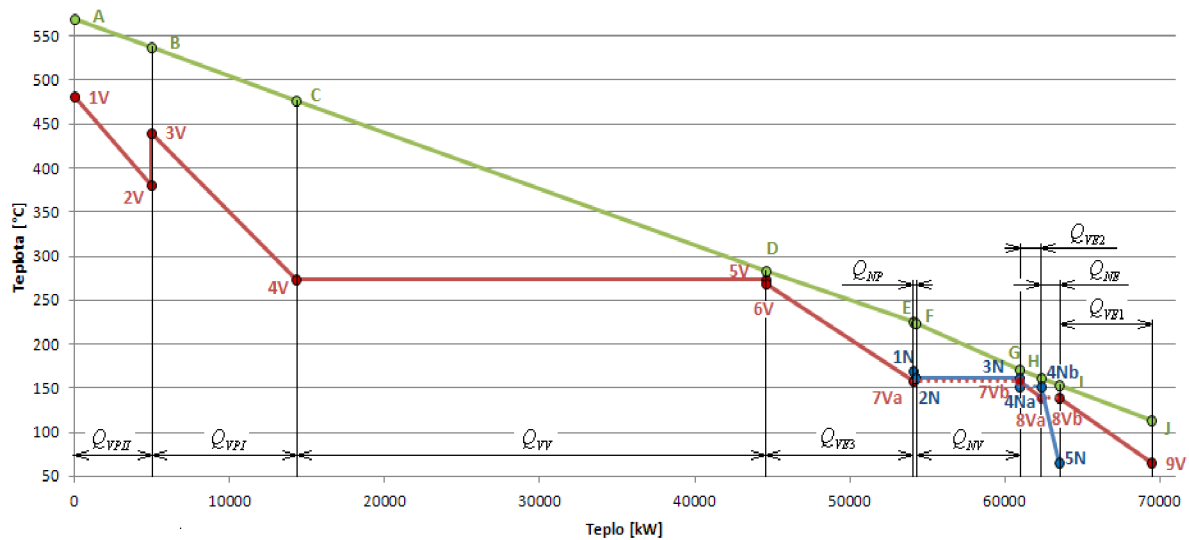
$$Q^{NV} = M_{PN} \cdot (i_{2N} - i_{4N}) = 3,272 \cdot (2759,6 - 641) = 6,932 MW$$

Teplo předané v nízkotlakém ekonomizéru:

$$Q^{NE} = M_{PN} \cdot (i_{4N} - i_{5N}) = 3,272 \cdot (641 - 272,68) = 1,205 MW$$

2.4 Přehled vypočtených hodnot a zobrazení v pilovém diagramu

Hodnoty teplot v jednotlivých bodech pilového diagramu a hodnoty tepel předaných v jednotlivých teplosměnných plochách jsou uvedeny v tab. 2.4 a tab. 2.5.



Obr. 2.3. Pilový diagram s předběžně vypočtenými hodnotami

Tab. 2.4. Vypočtené teploty vody/páry
v jednotlivých bodech pilového diagramu

Bod v pilovém diagramu	Teplota vody/páry v daném bodě [°C]
1V	481
2V	380,16
3V	440,26
4V	273,38
5V	273,38
6V	268,38
7V=7Vb	158
8Va=8Vb	140
9V	65
1N	169
2N	162
3N	162
4Na=4Nb	152
5N	65

Tab. 2.5. Předběžné hodnoty předaných tepel

Teplosměnná plocha	Navržené předané teplo Q [MJ]
Vysokotlaký přehřívák II (VPII)	4,95
Vysokotlaký přehřívák I (VPI)	9,357
Vysokotlaký výparník (VV)	30,277
Vysokotlaký ekonomizér 3	9,53
Vysokotlaký ekonomizér 2	1,4514
Vysokotlaký ekonomizér 1	5,94
Nízkotlaký přehřívák (NP)	0,09271
Nízkotlaký výparník (NV)	6,932
Nízkotlaký ekonomizér (NE)	1,205
Celkové teplo předané ve vysokotlakém okruhu	61,5054
Celkové teplo předané v nízkotlakém okruhu	8,22971

3 Návrh spalínového kanálu

Pro stanovení rozměrů spalínového kanálu je potřeba zvolit rozměry jedné z teplosměnných ploch. Touto plochou bude druhý stupeň vysokotlakého přehříváku (VP II).

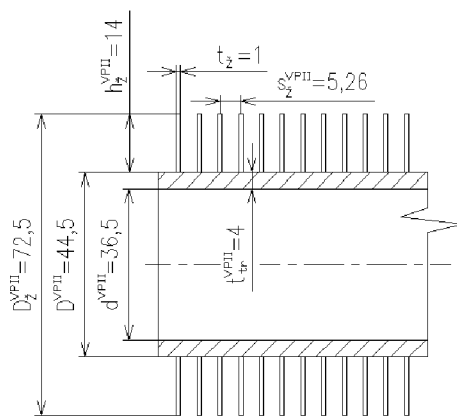
Pro VP II se stanoví počet trubek v jedné podélné řadě n_{tr} a také příčná rozteč mezi těmito trubkami s_1 a zkontroluje se, zda při zvoleném počtu trubek a vnitřním průměru d VP II vychází rychlost proudění páry w_p ve VP II v přípustných mezích. Z hodnot příčné rozteče a počtu trubek v jedné podélné řadě se poté stanoví návrhová šířka spalínového kanálu \check{s}_n .

Dále bude vypočten skutečný objemový průtok spalín pro danou střední teplotu spalín M_{SPOsk} ve VP II a zvolena návrhová rychlost proudění spalín ve VP II w_{SP-n} , aby z těchto hodnot mohla být stanovena návrhová průtočná plocha spalín $S_{SP-PR-n}$ pro VP II. Z návrhové průtočné plochy, návrhové šířky kanálu a zvolených rozměrů žebrovaných trubek VP II se poté stanoví návrhová výška spalínového kanálu l_n .

Navržené hodnoty budou zaokrouhleny na konečné volené hodnoty šířky \check{s} a výšky l spalínového kanálu. Pro tyto hodnoty se poté přepočítá skutečná průtočná plocha spalín S_{SP-PR} pro VP II a také skutečná průtočná rychlost spalín w_{SP} .

3.1 Návrh rozměrů žebrovaných trubek VP II

Pro VP II budou použity žebrované trubky. Rozměry těchto trubek jsou vypsány v tab. 3.1, náčrt trubky viz obr. 3.1.



Obr. 3.1. Rozměry trubek VP II

Tab. 3.1. Zvolené rozměry trubek VP II

Rozměr trubky	Značení	Hodnota
Vnější průměr trubky	$D^{VP II}$	44,5 mm
Tloušťka trubky	$t_{tr}^{VP II}$	4 mm
Vnitřní průměr trubky	$d^{VP II}$	36,5 mm
Tloušťka žebry	t_z	1 mm
Počet žebry na 1m délky trubky	$n_z^{VP II}$	190 m^{-1}
Rozteč mezi žebry	$s_z^{VP II}$	$\approx 5,26 mm$
Výška žebry	$h_z^{VP II}$	14 mm
Průměr žebry	$D_z^{VP II}$	72,5 mm

3.2 Počet trubek v jedné podélné řadě VP II

Vychází se ze vzorce pro výpočet rychlosti proudění páry v potrubí w_p :

$$w_p = \frac{M_{pv} \cdot v_p}{f}, \text{ kde:} \quad (3-1)$$

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

Střední měrný objem páry ve VPII se vypočte jako aritmetický průměr hodnot v bodech 1V a 2V:

$$v_P^{VPII} = \frac{v_{1V} + v_{2V}}{2} = \frac{0,0602664 + 0,0485803}{2} = 0,0544 m^3 \cdot kg^{-1}$$

Rychlost proudění páry w_P^{VPII} by se měla pohybovat v rozmezí $15 \div 25 m \cdot s^{-1}$. Volíme $w_P^{VPII} = 19 m \cdot s^{-1}$. Úpravou vzorce (3-1) vznikne vztah pro výpočet f^{VPII} :

$$f^{VPII} = \frac{M_{PV} \cdot v_P^{VPII}}{w_P^{VPII}} = \frac{19,797 \cdot 0,0544}{19} = 0,056682 m^2$$

Dále se vychází ze vzorce pro **výpočet teplosměnné plochy ze strany páry** f , kdy úpravou tohoto vzorce pak lze dostat vztah pro určení počtu trubek v jedné podélné řadě:

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

Dosažením hodnot pro VPII:

$$n_{tr}^{VPII} = \frac{4 \cdot f^{VPII}}{\pi \cdot (d^{VPII})^2} = \frac{4 \cdot 0,056682}{\pi \cdot 0,0365^2} = 54,171$$

Byl zvolen počet trubek v podélné řadě $n_{tr}^{VPII} = 55$.

Dosažením za f ze vztahu (3-2) do vzorce (3-1) dostaneme nový vzorec pro **výpočet rychlosti proudění páry v potrubí** w_P :

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

Pro zvolený počet trubek v podélné řadě je nutno zkontrolovat, jestli stále vychází rychlost proudění v přípustných mezích, tedy $15 \div 25 m \cdot s^{-1}$:

$$w_P^{VPII} = \frac{4 \cdot M_{PV} \cdot v_P^{VPII}}{\pi \cdot (d^{VPII})^2 \cdot n_{tr}^{VPII}} = \frac{4 \cdot 19,797 \cdot 0,0544}{\pi \cdot 0,0365^2 \cdot 55} = 18,721 m \cdot s^{-1}$$

Rychlost proudění při zvoleném počtu trubek vyhovuje.

3.3 Výpočet objemového průtoku a volba rychlosti spalín ve VPII

Výpočet entalpie spalín v bodě B pilového diagramu se provede podle vzorce:

$$I_{SPB} = I_{SPA} - \frac{Q^{VPII}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 797,43 - \frac{4,95}{108,264 \cdot (1 - 0,003)} = 751,6 kJ \cdot m^{-3}$$

Teplota v bodě B pilového diagramu se vypočte interpolací z hodnot entalpií pro teploty 100 až 600°C (viz tab. 2.3) a z vypočtené entalpie v bodě B (jedná se zatím o návrhovou teplotu):

$$t_{BN} = \frac{(I_{SPB} - I_{SP500}) \cdot 100}{I_{SP600} - I_{SP500}} + 500 = \frac{(751,6 - 696) \cdot 100}{843 - 696} + 500 = 537,82^\circ C$$

Střední teplota proudu spalín pro VPII se vypočte jako aritmetický průměr hodnot v bodech A a B:

$$t_{SP}^{VPII} = \frac{t_A + t_{BN}}{2} = \frac{569 + 537,82}{2} = 553,41^\circ C$$

Přepočet objemového průtoku spalín na skutečný objemový průtok podle střední teploty proudu spalín se provede pomocí vzorce:

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

Dosažením hodnot pro VPII do (3-4):

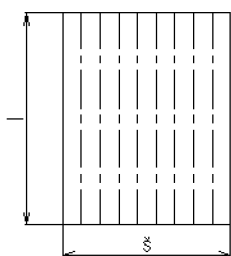
$$M_{SPOsk}^{VPII} = M_{SPO} \cdot \frac{t_{SP}^{VPII} + 273,15}{273,15} = 108,264 \cdot \frac{553,41 + 273,15}{273,15} = 327,611 m^3 \cdot s^{-1}$$

Rychlost spalín byla na základě konzultací zvolena $w_{SP-n}^{VPII} = 15 m \cdot s^{-1}$.

3.4 Výpočet rozměrů spalínového kanálu

Z objemového průtoku a rychlosti spalín se vypočte návrhová průtočná plocha spalín pro VPII:

$$S_{SP-PR-n}^{VPII} = \frac{M_{SPOsk}^{VPII}}{w_{SP-n}^{VPII}} = \frac{327,61}{15} = 21,841 m^2$$

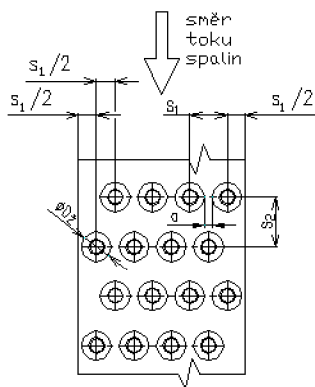


Mezera mezi trubkami (obr. 3.2) pro výpočet podélné rozteče byla zvolena $a^{VPII} = 10 mm$ (hodnota se volí z rozmezí 5 až 15 mm) a příčná rozteč mezi trubkami je potom:

$$s_1^{VPII} = D_{\check{z}}^{VPII} + a^{VPII} = 72,5 + 10 = 82,5 mm$$

Návrh šířky kanálu lze provést ze vztahu (viz obr. 3.2):

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



Dosažením hodnot pro VPII do vzorce (3-5) se vypočítá návrhová šířka kanálu:

$$\begin{aligned} \check{s}_n &= \frac{3}{2} \cdot s_1^{VPII} + (n_{tr}^{VPII} - 1) \cdot s_1^{VPII} = \\ &= \frac{3}{2} \cdot 82,5 + (55 - 1) \cdot 82,5 = 4578,75 mm \doteq 4,579 m \end{aligned}$$

Průtočnou plochu spalín lze spočítat i tak, že se od součinu šířky a výšky kanálu odečte plocha průmětů všech trubek a žeber do roviny kolmé ke směru průtoku spalín:

$$S_{SP-PR} = \check{s} \cdot l - l \cdot D \cdot n_{tr} - 2 \cdot h_{\check{z}} \cdot t_{\check{z}} \cdot l \cdot n_{\check{z}} \cdot n_{tr} \quad (3-6)$$

Obr. 3.2. Návrh roztečí trubek a rozměrů spalínového kanálu

Ze vztahu (3-6) se nyní vyjádří návrhová výška spalínového kanálu, která bude dále ve výpočtu vždy považována za totožnou s délkou trubky:

$$l_n = \frac{S_{SP-PR-n}^{VPII}}{\check{s}_n - D^{VPII} \cdot n_{tr}^{VPII} - 2 \cdot h_{\check{z}}^{VPII} \cdot t_{\check{z}} \cdot n_{\check{z}}^{VPII} \cdot n_{tr}^{VPII}} = \frac{21,841}{4,579 - 0,0445 \cdot 55 - 2 \cdot 0,014 \cdot 0,001 \cdot 190 \cdot 55} = 11,879 m$$

Skutečná šířka a výška kanálu byla zvolena:

- $\check{s} = 4,58m$
- $l = 11,88m$

Jelikož šířka kanálu přesahuje $4m$, bude nutno kanál z důvodu převozu rozdělit v polovině jeho šířky na dvě části. Šířka kanálu poté bude ve výsledku vyšší o 150mm, tento prostor však bude vyplněn izolací, a proto skutečná šířka pro průtok spalín zůstane $\check{s} = 4,58m$.

Skutečnou průtočnou plochu ze strany spalín pro VPII potom lze vypočítat dosazením nových hodnot do vzorce (3-6):

$$S_{SP-PR}^{VPII} = \check{s} \cdot l - l \cdot D^{VPII} \cdot n_{tr}^{VPII} - 2 \cdot h_{\check{z}}^{VPII} \cdot t_{\check{z}} \cdot l \cdot n_{\check{z}}^{VPII} \cdot n_{tr}^{VPII} =$$

$$= 4,58 \cdot 11,88 - 11,88 \cdot 0,0445 \cdot 55 - 2 \cdot 0,014 \cdot 0,001 \cdot 11,88 \cdot 190 \cdot 55 = 21,858m^2$$

Výpočet skutečné rychlosti spalín pro vypočtené hodnoty objemového průtoku a průtočné plochy spalín:

$$w_{SP} = \frac{M_{SPOsk}}{S_{SP-PR}} \quad (3-7)$$

Dosazením vypočtených hodnot pro VPII do (3-7):

$$w_{SP}^{VPII} = \frac{M_{SPOsk}^{VPII}}{S_{SP-PR}^{VPII}} = \frac{327,611}{21,858} = 14,988m \cdot s^{-1}$$

3.5 Přehled vypočtených hodnot

Vypočtené hodnoty v této kapitole jsou uvedeny v tab. 3.2.

Tab. 3.2. Přehled vypočtených hodnot pro spalínový kanál a VPII

Veličina	Značení	Hodnota
Počet trubek VPII v jedné podélné řadě	n_{tr}^{VPII}	55
Příčná rozteč mezi trubkami VPII	s_1^{VPII}	82,5mm
Šířka spalínového kanálu	\check{s}	4,58m
Výška spalínového kanálu	l	11,88m
Rychlost proudění spalín v kanále	w_{SP}^{VPII}	$14,988m \cdot s^{-1}$
Rychlost proudění páry v trubkách VPII	w_p^{VPII}	$18,721m \cdot s^{-1}$

4 Návrh výhřevných ploch

Při dimenzování jednotlivých výhřevných ploch navrhujeme z tabulky vyráběných rozměrů trubek vnější průměr D a tloušťku stěny trubek t_{tr} , vnitřní průměr je dopočítán jako $d = D - 2 \cdot t_{tr}$. Doporučená výška žebra h_z se pohybuje pro přehříváky a ekonomizéry mezi $10 \div 15 \text{ mm}$, pro výparníky mezi $10 \div 19 \text{ mm}$. Vnější průměr žebrování pak lze vypočítat jako $D_z = D_v + 2 \cdot h_z$. Počet žebor na 1 metr délky trubky n_z je volen z rozmezí $150 \div 200$, příp. až 240. Rozteč mezi žebry s_z je převrácenou hodnotou n_z .

Pro zvolené žebrované, příp. hladké trubky poté lze vypočítat příčnou rozteč trubek s_1 , a tím i počet těchto trubek v jedné podélné řadě n_r s přihlédnutím k dodržení doporučené rychlosti páry protékající trubkami w_p . U žebrovaných trubek je příčná rozteč s_1 dána průměrem žebrování D_z a volenou hodnotou volného prostoru mezi žebrovanými trubkami a , u hladkých trubek na nízkotlakém přehříváku je tato hodnota volena, a to s ohledem na dodržení doporučené rychlosti proudění páry w_p a navrženého předaného tepla Q v nízkotlakém přehříváku. Podélná rozteč trubek s_2 je volena na základě konzultací podle rozměrů rozváděcích trubek. Pro přehříváky a výparníky mají rozváděcí trubky průměr 114,3 mm a rozteč se tak volí o něco větší, $s_2 = 117 \text{ mm}$. Rozváděcí trubky ekonomizérů mají průměr 88,9 mm a rozteč se volí $s_2 = 92 \text{ mm}$. Dále je také nutno určit průtočnou rychlost spalín pro danou výhřevnou plochu w_{sp} .

Dalším krokem je výpočet celkového počtu podélných řad trubek n_R . Při určování počtu podélných řad se vychází z podílu teplosměnné plochy ze strany spalín celkové S_{sp} a na jednu řadu S_{sp-1r} . Tyto plochy lze určit ze zvolených rozměrů trubek, vypočtených hodnot tepla Q předaného v dané výhřevné ploše a součinitele prostupu tepla K a logaritmického teplotního spádu Δt_{ln} podle následujících vzorců:

Počet podélných řad:

$$n_R = \frac{S_{sp}}{S_{sp-1r}}, \text{ kde:} \quad (4-1)$$

- $S_{sp-1r} [m^2]$ je teplosměnná plocha ze strany spalín na jednu podélnou řadu a
- $S_{sp} [m^2]$ je celková teplosměnná plocha ze strany spalín.

Teplosměnná plocha ze strany spalín na jednu podélnou řadu trubek:

$$S_{sp-1r} = S_{sp-1m} \cdot l \cdot n_r, \text{ kde:} \quad (4-2)$$

- $S_{sp-1m} [m^2]$ je teplosměnná plocha ze strany spalín na 1m délky trubky.

Teplosměnná plocha ze strany spalín na 1m délky trubky:

$$S_{sp-1m} = \pi \cdot D + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{(D_z)^2 - (D)^2}{4} \right) \cdot n_z \quad \text{pro žebrované trubky, příp.} \quad (4-3)$$

$$S_{sp-1m} = \pi \cdot D \quad \text{pro hladké trubky.} \quad (4-4)$$

Celková teplosměnná plocha ze strany spalín:

$$S_{SP} = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{ln}}, \text{ kde:} \quad (4-5)$$

- Q [MW] je hodnota předaného tepla v dané výhřevné ploše (viz kap. 2),
- Δt_{ln} [K] je střední logaritmický teplotní spád a
- K [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$] je součinitel prostupu tepla.

Střední logaritmický teplotní spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln\left(\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}\right)}, \text{ kde:} \quad (4-6)$$

- Δt_2 [°C] je větší z rozdílů teplot mezi spalínami a párou a
- Δt_1 [°C] je menší z těchto rozdílů.

Součinitel prostupu tepla:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1r}} + \frac{1}{\alpha_{2r}} \cdot \frac{S_{SP-1m}}{S_{P-1m}} + \varepsilon}, \text{ kde:} \quad (4-7)$$

- ε [$W^{-1} \cdot m^2 \cdot K$] je poměrná zářivost, tuto hodnotu volíme $\varepsilon = 0,002 \cdot W^{-1} \cdot m^2 \cdot K$,
- S_{P-1m} [m^2] je teplosměnná plocha ze strany páry na 1m délky trubky,
- α_{1r} [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$] je součinitel přestupu tepla ze strany spalín,
- α_{2r} [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$] je součinitel přestupu tepla ze strany vody/páry.

Teplosměnná plocha ze strany páry na 1m délky trubky:

$$S_{P-1m} = \pi \cdot d \quad (4-8)$$

Součinitel přestupu tepla ze strany spalín:

$$\alpha_{1r} = \left(\frac{S_z}{S} \cdot E \cdot \mu + \frac{S_h}{S} \right) \cdot \frac{\psi_z \cdot \alpha_K}{1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_K}, \text{ kde:} \quad (4-9)$$

- μ [-] je součinitel rozšíření žebra, pro žebra s konstantním průřezem se volí $\mu = 1$,
- ψ_z [-] je koeficient charakterizující nerovnoměrnost rozložení α_K po povrchu žebra, pro žebra s kruhovým základem se bere hodnota $\psi_z = 0,85$,
- α_K [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$] je součinitel přestupu tepla konvekcí,
- E [-] je součinitel efektivity žebor, který lze určit z nomogramu v závislosti na součinu $\beta \cdot h_z$ a poměru $\frac{D_z}{D}$,
- $\frac{S_z}{S}$ [-] je podíl výhřevných ploch žebor a celkové plochy ze strany spalín a
- $\frac{S_h}{S}$ [-] je podíl plochy částí trubky bez žebor a celkové plochy ze strany spalín.

Součinitel β pro určení součinitele efektivity žebor:

$$\beta = \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_z \cdot \alpha_K}{t_z \cdot \lambda_z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_K)}}, \text{ kde:} \quad (4-10)$$

- λ_z [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] je součinitel tepelné vodivosti žebor, jehož hodnota je pro všechny žeborované trubky volena $\lambda_z = 40 \cdot W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

Podíl výhřevných ploch žebber a celkové plochy ze strany spalin pro kruhové trubky s kruhovými žebry:

$$\frac{S_{\dot{z}}}{S} = \frac{\left(\frac{D_{\dot{z}}}{D}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_{\dot{z}}}{D}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left[\left(\frac{S_{\dot{z}}}{D}\right) - \left(\frac{t_{\dot{z}}}{D}\right)\right]}, \text{ kde:} \quad (4-11)$$

- $t_{\dot{z}}$ [mm] je tloušťka žebra, která je u všech žebrovaných trubek volena $t_{\dot{z}} = 1\text{mm}$.

Podíl plochy volných částí trubky bez žebber a celkové plochy ze strany spalin:

$$\frac{S_h}{S} = 1 - \frac{S_{\dot{z}}}{S} \quad (4-12)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí ze strany spalin:

$$\alpha_K = 0,23 \cdot c_z \cdot \varphi_{\sigma}^{0,2} \cdot \frac{\lambda_{SP}}{s_{\dot{z}}} \cdot \left(\frac{D}{s_{\dot{z}}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_{\dot{z}}}{s_{\dot{z}}}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{w_{SP} \cdot s_{\dot{z}}}{v_{SP}}\right)^{0,65}, \text{ kde:} \quad (4-13)$$

- c_z [-] je součinitel opravy na počet podélných řad,
- φ_{σ} [-] je součinitel poměrných podélných roztečí,
- λ_{SP} [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] je součinitel tepelné vodivosti spalin a
- v_{SP} [$m^2 \cdot s^{-1}$] je součinitel dynamické viskozity spalin,

Součinitel poměrných podélných roztečí:

$$\varphi_{\sigma} = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1}, \text{ kde:} \quad (4-14)$$

- $\sigma_1 = \frac{s_1}{D}$ [-] a $\sigma'_2 = \frac{s'}{D}$ [-] jsou jednotlivé poměrné rozteče (rozteče vztažené k vnějšímu průměru trubky).

Součinitel přestupu tepla ze strany vody/páry:

$$\alpha_{2r} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d_e} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_e}{v_p}\right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \cdot c_i \cdot c_l \cdot c_m, \text{ kde:} \quad (4-15)$$

- d_e [mm] je ekvivalentní průměr, který při proudění uvnitř trubek je roven vnitřnímu průměru trubky d ,
- c_i [-] je opravný koeficient závislý na teplotě proudu a stěny a při ochlazení spalin se volí $c_i = 1$,
- c_l [-] je opravný koeficient na poměrnou délku a lze ho určit podle [1], str. 108, obr. 8-6, pro poměr $l/d_e \geq 50$ se však volí hodnota $c_l = 1$,
- c_m [-] je opravný koeficient mezikruží, při dvoustranném ohřevu se volí $c_m = 1$,
- λ_p [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] je součinitel tepelné vodivosti vody/páry,
- Pr_p [-] je Prandtlovo číslo vody/páry,
- v_p [$m^2 \cdot s^{-1}$] je součinitel dynamické viskozity vody/páry.

Pro zvolený počet podélných řad bude poté přepočtena skutečná teplosměnná plocha ze strany spalín S_{SPsk} a pomocí této hodnoty pak i skutečné předané teplo Q_{sk} v dané výhřevné ploše, pro které bude nakonec upravena navržená vstupní teplota spalín. Snahou bude, aby se skutečné hodnoty tepel a vstupních teplot co nejvíce blížili těm navrženým, proto bude stanovena kontrolní podmínka, aby rozdíl mezi Q a Q_{sk} byl co nejmenší, konkrétně aby nepřesáhl 5%. Pro snížení tohoto rozdílu lze měnit rozměry trubek, rozteč mezi trubkami, příp. počet trubek v jedné podélné řadě tak, aby tato podmínka byla splněna. Při výpočtu je postupováno především s užitím lit. [1].

Hodnoty některých veličin jsou stejné pro výpočet všech teplosměnných ploch. Tyto jsou uvedeny v tab. 4.1.

Tab. 4.1. Hodnoty pro výpočet výhřevných ploch

Veličina	Značení	Hodnota
Šířka spalínového kanálu	\check{s}	4,58m
Výška spalínového kanálu	l	11,88m
Objemový průtok spalín	M_{SPO}	108,264m ³ · s ⁻¹
Poměrná ztráta sáláním a konvekcí	z_s	0,3%
Poměrná zářivost	ε	0,002 · W ⁻¹ · m ² · K
Součinitel rozšíření žebra	μ	1
Koeficient charakterizující nerovnoměrnost rozložení α_K po povrchu žebra	ψ_z	0,85
Součinitel tepelné vodivosti žebra	λ_z	40 · W · m ⁻¹ · K ⁻¹
Opravný koeficient závislý na teplotě proudu a stěny	c_t	1
Opravný koeficient na poměrnou délku	c_l	1
Opravný koeficient mezikruží	c_m	1

4.1 Návrh druhého stupně vysokotlakého přehříváku (VP II)

4.1.1 Vstupní parametry a návrh rozměrů trubek VP II

Nákres a rozměry trubek VP II jsou uvedeny na obr. 3.1 a v tab. 3.1, vstupní parametry pro výpočet VP II, vypočtené v předchozích kapitolách, jsou uvedeny v tab. 4.2.

Tab. 4.2. Parametry potřebné pro návrh VP II

Veličina	Značení	Hodnota
Hmotnostní průtok páry vysokotlakým okruhem	M_{PV}	19,797kg · s ⁻¹
Teplo předané ve VP II	$Q^{VP II}$	4,95MW
Entalpie spalín v bodě A pilového diagramu	I_{SPA}	797,43kJ · m ⁻³
Entalpie spalín pro 500°C	I_{SP500}	696kJ · m ⁻³
Entalpie spalín pro 600°C	I_{SP600}	843kJ · m ⁻³
Teplota spalín v bodě A pilového diagramu	t_A	569°C
Teplota páry v bodě 1V pilového diagramu	t_{1V}	481°C
Teplota páry v bodě 2V pilového diagramu	t_{2V}	380,16°C

Tab. 4.2. Pokračování

Měrný objem páry v bodě 1V pilového diagramu	v_{1V}	$0,0602664m^3 \cdot kg^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 2V pilového diagramu	v_{2V}	$0,0485803m^3 \cdot kg^{-1}$
Tlak páry v bodě 1V pilového diagramu	p_{1V}	$5,5MPa$
Tlak páry v bodě 2V pilového diagramu	p_{2V}	$5,65MPa$
Počet trubek VP11 v jedné podélné řadě	n_{tr}^{VP11}	55
Příčná rozteč mezi trubkami VP11	s_1^{VP11}	82,5mm
Rychlost proudění spalin v kanále	w_{SP}^{VP11}	$14,988m \cdot s^{-1}$
Rychlost proudění páry v trubkách VP11	w_P^{VP11}	$18,721m \cdot s^{-1}$

4.1.2 Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalin VP11

Součinitel přestupu tepla ze strany spalin bude vypočítán ze vzorce (4-9).

4.1.2.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí

Podélná rozteč mezi trubkami byla zvolena $s_2^{VP11} = 117mm$ a přeponu s'^{VP11} (viz obr. 4.1) potom lze vypočítat ze vzorce:

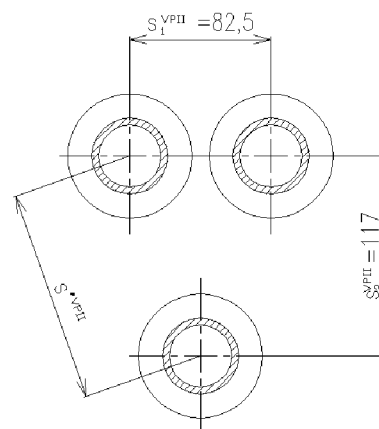
$$s'^{VP11} = \sqrt{\left(\frac{s_1^{VP11}}{2}\right)^2 + (s_2^{VP11})^2} = \sqrt{\left(\frac{82,5}{2}\right)^2 + 117^2} = 124,06mm$$

Nejdříve je nutno vypočítat poměrné podélné rozteče:

- $\sigma_1^{VP11} = \frac{s_1^{VP11}}{D^{VP11}} = \frac{82,5}{44,5} = 1,854,$
- $\sigma_2'^{VP11} = \frac{s'^{VP11}}{D^{VP11}} = \frac{124,06}{44,5} = 2,788.$

Tyto budou dosazeny do vzorce (4-14) pro výpočet poměrných podélných roztečí:

$$\varphi_{\sigma}^{VP11} = \frac{\sigma_1^{VP11} - 1}{\sigma_2'^{VP11} - 1} = \frac{1,854 - 1}{2,788 - 1} = 0,478$$



Obr. 4.1. Rozteče trubek VP11

Součinitel opravy na počet podélných řad lze určit z [1], obr. 8.4 na str. 116. Je zde předpokládán počet podélných řad menší než 5, a proto je volena hodnota:

$$c_Z^{VP11} = 0,9$$

Součinitele tepelné vodivosti spalin a součinitele kinematické viskozity spalin lze určit interpolací z [1], tab. 3-3 na str. 24 pro danou střední teplotu spalin $t_{SP}^{VP11} = 553,41^\circ C$ a objemový podíl vodní páry ve spalinách 9,7%:

- $\lambda_{SP}^{VP11} = 0,07 \cdot W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1},$
- $\nu_{SP}^{VP11} = 8,549 \cdot 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}.$

Součinitel přestupu tepla konvekcí je nyní možno spočítat dosazením do vzorce (4-13):

$$\begin{aligned}\alpha_K^{VPII} &= 0,23 \cdot c_Z^{VPII} \cdot (\varphi_\sigma^{VPII})^{0,2} \cdot \frac{\lambda_{SP}^{VPII}}{s_Z^{VPII}} \cdot \left(\frac{D^{VPII}}{s_Z^{VPII}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_Z^{VPII}}{s_Z^{VPII}}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{W_{SP}^{VPII} \cdot s_Z^{VPII}}{v_{SP}^{VPII}}\right)^{0,65} = \\ &= 0,23 \cdot 0,9 \cdot 0,478^{0,2} \cdot \frac{0,07}{5,26 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{0,0445}{5,26 \cdot 10^{-3}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,014}{5,26 \cdot 10^{-3}}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{14,988 \cdot 5,26 \cdot 10^{-3}}{8,549 \cdot 10^{-5}}\right)^{0,65} = \\ &= 54,966 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}\end{aligned}$$

4.1.2.2 Součinitel efektivity žebër

Pro zjištění součinitele efektivity žebër je nutno spočítat součinitel β ze vzorce (4-10):

$$\beta^{VPII} = \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_Z \cdot \alpha_K^{VPII}}{t_Z \cdot \lambda_Z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_Z \cdot \alpha_K^{VPII})}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 54,966}{0,001 \cdot 40 \cdot (1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 54,966)}} = 46,221 m^{-1}$$

Hodnotu součinitele E nyní lze zjistit z [1], grafu na str. 114 pomocí součinu $\beta \cdot h_Z^{VPII}$ a poměru

$$\frac{D_Z^{VPII}}{D^{VPII}}:$$

- $\beta \cdot h_Z^{VPII} = 46,221 \cdot 0,014 = 0,647,$
- $\frac{D_Z^{VPII}}{D^{VPII}} = \frac{72,5}{44,5} = 1,629.$

Z grafu byla odečtena hodnota:

$$E^{VPII} = 0,87$$

4.1.2.3 Podíl teplosměnných ploch žebër a celkové plochy ze strany spalín

Podíl výhřevných ploch žebër a celkové plochy ze strany spalín pro kruhové trubky s kruhovými žebry se vypočítá ze vzorce (4-11):

$$\frac{S_Z^{VPII}}{S^{VPII}} = \frac{\left(\frac{D_Z^{VPII}}{D^{VPII}}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_Z^{VPII}}{D^{VPII}}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left[\left(\frac{S_Z^{VPII}}{D^{VPII}}\right) - \left(\frac{t_Z}{D^{VPII}}\right)\right]} = \frac{\left(\frac{72,5}{44,5}\right)^2 - 1}{\left(\frac{72,5}{44,5}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left[\left(\frac{5,26}{44,5}\right) - \left(\frac{1}{44,5}\right)\right]} = 0,896$$

Podíl volných částí trubky, kde nejsou žebra a celkové plochy na straně spalín se vypočítá ze vzorce (4-12):

$$\frac{S_h^{VPII}}{S^{VPII}} = 1 - \frac{S_Z^{VPII}}{S^{VPII}} = 1 - 0,896 = 0,104$$

4.1.2.4 Součinitel přestupu tepla ze strany spalín

Nyní lze vypočtené hodnoty dosadit do vzorce (4-9) a určit hodnotu α_r :

$$\begin{aligned}\alpha_{1r}^{VPII} &= \left(\frac{S_Z^{VPII}}{S^{VPII}} \cdot E^{VPII} \cdot \mu + \frac{S_h^{VPII}}{S^{VPII}}\right) \cdot \frac{\psi_Z \cdot \alpha_K^{VPII}}{1 + \varepsilon \cdot \psi_Z \cdot \alpha_K^{VPII}} = \\ &= (0,896 \cdot 0,87 \cdot 1 + 0,104) \cdot \frac{0,85 \cdot 54,966}{1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 54,966} = 37,75 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}\end{aligned}$$

4.1.3 Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany páry VPII

Pro střední tlak p_p^{VPII} a pro střední teplotu páry t_p^{VPII} ve VPII byly pomocí X-Steam určeny hodnoty součinitele tepelné vodivosti vodní páry, Prandtlovo číslo a součinitele dynamické viskozity:

$$p_p^{VPII} = \frac{p_{1V} + p_{2V}}{2} = \frac{5,5 + 5,65}{2} = 5,575 \text{ MPa},$$

$$t_p^{VPII} = \frac{t_{1V} + t_{2V}}{2} = \frac{481 + 380,16}{2} = 430,58^\circ \text{C}$$

- $\lambda_p^{VPII} = 0,0633056 \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- $\text{Pr}_p^{VPII} = 0,9915$
- $\mu_p^{VPII} = 2,572 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$

Výpočet součinitele kinematické viskozity vodní páry:

$$v_p^{VPII} = \mu_p^{VPII} \cdot v_p^{VPII} = 2,572 \cdot 10^{-5} \cdot 0,0544 = 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Ekvivalentní průměr při proudění uvnitř trubek je roven vnitřnímu průměru trubky:

$$d_e^{VPII} = d^{VPII} = 36,5 \text{ mm}$$

Potom lze vypočítat součinitel přestupu tepla ze strany páry dosazením do vzorce (4-15):

$$\begin{aligned} \alpha_{2r}^{VPII} &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_p^{VPII}}{d_e^{VPII}} \cdot \left(\frac{w_p^{VPII} \cdot d_e^{VPII}}{v_p^{VPII}} \right)^{0,8} \cdot (\text{Pr}_p^{VPII})^{0,4} \cdot c_t^{VPII} \cdot c_l^{VPII} \cdot c_m^{VPII} = \\ &= 0,023 \cdot \frac{0,0633056}{0,0365} \cdot \left(\frac{18,721 \cdot 0,0365}{1,4 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,9915^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1413 \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

4.1.4 Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu VPII

Teplosměnná plocha ze strany spalín na 1m délky trubky dosazením do (4-3):

$$S_{SP-1m}^{VPII} = \pi \cdot D^{VPII} + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{(D_z^{VPII})^2 - (D^{VPII})^2}{4} \right) \cdot n_z^{VPII} = \pi \cdot 0,0445 + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,0725^2 - 0,0445^2}{4} \right) \cdot 190 = 1,118 \text{ m}$$

Teplosměnná plocha ze strany páry na 1m délky trubky dosazením do (4-8):

$$S_{P-1m}^{VPII} = \pi \cdot d^{VPII} = \pi \cdot 0,0365 = 0,115 \text{ m}$$

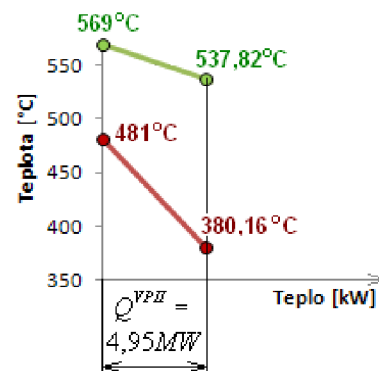
Součinitel prostupu tepla dosazením do (4-7):

$$\begin{aligned} K^{VPII} &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1r}^{VPII}} + \frac{1}{\alpha_{2r}^{VPII}} \cdot \frac{S_{SP-1m}^{VPII}}{S_{P-1m}^{VPII}} + \varepsilon} = \frac{1}{\frac{1}{37,75} + \frac{1}{1413} \cdot \frac{1,118}{0,115} + 0,002} = \\ &= 28,26 \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

Výpočet logaritmického teplotního spádu dosazením do (4-6):

- $\Delta t_1^{VPII} = t_A - t_{1V} = 569 - 481 = 88^\circ \text{C}$
- $\Delta t_2^{VPII} = t_{BN} - t_{2V} = 537,82 - 380,16 = 157,66^\circ \text{C}$

$$\Delta t_{\ln}^{VPII} = \frac{\Delta t_2^{VPII} - \Delta t_1^{VPII}}{\ln\left(\frac{\Delta t_2^{VPII}}{\Delta t_1^{VPII}}\right)} = \frac{157,66 - 88}{\ln\left(\frac{157,66}{88}\right)} = 119,464^\circ \text{C}$$



Obr. 4.2. Logaritmický teplotní spád VPII

4.1.5 Volba počtu podélných řad VP II

Výpočet celkové teplosměnné plochy ze strany spalin dosazením do (4-5):

$$S_{SP}^{VP II} = \frac{Q^{VP II}}{K^{VP II} \cdot \Delta t_{ln}^{VP II}} = \frac{4950}{28,26 \cdot 119,464} = 1466 m^2$$

Výpočet plochy ze strany spalin na jednu řadu dosazením do (4-2):

$$S_{SP-1r}^{VP II} = S_{SP-1m}^{VP II} \cdot l \cdot n_{tr}^{VP II} = 1,118 \cdot 11,88 \cdot 55 = 730,192 m^2$$

Počet podélných řad pak lze určit dosazením do vzorce (4-1):

$$n_R^{VP II} = \frac{S_{SP}^{VP II}}{S_{SP-1r}^{VP II}} = \frac{1466}{730,192} = 2,008$$

Hodnotu je potřeba zaokrouhlit na celé číslo:

$$n_R^{VP II} = 2$$

4.1.6 Výpočet skutečného předaného tepla ve VP II

Skutečná teplosměnná plocha ze strany spalin při zvoleném počtu řad:

$$S_{SPsk}^{VP II} = S_{SP-1r}^{VP II} \cdot n_R^{VP II} = 730,192 \cdot 2 = 1460,384 m^2$$

Skutečné předané teplo:

$$Q_{sk}^{VP II} = K^{VP II} \cdot S_{SPsk}^{VP II} \cdot \Delta t_{ln}^{VP II} = 28,26 \cdot 1460,384 \cdot 119,464 = 4,93 MW$$

Původně navržená hodnota předaného tepla byla:

$$Q^{VP II} = 4,95 MW$$

Kontrolu, zda rozdíl mezi navrženým a skutečným předaným teplem vychází menší než 5 %, lze provést následujícím vztahem:

$$x_Q^{VP II} = \left| 5 \cdot \frac{Q_{sk}^{VP II} - Q^{VP II}}{Q_{sk}^{VP II} \cdot 0,05} \right| = \left| 5 \cdot \frac{4,93 - 4,95}{4,93 \cdot 0,05} \right| = 0,381 \%$$

Jelikož rozdíl vychází 0,381%, zvolený počet řad $n_R^{VP II} = 2$ vyhovuje.

4.1.7 Výpočet skutečné teploty spalin v bodě B

Výpočet skutečné entalpie spalin v bodě B:

$$I_{SPB} = I_{SPA} - \frac{Q_{sk}^{VP II}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 797,43 - \frac{4930}{108,264 \cdot (1 - 0,003)} = 751,8 kJ \cdot m^{-3}$$

Z nové hodnoty entalpie lze nyní určit skutečnou teplotu v bodě B:

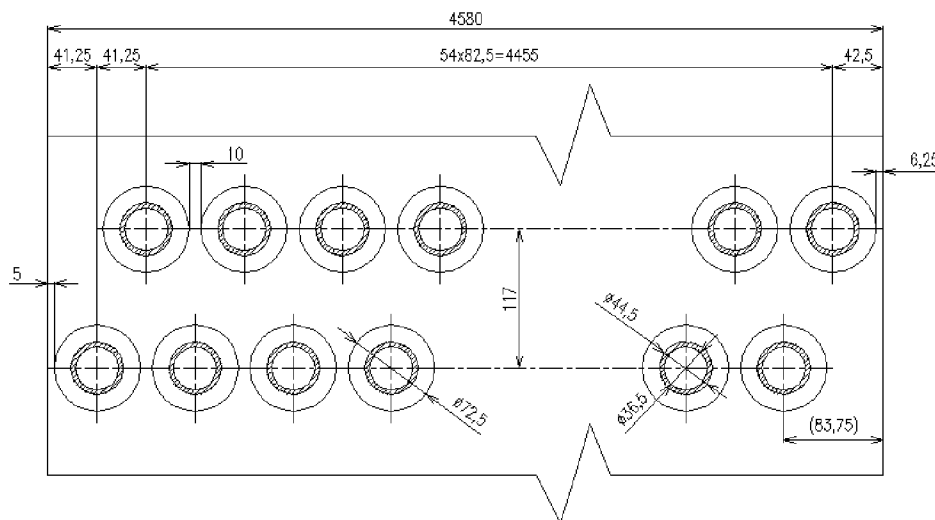
$$t_B = \frac{(I_{SPB} - I_{SP500}) \cdot 100}{I_{SP600} - I_{SP500}} + 500 = \frac{(751,8 - 696) \cdot 100}{843 - 696} + 500 = 537,94^\circ C$$

4.1.8 Přehled vypočtených hodnot a nákres VP II

Hodnoty vypočtené v této kapitole jsou pro přehled uvedeny v tab. 4.3.

Tab. 4.3. Přehled vypočtených hodnot pro VP II

Veličina	Značení	Hodnota
Podélná rozteč mezi trubkami VP II	$s_2^{VP II}$	117 mm
Počet podélných řad trubek VP II	$n_R^{VP II}$	2
Skutečné předané teplo ve VP II	$Q_{sk}^{VP II}$	4,93 MW
Skutečná teplota spalín v bodě B	t_B	537,94 °C



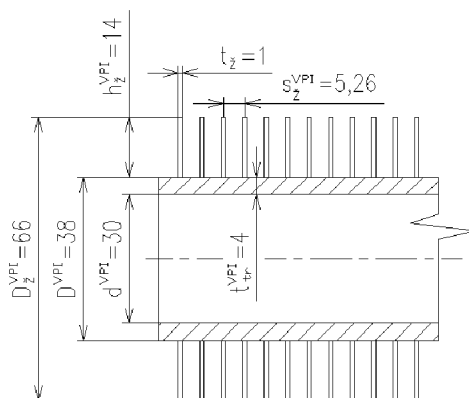
Obr. 4.3. Nákres trubek VP II ve spalínovém kanále

4.2 Návrh prvního stupně vysokotlakého přehříváku (VPI)

4.2.1 Vstupní parametry a návrh rozměrů trubek VPI

Nákres a rozměry trubek VPI jsou uvedeny na obr. 4.4 a v tab. 4.4, vstupní parametry pro výpočet VPI, vypočtené v předchozích kapitolách, jsou uvedeny v tab. 4.5.

Tab. 4.4. Zvolené rozměry trubek VPI



Obr. 4.4. Rozměry trubek VPI

Rozměr trubky	Značení	Hodnota
Vnější průměr trubky	D^{VPI}	38 mm
Tloušťka trubky	t_{tr}^{VPI}	4 mm
Vnitřní průměr trubky	d^{VPI}	30 mm
Tloušťka žebry	t_z	1 mm
Počet žebry na 1m délky trubky	n_z^{VPI}	190 m ⁻¹
Rozteč mezi žebry	s_z^{VPI}	≈ 5,26 mm
Výška žebry	h_z^{VPI}	14 mm
Průměr žebry	D_z^{VPI}	66 mm

Tab. 4.5. Parametry potřebné pro návrh VPI

Veličina	Značení	Hodnota
Hmotnostní průtok páry vysokotlakým okruhem	M_{PV}	$19,797 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Teplo předané ve VPI	Q^{VPI}	$9,357 \text{ MW}$
Entalpie spalín v bodě B pilového diagramu	I_{SPB}	$751,8 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Entalpie spalín pro 400°C	I_{SP400}	$549,5 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Entalpie spalín pro 500°C	I_{SP500}	$696 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Teplota spalín v bodě B pilového diagramu	t_B	$537,94^\circ \text{ C}$
Teplota páry v bodě 3V pilového diagramu	t_{3V}	$440,26^\circ \text{ C}$
Teplota páry v bodě 4V pilového diagramu	t_{4V}	$273,38^\circ \text{ C}$
Měrný objem páry v bodě 3V pilového diagramu	v_{3V}	$0,0546786 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 4V pilového diagramu	v_{4V}	$0,0336587 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Tlak páry v bodě 3V pilového diagramu	p_{3V}	$5,65 \text{ MPa}$
Tlak páry v bodě 4V pilového diagramu	p_{4V}	$5,8 \text{ MPa}$

4.2.2 Počet trubek v jedné podélné řadě VPI

Mezera mezi trubkami (obr. 3.2) pro výpočet podélné rozteče byla zvolena $a^{VPI} = 5 \text{ mm}$ (hodnotu volíme z rozmezí 5 až 15 mm) a příčná rozteč mezi trubkami je potom:

$$s_1^{VPI} = D_z^{VPI} + a^{VPI} = 66 + 5 = 71 \text{ mm}$$

Při návrhu počtu trubek se vychází z upraveného vzorce (3-5):

$$n_{tr}^{VPI} = \frac{\xi}{s_1^{VPI}} - \frac{1}{2} = \frac{4,58}{0,071} - \frac{1}{2} = 64,007$$

Byl zvolen počet trubek v podélné řadě $n_{tr}^{VPI} = 64$.

Střední měrný objem páry ve VPI se vypočte jako aritmetický průměr hodnot v bodech 3V a 4V:

$$v_p^{VPI} = \frac{v_{3V} + v_{4V}}{2} = \frac{0,0546786 + 0,0336587}{2} = 0,044 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Pro zvolený počet trubek v podélné řadě je nutno zkontrolovat dosazením do vztahu (3-3), jestli vychází rychlost proudění v přípustných mezích, tedy $15 \div 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$:

$$w_p^{VPI} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot v_p^{VPI}}{\pi \cdot (d^{VPI})^2 \cdot n_{tr}^{VPI}} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot 19,797 \cdot 0,044}{\pi \cdot 0,03^2 \cdot 64} = 18,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost proudění při zvoleném počtu trubek vyhovuje.

4.2.3 Výpočet objemového průtoku a rychlosti spalín ve VPI

Výpočet entalpie spalín v bodě C:

$$I_{SPC} = I_{SPB} - \frac{Q^{VPI}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 751,8 - \frac{9357}{108,264 \cdot (1 - 0,003)} = 664,9 \text{ kJ}$$

Teplota v bodě C pilového diagramu se vypočte interpolací z hodnot entalpií pro teploty 100 až 600°C (viz tab. 2.3) a z vypočtené entalpie v bodě C (jedná se zatím o návrhovou teplotu):

$$t_{CN} = \frac{(I_{SPC} - I_{SP400}) \cdot 100}{I_{SP500} - I_{SP400}} + 400 = \frac{(664,9 - 549,5) \cdot 100}{696 - 549,5} + 400 = 478,8^\circ \text{C}$$

Střední teplota proudu spalín pro VPI se vypočte jako aritmetický průměr hodnot v bodech B a C:

$$t_{SP}^{VPI} = \frac{t_B + t_{CN}}{2} = \frac{537,94 + 478,8}{2} = 508,37^\circ \text{C}$$

Výpočet skutečného objemového průtoku spalín ve VPI dosazením do vzorce (3-4):

$$M_{SPOsk}^{VPI} = M_{SPO} \cdot \frac{t_{SP}^{VPI} + 273,15}{273,15} = 108,264 \cdot \frac{508,37 + 273,15}{273,15} = 309,756 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Výpočet průtočné plochy spalín pro VPI dosazením do vzorce (3-6):

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

$$= 11,88 \cdot 4,58 - 11,88 \cdot 0,038 \cdot 64 - 2 \cdot 0,014 \cdot 0,001 \cdot 190 \cdot 64 \cdot 11,88 = 21,473 \text{ m}^2$$

Výpočet skutečné rychlosti spalín ve VPI dosazením do vzorce (3-7):

$$w_{SP}^{VPI} = \frac{M_{SPOsk}^{VPI}}{S_{SP-PR}^{VPI}} = \frac{309,756}{21,473} = 14,425 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

4.2.4 Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalín VPI

Součinitel přestupu tepla ze strany spalín bude vypočítán ze vzorce (4-9).

4.2.4.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí

Podélná rozteč mezi trubkami byla zvolena $s_2^{VPI} = 117 \text{ mm}$ a přeponu s^{VPI} (viz obr. 4.5) potom lze vypočítat ze vzorce:

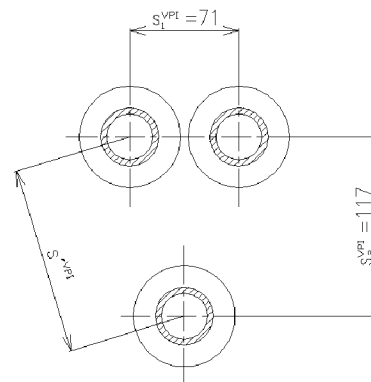
$$s^{VPI} = \sqrt{\left(\frac{s_1^{VPI}}{2}\right)^2 + (s_2^{VPI})^2} = \sqrt{\left(\frac{71}{2}\right)^2 + 117^2} = 122,27 \text{ mm}$$

Nejdříve je nutno vypočítat poměrné podélné rozteče:

- $\sigma_1^{VPI} = \frac{s_1^{VPI}}{D^{VPI}} = \frac{71}{38} = 1,868,$
- $\sigma_2^{VPI} = \frac{s^{VPI}}{D^{VPI}} = \frac{122,27}{38} = 3,218.$

Tyto budou dosazeny do vzorce (4-14) pro výpočet poměrných podélných roztečů:

$$\varphi_{\sigma}^{VPI} = \frac{\sigma_1^{VPI} - 1}{\sigma_2^{VPI} - 1} = \frac{1,868 - 1}{3,218 - 1} = 0,392$$



Obr. 4.5. Rozteče trubek VPI

Součinitel opravy na počet podélných řad lze určit z [1], obr. 8.4 na str. 116. Je zde předpokládán počet podélných řad menší než 5, a proto je volena hodnota:

$$c_Z^{VPI} = 0,9$$

Součinitele tepelné vodivosti spalín a součinitele kinematické viskozity spalín lze určit interpolací z [1], tab. 3-3 na str. 24 pro danou střední teplotu spalín $t_{SP}^{VPI} = 508,37^\circ C$ a objemový podíl vodní páry ve spalínách 9,7%:

- $\lambda_{SP}^{VPI} = 0,066 \cdot W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$,
- $\nu_{SP}^{VPI} = 7,775 \cdot 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}$.

Součinitel přestupu tepla konvekcí je nyní možno spočítat dosazením do vzorce (4-13):

$$\begin{aligned} \alpha_K^{VPI} &= 0,23 \cdot c_Z^{VPI} \cdot (\varphi_\sigma^{VPI})^{0,2} \cdot \frac{\lambda_{SP}^{VPI}}{s_Z^{VPI}} \cdot \left(\frac{D^{VPI}}{s_Z^{VPI}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_Z^{VPI}}{s_Z^{VPI}}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{w_{SP}^{VPI} \cdot s_Z^{VPI}}{\nu_{SP}^{VPI}}\right)^{0,65} = \\ &= 0,23 \cdot 0,9 \cdot 0,392^{0,2} \cdot \frac{0,066}{5,26 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{0,038}{5,26 \cdot 10^{-3}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,014}{5,26 \cdot 10^{-3}}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{14,425 \cdot 5,26 \cdot 10^{-3}}{7,775 \cdot 10^{-5}}\right)^{0,65} = \\ &= 56,46 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \end{aligned}$$

4.2.4.2 Součinitel efektivnosti žebor

Pro zjištění součinitele efektivnosti žebor je nutno spočítat součinitel β ze vzorce (4-10):

$$\beta^{VPI} = \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_Z \cdot \alpha_K^{VPI}}{t_Z \cdot \lambda_Z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_Z \cdot \alpha_K^{VPI})}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 56,46}{0,001 \cdot 40 \cdot (1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 56,46)}} = 46,791 m^{-1}$$

Hodnotu součinitele E nyní lze zjistit z [1], grafu na str. 114 pomocí součinu $\beta \cdot h_Z^{VPI}$ a poměru

$$\frac{D_Z^{VPI}}{D^{VPI}}:$$

- $\beta \cdot h_Z^{VPI} = 46,791 \cdot 0,014 = 0,655$,
- $\frac{D_Z^{VPI}}{D^{VPI}} = \frac{72,5}{44,5} = 1,737$.

Z grafu byla odečtena hodnota:

$$E^{VPI} = 0,86$$

4.2.4.3 Podíly teplosměnných ploch žebor a celkové plochy ze strany spalín

Podíl výhřevných ploch žebor a celkové plochy ze strany spalín pro kruhové trubky s kruhovými žebory se vypočítá ze vzorce (4-11):

$$\frac{S_Z^{VPI}}{S^{VPI}} = \frac{\left(\frac{D_Z^{VPI}}{D^{VPI}}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_Z^{VPI}}{D^{VPI}}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left[\left(\frac{s_Z^{VPI}}{D^{VPI}}\right) - \left(\frac{t_Z}{D^{VPI}}\right)\right]} = \frac{\left(\frac{66}{38}\right)^2 - 1}{\left(\frac{66}{38}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left[\left(\frac{5,26}{38}\right) - \left(\frac{1}{38}\right)\right]} = 0,9$$

Podíl volných částí trubky, kde nejsou žebra a celkové plochy na straně spalín se vypočítá ze vzorce (4-12):

$$\frac{S_h^{VPI}}{S^{VPI}} = 1 - \frac{S_Z^{VPI}}{S^{VPI}} = 1 - 0,9 = 0,1$$

4.2.4.4 Součinitel přestupu tepla ze strany spalín

Nyní lze vypočtené hodnoty dosadit do vzorce (4-9) a určit hodnotu α_r :

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

$$= (0,9 \cdot 0,86 \cdot 1 + 0,1) \cdot \frac{0,85 \cdot 56,46}{1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 56,46} = 38,271 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

4.2.5 Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany páry VPI

Pro střední tlak p_p^{VPI} a pro střední teplotu páry t_p^{VPI} ve VPI byly pomocí X-Steam určeny hodnoty součinitele tepelné vodivosti vodní páry, Prandtlovo číslo a součinitele dynamické viskozity:

$$p_p^{VPI} = \frac{p_{3V} + p_{4V}}{2} = \frac{5,65 + 5,8}{2} = 5,725 MPa,$$

$$t_p^{VPI} = \frac{t_{3V} + t_{4V}}{2} = \frac{440,26 + 273,38}{2} = 356,82^\circ C$$

- $\lambda_p^{VPI} = 0,0501489 \cdot W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
- $Pr_p^{VPI} = 0,9402$
- $\mu_p^{VPI} = 2,263 \cdot 10^{-5} N \cdot s \cdot m^{-2}$

Výpočet součinitele kinematické viskozity vodní páry:

$$v_p^{VPI} = \mu_p^{VPI} \cdot \nu_p^{VPI} = 2,263 \cdot 10^{-5} \cdot 0,044 = 9,995 \cdot 10^{-7} m^2 \cdot s^{-1}$$

Ekvivalentní průměr při proudění uvnitř trubek je roven vnitřnímu průměru trubky:

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

Potom lze vypočítat součinitel přestupu tepla ze strany páry dosazením do vzorce (4-15):

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

$$= 0,023 \cdot \frac{0,0501489}{0,03} \cdot \left(\frac{18,3 \cdot 0,03}{9,995 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 0,9402^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1469 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

4.2.6 Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu VPI

Teplosměnná plocha ze strany spalín na 1m délky trubky dosazením do (4-3):

$$S_{SP-1m}^{VPI} = \pi \cdot D^{VPI} + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{(D_{\dot{z}}^{VPI})^2 - (D^{VPI})^2}{4} \right) \cdot n_{\dot{z}}^{VPI} = \pi \cdot 0,038 + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,066^2 - 0,038^2}{4} \right) \cdot 190 = 0,988m$$

Teplosměnná plocha ze strany páry na 1m délky trubky dosazením do (4-8):

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

Součinitel prostupu tepla dosažením do (4-7):

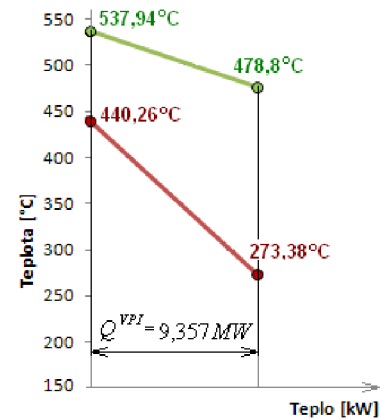
$$K^{VPI} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1r}^{VPI}} + \frac{1}{\alpha_{2r}^{VPI}} \cdot \frac{S_{SP-1m}^{VPI}}{S_{P-1m}^{VPI}} + \varepsilon} = \frac{1}{\frac{1}{38,271} + \frac{1}{1469} \cdot \frac{0,988}{0,094} + 0,002} =$$

$$= 28,355 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

Výpočet logaritmického teplotního spádu dosažením do (4-6):

- $\Delta t_1^{VPI} = t_B - t_{3V} = 537,94 - 440,26 = 97,677^\circ C$
- $\Delta t_2^{VPI} = t_{CN} - t_{4V} = 478,8 - 273,38 = 205,406^\circ C$

$$\Delta t_{ln}^{VPI} = \frac{\Delta t_2^{VPI} - \Delta t_1^{VPI}}{\ln\left(\frac{\Delta t_2^{VPI}}{\Delta t_1^{VPI}}\right)} = \frac{205,406 - 97,677}{\ln\left(\frac{205,406}{97,677}\right)} = 144,929^\circ C$$



Obr. 4.6. Logaritmický teplotní spád VPI

4.2.7 Volba počtu podélných řad VPI

Výpočet celkové teplosměnné plochy ze strany spalin dosažením do (4-5):

$$S_{SP}^{VPI} = \frac{Q^{VPI}}{K^{VPI} \cdot \Delta t_{ln}^{VPI}} = \frac{9357}{28,355 \cdot 144,929} = 2277 m^2$$

Výpočet plochy ze strany spalin na jednu řadu dosažením do (4-2):

$$S_{SP-1r}^{VPI} = S_{SP-1m}^{VPI} \cdot l \cdot n_{tr}^{VPI} = 0,988 \cdot 11,88 \cdot 64 = 751,554 m^2$$

Počet podélných řad pak lze určit dosažením do vzorce (4-1):

$$n_R^{VPI} = \frac{S_{SP}^{VPI}}{S_{SP-1r}^{VPI}} = \frac{2277}{751,554} = 3,029$$

Hodnotu je potřeba zaokrouhlit na celé číslo:

$$n_R^{VPI} = 3$$

4.2.8 Výpočet skutečného předaného tepla ve VPI

Skutečná teplosměnná plocha ze strany spalin při zvoleném počtu řad:

$$S_{SPsk}^{VPI} = S_{SP-1r}^{VPI} \cdot n_R^{VPI} = 751,554 \cdot 3 = 2255 m^2$$

Skutečné předané teplo:

$$Q_{sk}^{VPI} = K^{VPI} \cdot S_{SPsk}^{VPI} \cdot \Delta t_{ln}^{VPI} = 28,355 \cdot 2255 \cdot 144,929 = 9,266 MW$$

Původně navržená hodnota předaného tepla byla:

$$Q^{VPI} = 9,357 MW$$

Kontrolu, zda rozdíl mezi navrženým a skutečným předaným teplem vychází menší než 5 %, lze provést následujícím vztahem:

$$x_Q^{VPI} = \left| 5 \cdot \frac{Q_{sk}^{VPI} - Q^{VPI}}{Q_{sk}^{VPI} \cdot 0,05} \right| = \left| 5 \cdot \frac{9,266 - 9,357}{9,266 \cdot 0,05} \right| = 0,982\%$$

Jelikož rozdíl vychází 0,982%, zvolený počet řad $n_{RVPI} = 3$ vyhovuje.

4.2.9 Výpočet skutečné teploty spalin v bodě C

Výpočet skutečné entalpie spalin v bodě C:

$$I_{SPC} = I_{SPB} - \frac{Q_{sk}^{VPI}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 751,8 - \frac{9266}{108,264 \cdot (1 - 0,003)} = 665,8 kJ$$

Z nové hodnoty entalpie lze nyní určit skutečnou teplotu v bodě C:

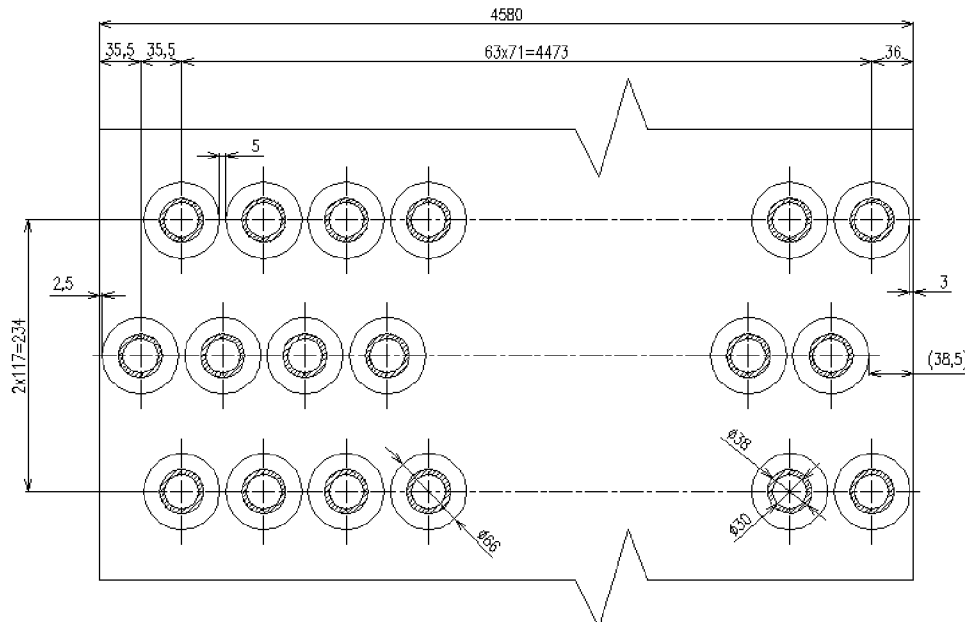
$$t_C = \frac{(I_{SPC} - I_{SP400}) \cdot 100}{I_{SP500} - I_{SP400}} + 400 = \frac{(665,8 - 549,5) \cdot 100}{696 - 549,5} + 400 = 479,36^\circ C$$

4.2.10 Přehled vypočtených hodnot a nákres VPI

Hodnoty vypočtené v této kapitole jsou pro přehled uvedeny v tab. 4.6.

Tab. 4.6. Přehled vypočtených hodnot pro VPI

Veličina	Značení	Hodnota
Počet trubek VPI v jedné podélné řadě	n_{tr}^{VPI}	64
Počet podélných řad trubek VPI	n_R^{VPI}	3
Příčná rozteč mezi trubkami VPI	s_1^{VPI}	71mm
Podélná rozteč mezi trubkami VPI	s_2^{VPI}	117mm
Rychlost proudění spalin v kanále	w_{SP}^{VPI}	$14,425 m \cdot s^{-1}$
Rychlost proudění páry v trubkách VPI	w_P^{VPI}	$18,3 m \cdot s^{-1}$
Skutečné předané teplo ve VPI	Q_{sk}^{VPI}	9,266MW
Skutečná teplota spalin v bodě C	t_C	$479,36^\circ C$

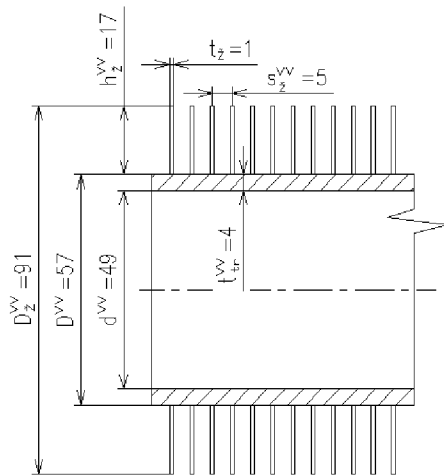


Obr. 4.7. Nákres trubek VPI ve spalinovém kanále

4.3 Návrh vysokotlakého výparníku (VV)

4.3.1 Vstupní parametry a návrh rozměrů trubek VV

Nákres a rozměry trubek VV jsou uvedeny na obr. 4.8 a v tab. 4.7, vstupní parametry pro výpočet VV, vypočtené v předchozích kapitolách, jsou uvedeny v tab. 4.8.



Obr. 4.8. Rozměry trubek VV

Tab. 4.7. Zvolené rozměry trubek VV

Rozměr trubky	Značení	Hodnota
Vnější průměr trubky	D_z^{VV}	57 mm
Tloušťka trubky	t_{tr}^{VV}	4 mm
Vnitřní průměr trubky	d^{VV}	49 mm
Tloušťka žebry	t_z	1 mm
Počet žebry na 1m délky trubky	n_z^{VV}	200 m^{-1}
Rozteč mezi žebry	s_z^{VV}	5 mm
Výška žebry	h_z^{VV}	17 mm
Průměr žebry	D_z^{VV}	91 mm

Tab. 4.8. Parametry potřebné pro návrh VV

Veličina	Značení	Hodnota
Hmotnostní průtok páry vysokotlakým okruhem	M_{pV}	19,797 $kg \cdot s^{-1}$
Teplo předané ve VV	Q^{VV}	30,277 MW
Entalpie spalín v bodě C pilového diagramu	I_{SPC}	665,8 $kJ \cdot m^{-3}$
Entalpie spalín pro 200°C	I_{SP200}	268,9 $kJ \cdot m^{-3}$
Entalpie spalín pro 300°C	I_{SP300}	407,4 $kJ \cdot m^{-3}$
Teplota spalín v bodě C pilového diagramu	t_C	479,36 °C
Teplota páry v bodě 4V pilového diagramu	t_{4V}	273,38 °C
Teplota vody v bodě 5V pilového diagramu	t_{5V}	273,38 °C

4.3.2 Počet trubek v jedné podélné řadě VV

Mezera mezi trubkami (obr. 3.2) pro výpočet podélné rozteče byla zvolena $a^{VV} = 12 \text{ mm}$ (hodnotu volíme z rozmezí 5 až 15 mm) a příčná rozteč mezi trubkami je potom:

$$s_1^{VV} = D_z^{VV} + a^{VV} = 91 + 12 = 103 \text{ mm}$$

Při návrhu počtu trubek se vychází z upraveného vzorce (3-5):

$$n_{tr}^{VV} = \frac{\check{s}}{s_1^{VV}} - \frac{1}{2} = \frac{4,58}{0,103} - \frac{1}{2} = 43,966$$

Byl zvolen počet trubek v podélné řadě $n_{tr}^{VV} = 44$.

4.3.3 Výpočet objemového průtoku a rychlosti spalín ve VV

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

$$t_{DN} = 283,38^\circ C$$

Střední teplota proudu spalín pro VV se vypočte jako aritmetický průměr hodnot v bodech C a D:

$$t_{SP}^{VV} = \frac{t_C + t_{DN}}{2} = \frac{479,36 + 283,38}{2} = 381,37^\circ C$$

Výpočet skutečného objemového průtoku spalín ve VV dosazením do vzorce (3-4):

$$M_{SPOsk}^{VV} = M_{SPO} \cdot \frac{t_{SP}^{VV} + 273,15}{273,15} = 108,264 \cdot \frac{381,37 + 273,15}{273,15} = 259,423 m^3 \cdot s^{-1}$$

Výpočet průtočné plochy spalín pro VV dosazením do vzorce (3-6):

$$S_{SP-PR}^{VV} = l \cdot \check{s} - l \cdot D^{VV} \cdot n_{tr}^{VV} - 2 \cdot h_{\check{z}}^{VV} \cdot t_{\check{z}} \cdot n_{\check{z}}^{VV} \cdot n_{tr}^{VV} \cdot l =$$

$$= 11,88 \cdot 4,58 - 11,88 \cdot 0,057 \cdot 44 - 2 \cdot 0,017 \cdot 0,001 \cdot 200 \cdot 44 \cdot 11,88 = 21,061 m^2$$

Výpočet skutečné rychlosti spalín ve VV dosazením do vzorce (3-7):

$$w_{SP}^{VV} = \frac{M_{SPOsk}^{VV}}{S_{SP-PR}^{VV}} = \frac{259,423}{21,061} = 12,318 m \cdot s^{-1}$$

4.3.4 Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalín VV

Součinitel přestupu tepla ze strany spalín bude vypočítán ze vzorce (4-9).

4.3.4.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí

Podélná rozteč mezi trubkami byla zvolena $s_2^{VV} = 117 mm$ a přeponu s'^{VV} (viz obr. 4.9) potom lze vypočítat ze vzorce:

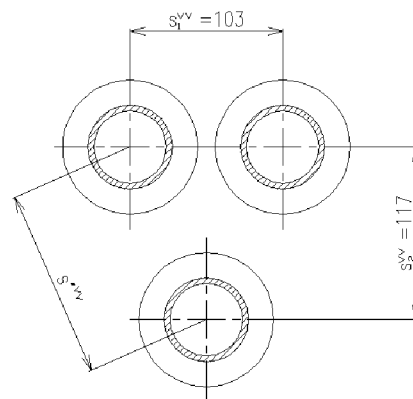
$$s'^{VV} = \sqrt{\left(\frac{s_1^{VV}}{2}\right)^2 + (s_2^{VV})^2} = \sqrt{\left(\frac{103}{2}\right)^2 + 117^2} = 127,833 mm$$

Nejdříve je nutno vypočítat poměrné podélné rozteče:

- $\sigma_1^{VV} = \frac{s_1^{VV}}{D^{VV}} = \frac{103}{57} = 1,807,$
- $\sigma_2^{VV} = \frac{s'^{VV}}{D^{VV}} = \frac{127,833}{57} = 2,243.$

Tyto budou dosazeny do vzorce (4-14) pro výpočet poměrných podélných roztečů:

$$\phi_{\sigma}^{VV} = \frac{\sigma_1^{VV} - 1}{\sigma_2^{VV} - 1} = \frac{1,807 - 1}{2,243 - 1} = 0,649$$



Obr. 4.9. Rozteče trubek VV

Součinitel opravy na počet podélných řad lze určit z [1], obr. 8.4 na str. 116. Je zde předpokládán počet podélných řad větší než 10, a proto je volena hodnota:

$$c_Z^{VV} = 1$$

Součinitele tepelné vodivosti spalín a součinitele kinematické viskozity spalín lze určit interpolací z [1], tab. 3-3 na str. 24 pro danou střední teplotu spalín $t_{sp}^{vv} = 381,37^\circ C$ a objemový podíl vodní páry ve spalínách 9,7%:

- $\lambda_{sp}^{vv} = 0,055 \cdot W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$,
- $\nu_{sp}^{vv} = 5,768 \cdot 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}$.

Součinitel přestupu tepla konvekcí je nyní možno spočítat dosazením do vzorce (4-13):

$$\begin{aligned} \alpha_K^{vv} &= 0,23 \cdot c_z^{vv} \cdot (\varphi_\sigma^{vv})^{0,2} \cdot \frac{\lambda_{sp}^{vv}}{s_z^{vv}} \cdot \left(\frac{D^{vv}}{s_z^{vv}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_z^{vv}}{s_z^{vv}}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{w_{sp}^{vv} \cdot s_z^{vv}}{\nu_{sp}^{vv}}\right)^{0,65} = \\ &= 0,23 \cdot 1 \cdot 0,649^{0,2} \cdot \frac{0,055}{5 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{0,057}{5 \cdot 10^{-3}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,017}{5 \cdot 10^{-3}}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{12,318 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{5,768 \cdot 10^{-5}}\right)^{0,65} = \\ &= 48,88 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \end{aligned}$$

4.3.4.2 Součinitel efektivnosti žebber

Pro zjištění součinitele efektivnosti žebber je nutno spočítat součinitel β ze vzorce (4-10):

$$\beta^{vv} = \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_z \cdot \alpha_K^{vv}}{t_z \cdot \lambda_z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_z \cdot \alpha_K^{vv})}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 48,88}{0,001 \cdot 40 \cdot (1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 48,88)}} = 43,795 m^{-1}$$

Hodnotu součinitele E nyní lze zjistit z [1], grafu na str. 114 pomocí součinu $\beta \cdot h_z^{vv}$ a poměru

$$\frac{D_z^{vv}}{D^{vv}} :$$

- $\beta \cdot h_z^{vv} = 43,795 \cdot 0,017 = 0,745$,
- $\frac{D_z^{vv}}{D^{vv}} = \frac{91}{57} = 1,596$.

Z grafu byla odečtena hodnota:

$$E^{vv} = 0,81$$

4.3.4.3 Podíly teplosměnných ploch žebber a celkové plochy ze strany spalín

Podíl výhřevných ploch žebber a celkové plochy ze strany spalín pro kruhové trubky s kruhovými žebry se vypočítá ze vzorce (4-11):

$$\frac{S_z^{vv}}{S^{vv}} = \frac{\left(\frac{D_z^{vv}}{D^{vv}}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_z^{vv}}{D^{vv}}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left[\left(\frac{s_z^{vv}}{D^{vv}}\right) - \left(\frac{t_z}{D^{vv}}\right)\right]} = \frac{\left(\frac{91}{57}\right)^2 - 1}{\left(\frac{91}{57}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left[\left(\frac{5}{57}\right) - \left(\frac{1}{57}\right)\right]} = 0,917$$

Podíl volných částí trubky, kde nejsou žebra a celkové plochy na straně spalín se vypočítá ze vzorce (4-12):

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

4.3.4.4 Součinitel přestupu tepla ze strany spalín

Nyní lze vypočtené hodnoty dosadit do vzorce (4-9) a určit hodnotu α_r :

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

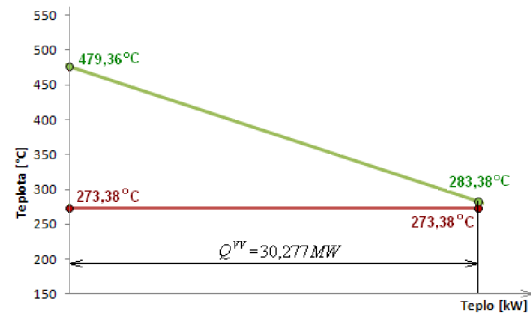
$$= (0,917 \cdot 0,81 \cdot 1 + 0,083) \cdot \frac{0,85 \cdot 48,88}{1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 48,88} = 31,677 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

4.3.5 Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu VV

Součinitel prostupu tepla se vypočítá dosazením do (4-7), avšak jelikož se předpokládá vysoká hodnota α_{2r}^{VV} , tak lze celý člen přibližně uvažovat

$\frac{1}{\alpha_{2r}^{VV}} = 0$, a potom platí:

$$K^{VV} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1r}^{VV}} + \varepsilon} = \frac{1}{\frac{1}{31,677} + 0,002} = 29,79 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$



Obr. 4.10. Logaritmický teplotní spád VV

Výpočet logaritmického teplotního spádu dosazením do (4-6):

- $\Delta t_1^{VV} = t_C - t_{4V} = 479,36 - 273,38 = 205,982^\circ C$
- $\Delta t_2^{VV} = t_{DN} - t_{5V} = 283,38 - 273,38 = 10^\circ C$

$$\Delta t_{\ln}^{VV} = \frac{\Delta t_2^{VV} - \Delta t_1^{VV}}{\ln\left(\frac{\Delta t_2^{VV}}{\Delta t_1^{VV}}\right)} = \frac{205,982 - 10}{\ln\left(\frac{205,982}{10}\right)} = 64,783^\circ C$$

4.3.6 Volba počtu podélných řad VV

Výpočet celkové teplosměnné plochy ze strany spalín dosazením do (4-5):

$$S_{SP}^{VV} = \frac{Q^{VV}}{K^{VV} \cdot \Delta t_{\ln}^{VV}} = \frac{30277}{29,79 \cdot 64,783} = 15690 m^2$$

Výpočet teplosměnné plochy ze strany spalín na 1m délky trubky dosazením do (4-3):

$$S_{SP-1m}^{VV} = \pi \cdot D^{VV} + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{(D_{\dot{z}}^{VV})^2 - (D^{VV})^2}{4} \right) \cdot n_{\dot{z}}^{VV} = \pi \cdot 0,057 + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,091^2 - 0,057^2}{4} \right) \cdot 200 = 1,76m$$

Výpočet plochy ze strany spalín na jednu řadu dosazením do (4-2):

$$S_{SP-1r}^{VV} = S_{SP-1m}^{VV} \cdot l \cdot n_r^{VV} = 1,76 \cdot 11,88 \cdot 44 = 919,945 m^2$$

Počet podélných řad pak lze určit dosazením do vzorce (4-1):

$$n_R^{VV} = \frac{S_{SP}^{VV}}{S_{SP-1r}^{VV}} = \frac{15690}{919,945} = 17,054$$

Hodnotu je potřeba zaokrouhlit na celé číslo:

$$n_R^{VV} = 17$$

4.3.7 Výpočet skutečného předaného tepla ve VV

Skutečná teplosměnná plocha ze strany spalín při zvoleném počtu řad:

$$S_{SPsk}^{VV} = S_{SP-1r}^{VV} \cdot n_R^{VV} = 919,945 \cdot 17 = 15639,065 m^2$$

Skutečné předané teplo:

$$Q_{sk}^{VV} = K^{VV} \cdot S_{SPsk}^{VV} \cdot \Delta t_{ln}^{VV} = 29,79 \cdot 15639,065 \cdot 64,783 = 30,18 MW$$

Původně navržená hodnota předaného tepla byla:

$$Q^{VV} = 30,277 MW$$

Kontrolu, zda rozdíl mezi navrženým a skutečným předaným teplem vychází menší než 5 %, lze provést následujícím vztahem:

$$x_Q^{VV} = \left| 5 \cdot \frac{Q_{sk}^{VV} - Q^{VV}}{Q_{sk}^{VV} \cdot 0,05} \right| = \left| 5 \cdot \frac{30,18 - 30,277}{30,18 \cdot 0,05} \right| = 0,32\%$$

Jelikož rozdíl vychází 0,32%, zvolený počet řad $n_R^{VV} = 17$ vyhovuje.

4.3.8 Výpočet skutečné teploty spalín v bodě D

Výpočet skutečné entalpie spalín v bodě D:

$$I_{SPD} = I_{SPC} - \frac{Q_{sk}^{VV}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 665,8 - \frac{30180}{108,264 \cdot (1 - 0,003)} = 386,2 kJ$$

Z nové hodnoty entalpie lze nyní určit skutečnou teplotu v bodě D:

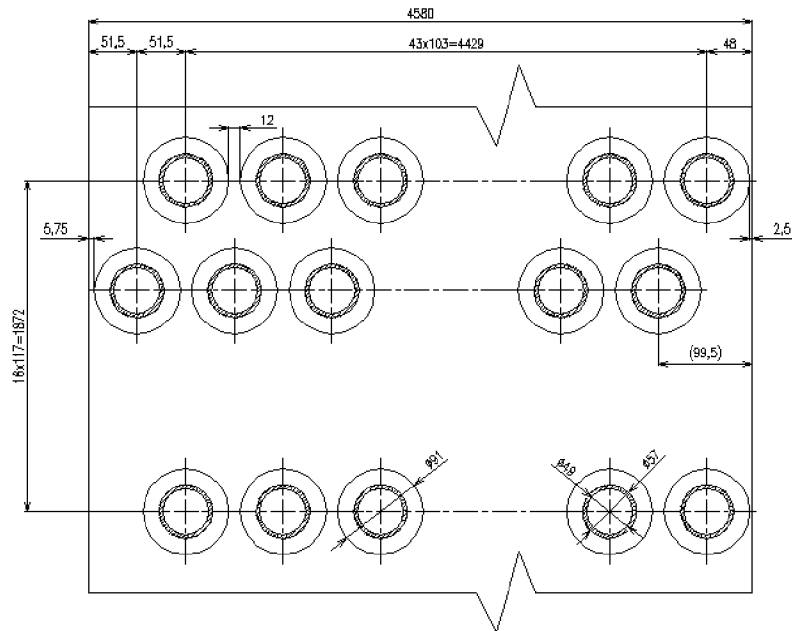
$$t_D = \frac{(I_{SPD} - I_{SP200}) \cdot 100}{I_{SP300} - I_{SP200}} + 200 = \frac{(386,2 - 268,9) \cdot 100}{407,4 - 268,9} + 200 = 284,636^\circ C$$

4.3.9 Přehled vypočtených hodnot a nákres VV

Hodnoty vypočtené v této kapitole jsou pro přehled uvedeny v tab. 4.9.

Tab. 4.9. Přehled vypočtených hodnot pro VV

Veličina	Značení	Hodnota
Počet trubek VV v jedné podélné řadě	n_{tr}^{VV}	44
Počet podélných řad trubek VV	n_R^{VV}	17
Příčná rozteč mezi trubkami VV	s_1^{VV}	103mm
Podélná rozteč mezi trubkami VV	s_2^{VV}	117mm
Rychlost proudění spalín v kanále	w_{SP}^{VV}	$12,318 m \cdot s^{-1}$
Skutečné předané teplo ve VV	Q_{sk}^{VV}	30,18MW
Skutečná teplota spalín v bodě D	t_D	284,636°C

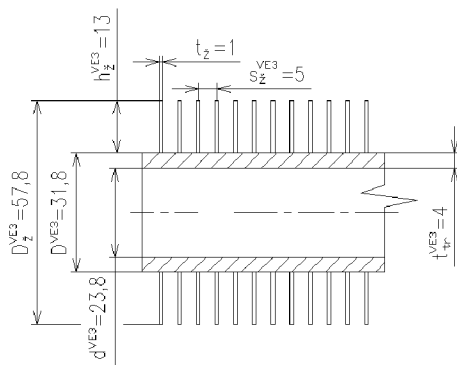


Obr. 4.11. Náskres trubek VV ve spalínovém kanále

4.4 Návrh třetího stupně vysokotlakého ekonomizéru (VE3)

4.4.1 Vstupní parametry a návrh rozměrů trubek VE3

Náskres a rozměry trubek VE3 jsou uvedeny na obr. 4.12 a v tab. 4.10, vstupní parametry pro výpočet VE3, vypočtené v předchozích kapitolách, jsou uvedeny v tab. 4.11.



Obr. 4.12. Rozměry trubek VE3

Tab. 4.10. Zvolené rozměry trubek VE3

Rozměr trubky	Značení	Hodnota
Vnější průměr trubky	D^{VE3}	31,8 mm
Tloušťka trubky	t_{tr}^{VE3}	4 mm
Vnitřní průměr trubky	d^{VE3}	23,8 mm
Tloušťka žebry	t_z	1 mm
Počet žebry na 1m délky trubky	n_z^{VE3}	200 m^{-1}
Rozteč mezi žebry	s_z^{VE3}	5mm
Výška žebry	h_z^{VE3}	13 mm
Průměr žebry	D_z^{VE3}	57,8 mm

Tab. 4.11. Parametry potřebné pro návrh VE3

Veličina	Značení	Hodnota
Hmotnostní průtok páry vysokotlakým okruhem	M_{PV}	$19,797 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Teplo předané ve VE3	Q^{VE3}	$9,53 \text{ MW}$
Entalpie spalín v bodě D pilového diagramu	I_{SPD}	$386,2 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Entalpie spalín pro 200°C	I_{SP200}	$268,9 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Entalpie spalín pro 300°C	I_{SP300}	$407,4 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Teplota spalín v bodě D pilového diagramu	t_D	$284,636^\circ \text{ C}$
Teplota páry v bodě 6V pilového diagramu	t_{6V}	$268,38^\circ \text{ C}$
Teplota vody v bodě 7V pilového diagramu	t_{7V}	158° C
Měrný objem vody v bodě 6V pilového diagramu	v_{6V}	$0,0012974 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Měrný objem vody v bodě 7V pilového diagramu	v_{7V}	$0,0010959 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

4.4.2 Počet trubek v jedné podélné řadě VE3

Mezera mezi trubkami (obr. 3.2) pro výpočet podélné rozteče byla zvolena $a^{VE3} = 9 \text{ mm}$ (hodnotu volíme z rozmezí 5 až 15 mm) a příčná rozteč mezi trubkami je potom:

$$s_1^{VE3} = D_z^{VE3} + a^{VE3} = 57,8 + 9 = 66,8 \text{ mm}$$

Při návrhu počtu trubek se vychází z upraveného vzorce (3-5):

$$n_{ir}^{VE3} = \frac{\check{s}}{s_1^{VE3}} - \frac{1}{2} = \frac{4,58}{0,0668} - \frac{1}{2} = 68,063$$

Byl zvolen počet trubek v podélné řadě $n_{ir}^{VE3} = 68$.

Střední měrný objem vody ve VE3 se vypočte jako průměr hodnot v bodech 6V a 7V:

$$v_p^{VE3} = \frac{v_{6V} + v_{7V}}{2} = \frac{0,0012974 + 0,0010959}{2} = 0,00119665 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

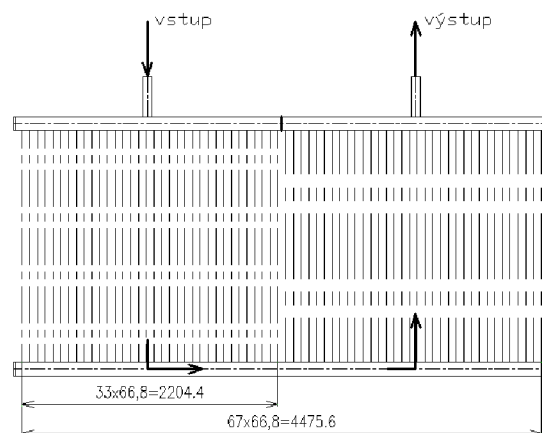
Pro zvolený počet trubek v podélné řadě je nutno zkontrolovat dosazením do vztahu (3-3), jestli vychází rychlost proudění v přípustných mezích pro VE3, tedy $1 \div 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$:

$$w_p^{VE3} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot v_p^{VE3}}{\pi \cdot (d^{VE3})^2 \cdot n_{ir}^{VE3}} =$$

$$= \frac{4 \cdot 0,95 \cdot 19,797 \cdot 0,00119665}{\pi \cdot 0,0238^2 \cdot 68} = 0,744 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost proudění při zvoleném počtu trubek je příliš nízká, proto bude rozváděcí kanál rozdělen na dvě části, kde tekutina proudí střídavě, čímž se rychlost proudění zdvojnásobí:

$$w_p^{VE3} = 2 \cdot 0,744 = 1,488 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$



Obr. 4.13. Rozdělený rozváděcí kanál VE3

4.4.3 Výpočet objemového průtoku a rychlosti spalín ve VE3

Výpočet entalpie spalín v bodě E:

$$I_{SPE} = I_{SPD} - \frac{Q^{VE3}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 386,2 - \frac{9530}{108,264 \cdot (1 - 0,003)} = 297,9 \text{ kJ}$$

Teplota v bodě E pilového diagramu se vypočte interpolací z hodnot entalpií pro teploty 100 až 600°C (viz tab. 2.3) a z vypočtené entalpie v bodě E (jedná se zatím o návrhovou teplotu):

$$t_{EN} = \frac{(I_{SPE} - I_{SP200}) \cdot 100}{I_{SP300} - I_{SP200}} + 200 = \frac{(297,9 - 268,9) \cdot 100}{407,4 - 268,9} + 200 = 220,9^\circ \text{ C}$$

Střední teplota proudu spalín pro VE3 se vypočte jako aritmetický průměr hodnot v bodech D a E:

$$t_{SP}^{VE3} = \frac{t_D + t_{EN}}{2} = \frac{284,636 + 220,9}{2} = 252,77^\circ \text{ C}$$

Výpočet skutečného objemového průtoku spalín ve VE3 dosazením do vzorce (3-4):

$$M_{SPOsk}^{VE3} = M_{SPO} \cdot \frac{t_{SP}^{VE3} + 273,15}{273,15} = 108,264 \cdot \frac{252,77 + 273,15}{273,15} = 208,45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Výpočet průtočné plochy spalín pro VE3 dosazením do vzorce (3-6):

$$S_{SP-PR}^{VE3} = l \cdot \check{s} - l \cdot D^{VE3} \cdot n_{tr}^{VE3} - 2 \cdot h_{\check{z}}^{VE3} \cdot t_{\check{z}} \cdot n_{\check{z}}^{VE3} \cdot n_{tr}^{VE3} \cdot l =$$

$$= 11,88 \cdot 4,58 - 11,88 \cdot 0,0318 \cdot 68 - 2 \cdot 0,013 \cdot 0,001 \cdot 200 \cdot 68 \cdot 11,88 = 24,52 \text{ m}^2$$

Výpočet skutečné rychlosti spalín ve VE3 dosazením do vzorce (3-7):

$$w_{SP}^{VE3} = \frac{M_{SPOsk}^{VE3}}{S_{SP-PR}^{VE3}} = \frac{208,45}{24,52} = 8,501 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

4.4.4 Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalín VE3

Součinitel přestupu tepla ze strany spalín bude vypočítán ze vzorce (4-9).

4.4.4.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí

Podélná rozteč mezi trubkami byla zvolena $s_2^{VE3} = 92 \text{ mm}$ a přeponu s'^{VE3} (viz obr. 4.14) potom lze vypočítat ze vzorce:

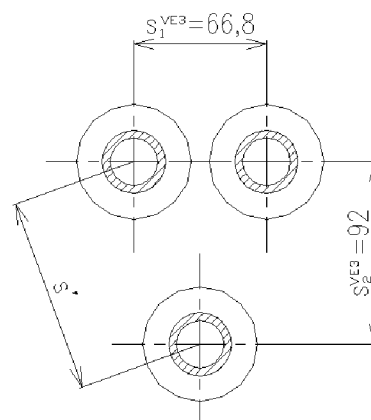
$$s'^{VE3} = \sqrt{\left(\frac{s_1^{VE3}}{2}\right)^2 + (s_2^{VE3})^2} = \sqrt{\left(\frac{66,8}{2}\right)^2 + 92^2} = 97,875 \text{ mm}$$

Nejdříve je nutno vypočítat poměrné podélné rozteče:

- $\sigma_1^{VE3} = \frac{s_1^{VE3}}{D^{VE3}} = \frac{66,8}{31,8} = 2,101,$
- $\sigma_2'^{VE3} = \frac{s'^{VE3}}{D^{VE3}} = \frac{97,875}{31,8} = 3,078.$

Tyto budou dosazeny do vzorce (4-14) pro výpočet poměrných podélných roztečů:

$$\varphi_{\sigma}^{VE3} = \frac{\sigma_1^{VE3} - 1}{\sigma_2'^{VE3} - 1} = \frac{2,101 - 1}{3,078 - 1} = 0,53$$



Obr. 4.14. Rozteče trubek

Součinitel opravy na počet podélných řad lze určit z [1], obr. 8.4 na str. 116. Je zde předpokládán počet podélných řad větší než 10, a proto je volena hodnota:

$$c_Z^{VE3} = 1$$

Součinitele tepelné vodivosti spalín a součinitele kinematické viskozity spalín lze určit interpolací z [1], tab. 3-3 na str. 24 pro danou střední teplotu spalín $t_{SP}^{VE3} = 252,77^\circ C$ a objemový podíl vodní páry ve spalínách 9,7%:

- $\lambda_{SP}^{VE3} = 0,044 \cdot W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$,
- $\nu_{SP}^{VE3} = 3,966 \cdot 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}$.

Součinitel přestupu tepla konvekcí je nyní možno spočítat dosazením do vzorce (4-13):

$$\begin{aligned} \alpha_K^{VE3} &= 0,23 \cdot c_Z^{VE3} \cdot (\phi_\sigma^{VE3})^{0,2} \cdot \frac{\lambda_{SP}^{VE3}}{s_Z^{VE3}} \cdot \left(\frac{D_Z^{VE3}}{s_Z^{VE3}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_Z^{VE3}}{s_Z^{VE3}}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{w_{SP}^{VE3} \cdot s_Z^{VE3}}{\nu_{SP}^{VE3}}\right)^{0,65} = \\ &= 0,23 \cdot 1 \cdot 0,53^{0,2} \cdot \frac{0,044}{5 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{0,0318}{5 \cdot 10^{-3}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,013}{5 \cdot 10^{-3}}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{8,501 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{3,966 \cdot 10^{-5}}\right)^{0,65} = \\ &= 53,751 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \end{aligned}$$

4.4.4.2 Součinitel efektivnosti žeber

Pro zjištění součinitele efektivnosti žeber je nutno spočítat součinitel β ze vzorce (4-10):

$$\beta^{VE3} = \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_Z \cdot \alpha_K^{VE3}}{t_Z \cdot \lambda_Z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_Z \cdot \alpha_K^{VE3})}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 53,751}{0,001 \cdot 40 \cdot (1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 53,751)}} = 45,751 m^{-1}$$

Hodnotu součinitele E nyní lze zjistit z [1], grafu na str. 114 pomocí součinu $\beta \cdot h_Z^{VE3}$ a poměru

$$\frac{D_Z^{VE3}}{D^{VE3}} :$$

- $\beta^{VE3} \cdot h_Z^{VE3} = 45,751 \cdot 0,013 = 0,595$,
- $\frac{D_Z^{VE3}}{D^{VE3}} = \frac{57,8}{31,8} = 1,818$.

Z grafu byla odečtena hodnota:

$$E^{VE3} = 0,87$$

4.4.4.3 Podíly teplosměnných ploch žeber a celkové plochy ze strany spalín

Podíl výhřevných ploch žeber a celkové plochy ze strany spalín pro kruhové trubky s kruhovými žebry se vypočítá ze vzorce (4-11):

$$\frac{S_Z^{VE3}}{S^{VE3}} = \frac{\left(\frac{D_Z^{VE3}}{D^{VE3}}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_Z^{VE3}}{D^{VE3}}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left[\left(\frac{S_Z^{VE3}}{D^{VE3}}\right) - \left(\frac{t_Z}{D^{VE3}}\right)\right]} = \frac{\left(\frac{57,8}{31,8}\right)^2 - 1}{\left(\frac{57,8}{31,8}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left[\left(\frac{5}{31,8}\right) - \left(\frac{1}{31,8}\right)\right]} = 0,902$$

Podíl volných částí trubky, kde nejsou žebra a celkové plochy na straně spalín se vypočítá ze vzorce (4-12):

$$\frac{S_h^{VE3}}{S^{VE3}} = 1 - \frac{S_Z^{VE3}}{S^{VE3}} = 1 - 0,902 = 0,098$$

4.4.4 Součinitel přestupu tepla ze strany spalín

Nyní lze vypočtené hodnoty dosadit do vzorce (4-9) a určit hodnotu α_r :

$$\alpha_{1r}^{VE3} = \left(\frac{S_{\dot{z}}^{VE3}}{S^{VE3}} \cdot E^{VE3} \cdot \mu + \frac{S_h^{VE3}}{S^{VE3}} \right) \cdot \frac{\psi_{\dot{z}} \cdot \alpha_K^{VE3}}{1 + \varepsilon \cdot \psi_{\dot{z}} \cdot \alpha_K^{VE3}} =$$

$$= (0,902 \cdot 0,87 \cdot 1 + 0,098) \cdot \frac{0,85 \cdot 53,751}{1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 53,751} = 36,957 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

4.4.5 Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu VE3

Součinitel prostupu tepla se vypočítá dosazením do (4-7), avšak jelikož se předpokládá vysoká hodnota

α_{2r}^{VE3} , tak lze celý člen přibližně uvažovat $\frac{1}{\alpha_{2r}^{VE3}} = 0$, a

potom platí:

$$K^{VE3} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1r}^{VE3}} + \varepsilon} = \frac{1}{\frac{1}{36,957} + 0,002} = 34,413 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

Výpočet logaritmického teplotního spádu dosazením do (4-6):

- $\Delta t_1^{VE3} = t_D - t_{6V} = 284,636 - 268,38 = 16,256^\circ C$
- $\Delta t_2^{VE3} = t_{EN} - t_{7V} = 220,9 - 158 = 62,9^\circ C$

$$\Delta t_{\ln}^{VE3} = \frac{\Delta t_2^{VE3} - \Delta t_1^{VE3}}{\ln\left(\frac{\Delta t_2^{VE3}}{\Delta t_1^{VE3}}\right)} = \frac{62,9 - 16,256}{\ln\left(\frac{62,9}{16,256}\right)} = 34,472^\circ C$$

4.4.6 Volba počtu podélných řad VE3

Výpočet celkové teplosměnné plochy ze strany spalín dosazením do (4-5):

$$S_{SP}^{VE3} = \frac{Q^{VE3}}{K^{VE3} \cdot \Delta t_{\ln}^{VE3}} = \frac{9530}{34,413 \cdot 34,472} = 8033 m^2$$

Výpočet teplosměnné plochy ze strany spalín na 1m délky trubky dosazením do (4-3):

$$S_{SP-1m}^{VE3} = \pi \cdot D^{VE3} + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{(D_{\dot{z}}^{VE3})^2 - (D^{VE3})^2}{4} \right) \cdot n_{\dot{z}}^{VE3} = \pi \cdot 0,0318 + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,0578^2 - 0,0318^2}{4} \right) \cdot 200 = 0,832 m$$

Výpočet plochy ze strany spalín na jednu řadu dosazením do (4-2):

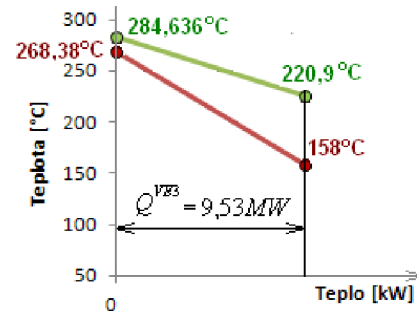
$$S_{SP-1r}^{VE3} = S_{SP-1m}^{VE3} \cdot l \cdot n_{tr}^{VE3} = 0,832 \cdot 11,88 \cdot 68 = 671,936 m^2$$

Počet podélných řad pak lze určit dosazením do vzorce (4-1):

$$n_R^{VE3} = \frac{S_{SP}^{VE3}}{S_{SP-1r}^{VE3}} = \frac{8033}{671,936} = 11,955$$

Hodnotu je potřeba zaokrouhlit na celé číslo:

$$n_R^{VE3} = 12$$



Obr. 4.15. Logaritmický teplotní spád VE3

4.4.7 Výpočet skutečného předaného tepla ve VE3

Skutečná teplosměnná plocha ze strany spalín při zvoleném počtu řad:

$$S_{SPsk}^{VE3} = S_{SP-1r}^{VE3} \cdot n_R^{VE3} = 671,936 \cdot 12 = 8063,2m^2$$

Skutečné předané teplo:

$$Q_{sk}^{VE3} = K^{VE3} \cdot S_{SPsk}^{VE3} \cdot \Delta t_{ln}^{VE3} = 34,413 \cdot 8063,2 \cdot 34,472 = 9,565MW$$

Původně navržená hodnota předaného tepla byla:

$$Q^{VE3} = 9,53MW$$

Kontrolu, zda rozdíl mezi navrženým a skutečným předaným teplem vychází menší než 5 %, lze provést následujícím vztahem:

$$x_Q^{VE3} = \left| 5 \cdot \frac{Q_{sk}^{VE3} - Q^{VE3}}{Q_{sk}^{VE3} \cdot 0,05} \right| = \left| 5 \cdot \frac{9,565 - 9,53}{9,565 \cdot 0,05} \right| = 0,376\%$$

Jelikož rozdíl vychází 0,376%, zvolený počet řad $n_R^{VE3} = 12$ vyhovuje.

4.4.8 Výpočet skutečné teploty spalín v bodě E

Výpočet skutečné entalpie spalín v bodě E:

$$I_{SPE} = I_{SPD} - \frac{Q_{sk}^{VE3}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 386,2 - \frac{9565}{108,264 \cdot (1 - 0,003)} = 297,5kJ$$

Z nové hodnoty entalpie lze nyní určit skutečnou teplotu v bodě E:

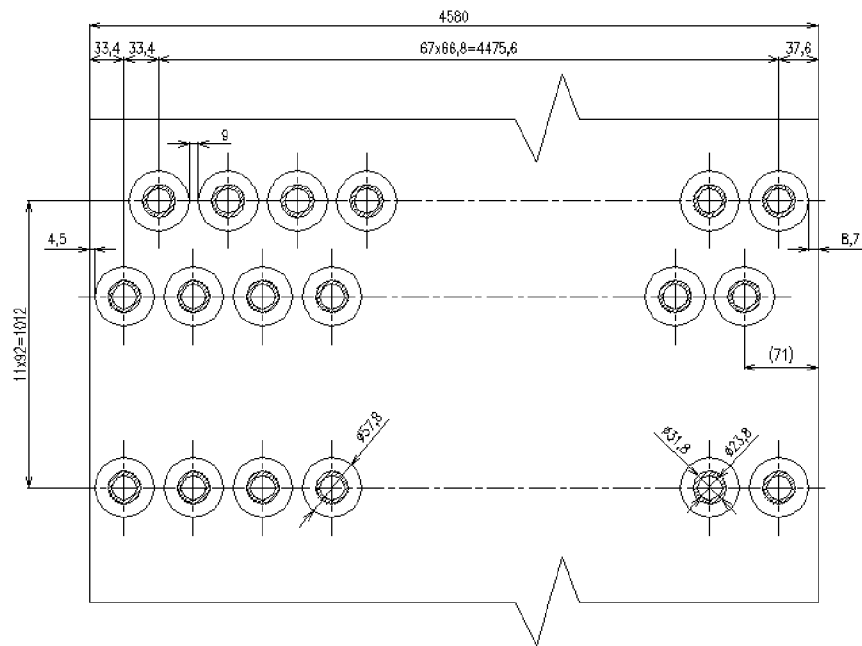
$$t_E = \frac{(I_{SPE} - I_{SP200}) \cdot 100}{I_{SP300} - I_{SP200}} + 200 = \frac{(297,5 - 268,9) \cdot 100}{407,4 - 268,9} + 200 = 220,66^\circ C$$

4.4.9 Přehled vypočtených hodnot a nákras VE3

Hodnoty vypočtené v této kapitole jsou pro přehled uvedeny v tab. 4.12.

Tab. 4.12. Přehled vypočtených hodnot pro VE3

Veličina	Značení	Hodnota
Počet trubek VE3 v jedné podélné řadě	n_{tr}^{VE3}	68
Počet podélných řad trubek VE3	n_R^{VE3}	12
Příčná rozteč mezi trubkami VE3	s_1^{VE3}	66,8mm
Podélná rozteč mezi trubkami VE3	s_2^{VE3}	92mm
Rychlost proudění spalín v kanále	w_{SP}^{VE3}	8,501m · s ⁻¹
Rychlost proudění vody v trubkách VE3	w_P^{VE3}	1,488m · s ⁻¹
Skutečné předané teplo ve VE3	Q_{sk}^{VE3}	9,565MW
Skutečná teplota spalín v bodě E	t_E	220,66° C



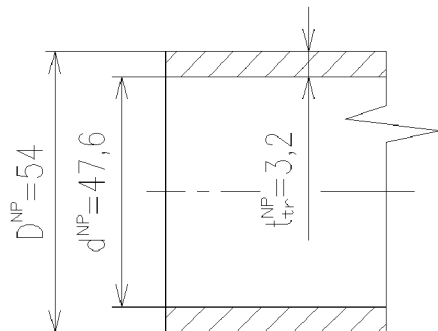
Obr. 4.16. Náčres trubek VE3 ve spalínovém kanále

4.5 Návrh nízkotlakého přehříváku (NP)

Jelikož se na tomto přehříváku předává jen malé množství tepla, bylo by zbytečné zde navrhovat žebrované trubky, a tak bude výpočet spočívat v návrhu rozměrů hladkých trubek.

4.5.1 Vstupní parametry a návrh rozměrů trubek NP

Náčres a rozměry trubek NP jsou uvedeny na obr. 4.17 a v tab. 4.13, vstupní parametry pro výpočet NP, vypočtené v předchozích kapitolách, jsou uvedeny v tab. 4.14.



Obr. 4.17. Rozměry trubek NP

Tab. 4.13. Zvolené rozměry trubek VPI

Rozměr trubky	Značení	Hodnota
Vnější průměr trubky	D^{NP}	54 mm
Tloušťka trubky	t_{tr}^{NP}	3,2 mm
Vnitřní průměr trubky	d^{NP}	47,6 mm

Tab. 4.14. Parametry potřebné pro návrh NP

Veličina	Značení	Hodnota
Hmotnostní průtok páry nízkotlakým okruhem	M_{PN}	$3,272 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Teplo předané ve NP	Q^{NP}	$0,09271 \text{ MW}$
Entalpie spalín v bodě E pilového diagramu	I_{SPE}	$297,5 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Entalpie spalín pro 200°C	I_{SP200}	$268,9 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Entalpie spalín pro 300°C	I_{SP300}	$407,4 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Teplota spalín v bodě E pilového diagramu	t_E	$220,66^\circ \text{ C}$
Teplota páry v bodě 1N pilového diagramu	t_{1N}	169° C
Teplota páry v bodě 2N pilového diagramu	t_{2N}	162° C
Měrný objem páry v bodě 1N pilového diagramu	v_{1N}	$0,3932049 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 2N pilového diagramu	v_{2N}	$0,2923977 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Tlak páry v bodě 1N pilového diagramu	p_{1N}	$0,5 \text{ MPa}$
Tlak páry v bodě 2N pilového diagramu	p_{2N}	$0,65 \text{ MPa}$

4.5.2 Počet trubek v jedné podélné řadě NP

Hodnota příčné rozteče mezi trubkami byla zvolena pro dosažení takového počtu trubek v jedné podélné řadě, aby byla dodržena doporučená rychlost páry a hodnota tepla:

$$s_1^{NP} = 141 \text{ mm}$$

Při návrhu počtu trubek se vychází z upraveného vzorce (3-5):

$$n_{tr}^{NP} = \frac{\check{s}}{s_1^{NP}} - \frac{1}{2} = \frac{4,58}{0,141} - \frac{1}{2} = 31,982$$

Střední měrný objem páry v NP se vypočte jako aritmetický průměr hodnot v bodech 1N a 2N:

$$v_p^{NP} = \frac{v_{1N} + v_{2N}}{2} = \frac{0,3932049 + 0,2923977}{2} = 0,343 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Byl zvolen počet trubek v podélné řadě $n_{tr}^{NP} = 32$.

Pro zvolený počet trubek v podélné řadě je nutno zkontrolovat dosazením do vztahu (3-3), jestli vychází rychlost proudění v přípustných mezích pro NP, tedy $15 \div 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$:

$$w_p^{NP} = \frac{4 \cdot M_{PN} \cdot v_p^{NP}}{\pi \cdot (d^{NP})^2 \cdot n_{tr}^{NP}} = \frac{4 \cdot 3,272 \cdot 0,343}{\pi \cdot 0,0476^2 \cdot 32} = 19,696 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost proudění při zvoleném počtu trubek vyhovuje.

4.5.3 Výpočet objemového průtoku a rychlosti spalín v NP

Výpočet entalpie spalín v bodě F:

$$I_{SPF} = I_{SPE} - \frac{Q^{NP}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_S)} = 297,5 - \frac{92,71}{108,264 \cdot (1 - 0,003)} = 296,64 \text{ kJ}$$

Teplota v bodě E pilového diagramu se vypočte interpolací z hodnot entalpií pro teploty 100 až 600°C (viz tab. 2.3) a z vypočtené entalpie v bodě E (jedná se zatím o návrhovou teplotu):

$$t_{FN} = \frac{(I_{SPF} - I_{SP200}) \cdot 100}{I_{SP300} - I_{SP200}} + 200 = \frac{(296,64 - 268,9) \cdot 100}{407,4 - 268,9} + 200 = 220,038^\circ \text{C}$$

Střední teplota proudu spalin pro NP se vypočte jako aritmetický průměr hodnot v bodech E a F:

$$t_{SP}^{NP} = \frac{t_E + t_{FN}}{2} = \frac{220,66 + 220,038}{2} = 220,349^\circ \text{C}$$

Výpočet skutečného objemového průtoku spalin ve VE3 dosazením do vzorce (3-4):

$$M_{SPOsk}^{NP} = M_{SPO} \cdot \frac{t_{SP}^{NP} + 273,15}{273,15} = 108,264 \cdot \frac{220,349 + 273,15}{273,15} = 195,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Výpočet průtočné plochy spalin pro NV dosazením do vzorce (3-6), avšak u hladkých trubek odpadá poslední součin:

$$S_{SP-PR}^{NP} = l \cdot \xi - l \cdot D^{NP} \cdot n_{ir}^{NP} = 11,88 \cdot 4,58 - 11,88 \cdot 0,054 \cdot 32 = 33,882 \text{ m}^2$$

Výpočet skutečné rychlosti spalin ve NP dosazením do vzorce (3-7):

$$w_{SP}^{NP} = \frac{M_{SPOsk}^{NP}}{S_{SP-PR}^{NP}} = \frac{195,6}{33,882} = 5,773 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

4.5.4 Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalin NP

Součinitele přestupu tepla ze strany spalin vypočteme ze vzorce:

$$\alpha_1 = \xi \cdot (\alpha_K + \alpha_S), \text{ kde:} \quad (4-16)$$

- α_K [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] je součinitel přestupu tepla konvekcí,
- α_S [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] je součinitel přestupu tepla sáláním,
- ξ [-] je součinitel využití.

Součinitel přestupu tepla konvekcí:

$$\alpha_K = c_S \cdot c_Z \cdot \frac{\lambda_{SP}}{D} \cdot \left(\frac{w_{SP} \cdot D}{v_{SP}} \right)^{0,6} \cdot Pr_{SP}, \text{ kde:} \quad (4-17)$$

- c_S [-] je součinitel opravy na uspořádání svazku,
- c_Z [-] je součinitel pro předpokládaný počet podélných řad,
- Pr_{SP} [-] je Prandtlovo číslo spalin.

Součinitel přestupu tepla sáláním:

$$\alpha_S^{NP} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{ST} + 1}{2} \cdot a \cdot (T_{SP})^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_Z}{T_{SP}} \right)^{3,6}}{1 - \frac{T_Z}{T_{SP}}}, \text{ kde:} \quad (4-18)$$

- a_{ST} [-] je stupeň černosti povrchu stěn,
- a [-] je stupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu spalin pro střední teplotu proudu spalin,
- T_{SP} [K] je střední teplota spalin,
- T_Z [K] je teplota zanešeného povrchu stěny.

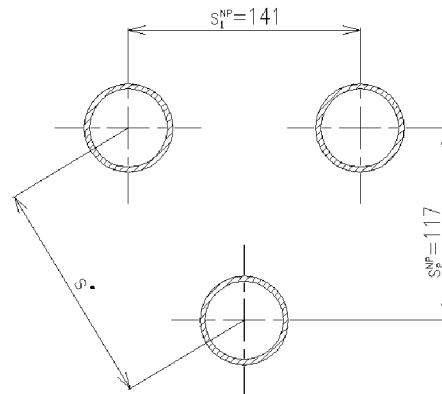
4.5.4.1 Součinitel přestupu tepla konvekce

Podélná rozteč mezi trubkami byla zvolena $s_2^{NP} = 117\text{mm}$ přeponu s'^{NP} (viz obr. 4.18) potom lze vypočítat ze vzorce:

$$s'^{NP} = \sqrt{\left(\frac{s_1^{NP}}{2}\right)^2 + (s_2^{NP})^2} = \sqrt{\left(\frac{141}{2}\right)^2 + 117^2} = 136,6\text{mm}$$

Nejdříve je nutno vypočítat poměrné podélné rozteče:

- $\sigma_1^{NP} = \frac{s_1^{NP}}{D^{NP}} = \frac{141}{54} = 2,611,$
- $\sigma_2'^{NP} = \frac{s'^{NP}}{D^{NP}} = \frac{136,6}{54} = 2,53.$



Obr. 4.18. Rozteče trubek

Tyto budou dosazeny do vzorce (4-14) pro výpočet poměrných podélných roztečí:

$$\varphi_\sigma^{NP} = \frac{\sigma_1^{NP} - 1}{\sigma_2'^{NP} - 1} = \frac{2,611 - 1}{2,53 - 1} = 1,053$$

Pro $\varphi_\sigma^{NP} = 0,1 \div 1,7$ se určí součinitel opravy na uspořádání svazku c_s^{NP} podle poměrné příčné rozteče σ_1^{NP} a součinitele poměrných podélných roztečí φ_σ^{NP} pomocí vztahu:

$$c_s^{NP} = 0,34 \cdot (\varphi_\sigma^{NP})^{0,1} = 0,34 \cdot 1,053^{0,1} = 0,342$$

Pro předpokládaný počet podélných řad $n_{R-pr}^{NP} < 10$ a $\sigma_1^{NP} < 3$ je oprava na počet podélných řad:

$$c_Z^{NP} = 3,12 \cdot (n_{R-pr}^{NP})^{0,05} - 2,5 = 3,12 \cdot 1^{0,05} - 2,5 = 0,62$$

Součinitele tepelné vodivosti spalín, součinitele kinematické viskozity spalín a Prandtlovo číslo spalín lze určit interpolací z [1], tab. 3-3 na str. 24 pro danou střední teplotu spalín $t_{SP}^{NP} = 220,349^\circ\text{C}$ a objemový podíl vodní páry ve spalínách 9,7%:

- $\lambda_{SP}^{NP} = 0,041 \cdot W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1},$
- $\nu_{SP}^{NP} = 3,545 \cdot 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1},$
- $Pr_{SP}^{NP} = 0,666.$

Součinitel přestupu tepla konvekce pro vystřídání uspořádání trubek dosazením do (4-17):

$$\begin{aligned} \alpha_K^{NP} &= c_s^{NP} \cdot c_Z^{NP} \cdot \frac{\lambda_{SP}^{NP}}{D^{NP}} \cdot \left(\frac{w_{SP}^{NP} \cdot D^{NP}}{\nu_{SP}^{NP}} \right)^{0,6} \cdot Pr_{SP}^{NP} = \\ &= 0,342 \cdot 0,62 \cdot \frac{0,041}{0,054} \cdot \left(\frac{5,773 \cdot 0,054}{3,545 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,6} \cdot 0,666 = 33,108 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \end{aligned}$$

4.5.4.2 Součinitel přestupu tepla sáláním

Stupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu spalín pro střední teplotu proudu spalín se vypočítá ze vztahu:

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s}, \text{ kde:} \quad (4-19)$$

- k [$m^{-1} \cdot MPa^{-1}$] je součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny k_{SP} vynásobený objemovou částí tříatomových plynů ve spalínách x_{SP} ,
- p [MPa] je atmosférický tlak, bude počítáno s hodnotou $p = 0,1 MPa$,
- s [mm] je efektivní tloušťka sálové vrstvy.

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny:

$$k_{SP} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot x_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{parc} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{SP} + 273,15}{1000} \right), \text{ kde:} \quad (4-20)$$

- p_{parc} [MPa] je parciální tlak tříatomových plynů spalín v NP.

Efektivní tloušťka sálové vrstvy:

$$s = 0,9 \cdot d \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{d^2} - 1 \right) \quad (4-21)$$

Dosažením hodnot roztečí a vnitřního průměru NP do (4-21) se určí efektivní tloušťka sálové vrstvy pro NP:

$$s^{NP} = 0,9 \cdot d^{NP} \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1^{NP} \cdot s_2^{NP}}{(d^{NP})^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 47,6 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{141 \cdot 117}{47,6^2} - 1 \right) = 354 mm$$

Objemová část tříatomových plynů:

$$x_{SP} = x_{H_2O} + x_{CO_2} = 0,097 + 0,045 = 0,142$$

Parciální tlak tříatomových plynů spalín v NP:

$$p_{parc}^{NP} = p \cdot x_{SP} = 0,1 \cdot 0,142 = 1,42 \cdot 10^{-4} Pa$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny se určí dosažením do (4-20):

$$\begin{aligned} k_{SP}^{NP} &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot x_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{parc}^{NP} \cdot s^{NP}}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_{SP}^{NP} + 273,15}{1000} \right) = \\ &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,097}{3,16 \cdot \sqrt{1,42 \cdot 10^{-2} \cdot 0,354}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{220,349 + 273,15}{1000} \right) = 33,288 m^{-1} \cdot MPa^{-1} \end{aligned}$$

Výpočet součinitele k:

$$k^{NP} = k_{SP}^{NP} \cdot x_{SP} = 33,288 \cdot 0,142 = 4,727 m^{-1} \cdot MPa^{-1}$$

Stupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu spalín dosažením do (4-19):

$$a^{NP} = 1 - e^{-k^{NP} \cdot p \cdot s^{NP}} = 1 - e^{-4,727 \cdot 0,1 \cdot 0,354} = 0,154$$

Stupeň černosti povrchu stěn se při výpočtu uvažuje $a_{ST}^{NP} = 0,8$.

Střední teplota páry t_p^{NP} :

$$t_p^{NP} = \frac{t_{1N} + t_{2N}}{2} = \frac{169 + 162}{2} = 165,5^\circ C$$

Při spalování plynu se pro všechny výhřevné plochy volí $\Delta t = 25^\circ C$ a teplota zanešeného povrchu stěny se potom určí ze vztahu:

$$t_z^{NP} = t_p^{NP} + \Delta t^{NP} = 165,5 + 25 = 190,5^\circ C$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro čisté spaliny (při spalování plynu) se určí dosazením do vztahu (4-18):

$$\alpha_s^{NP} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{ST}^{NP} + 1}{2} \cdot a^{NP} \cdot (T_{SP}^{NP})^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z^{NP}}{T_{SP}^{NP}}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z^{NP}}{T_{SP}^{NP}}} =$$

$$= 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,154 \cdot (220,349 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{190,5 + 273,15}{220,349 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{190,5 + 273,15}{220,349 + 273,15}} = 3,168 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

4.5.4.3 Součinitel přestupu tepla ze spalín do stěny

Součinitel využití, který charakterizuje neúplnost proudění spalín výhřevnou plochou je pro daný spalínový kotel volen:

$$\xi = 1$$

Součinitel přestupu tepla ze spalín do stěny dosazením do (4-16):

$$\alpha_1^{NP} = \xi \cdot (\alpha_K^{NP} + \alpha_s^{NP}) = 1 \cdot (33,108 + 3,168) = 36,277 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

4.5.5 Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany páry NP

Pro střední tlak p_p^{NP} a pro střední teplotu páry t_p^{NP} ve NP byly pomocí X-Steam určeny hodnoty součinitele tepelné vodivosti vodní páry, Prandtlovo číslo a součinitele dynamické viskozity:

$$p_p^{NP} = \frac{p_{1N} + p_{2N}}{2} = \frac{0,5 + 0,65}{2} = 0,575 MPa,$$

$$t_p^{NP} = 165,5^\circ C$$

- $\lambda_p^{NP} = 0,0321607 \cdot W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
- $Pr_p^{NP} = 1,0685$
- $\mu_p^{NP} = 1,459 \cdot 10^{-5} N \cdot s \cdot m^{-2}$

Výpočet součinitele kinematické viskozity vodní páry:

$$\nu_p^{NP} = \mu_p^{NP} \cdot \nu_p^{NP} = 1,459 \cdot 10^{-5} \cdot 0,343 = 5,001 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$$

Ekvivalentní průměr při proudění uvnitř trubek je roven vnitřnímu průměru trubky:

$$d_e^{NP} = d^{NP} = 47,6 mm$$

Potom lze vypočítat součinitel přestupu tepla ze strany páry ze vzorce (4-15):

$$\alpha_2^{NP} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p^{NP}}{d_e^{NP}} \cdot \left(\frac{w_p^{NP} \cdot d_e^{NP}}{\nu_p^{NP}}\right)^{0,8} \cdot (Pr_p^{NP})^{0,4} \cdot c_t^{NP} \cdot c_l^{NP} \cdot c_m^{NP} =$$

$$= 0,023 \cdot \frac{0,0321607}{0,0476} \cdot \left(\frac{19,696 \cdot 0,0476}{5,001 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,8} \cdot 1,0685^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 263,794 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

4.5.6 Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu NP

Součinitel přestupu tepla pro přehříváky páry s hladkými trubkami:

$$K = \frac{\psi \cdot \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}, \text{ kde:} \quad (4-22)$$

- ψ [-] je součinitel tepelné efektivity při spalování, pro přehříváky se uvažuje hodnota $\psi = 0,85$.

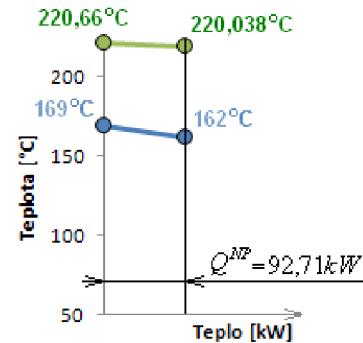
Výpočet součinitele prostupu tepla dosazením do (4-22):

$$K^{NP} = \frac{\psi^{NP} \cdot \alpha_1^{NP}}{1 + \frac{\alpha_1^{NP}}{\alpha_2^{NP}}} = \frac{0,85 \cdot 36,277}{1 + \frac{36,277}{263,794}} = 27,107$$

Výpočet logaritmického teplotního spádu dosazením do (4-6):

- $\Delta t_1^{NP} = t_E - t_{1N} = 220,66 - 169 = 51,66^\circ \text{C}$
- $\Delta t_2^{NP} = t_{FN} - t_{2N} = 220,038 - 162 = 58,038^\circ \text{C}$

$$\Delta t_{\ln}^{NP} = \frac{\Delta t_2^{NP} - \Delta t_1^{NP}}{\ln\left(\frac{\Delta t_2^{NP}}{\Delta t_1^{NP}}\right)} = \frac{58,038 - 51,66}{\ln\left(\frac{58,038}{51,66}\right)} = 54,786^\circ \text{C}$$



Obr. 4.19. Logaritmický teplotní spád NP

4.5.7 Volba počtu podélných řad NP

Výpočet celkové teplosměnné plochy ze strany spalín dosazením do (4-5):

$$S_{SP}^{NP} = \frac{Q^{NP}}{K^{NP} \cdot \Delta t_{\ln}^{NP}} = \frac{92,71}{27,107 \cdot 54,786} = 62,427 \text{ m}^2$$

Výpočet teplosměnné plochy ze strany spalín na 1m délky trubky dosazením do (4-4):

$$S_{SP-1m}^{NP} = \pi \cdot D^{NP} = \pi \cdot 0,054 = 0,17 \text{ m}$$

Výpočet plochy ze strany spalín na jednu řadu dosazením do (4-2):

$$S_{1SP-1r}^{NP} = S_{SP-1m}^{NP} \cdot l \cdot n_{ir}^{NP} = 0,17 \cdot 11,88 \cdot 32 = 64,493 \text{ m}^2$$

Počet podélných řad pak lze určit dosazením do vzorce (4-1):

$$n_R^{NP} = \frac{S_{SP}^{NP}}{S_{SP-1r}^{NP}} = \frac{62,427}{64,493} = 0,968$$

Hodnotu je potřeba zaokrouhlit na celé číslo:

$$n_R^{NP} = 1$$

4.5.8 Výpočet skutečného předaného tepla v NP

Skutečná teplosměnná plocha ze strany spalín při zvoleném počtu řad:

$$S_{SPsk}^{NP} = S_{SP-1r}^{NP} \cdot n_R^{NP} = 64,493 \cdot 1 = 64,493 \text{ m}^2$$

Skutečné předané teplo:

$$Q_{sk}^{NP} = K^{NP} \cdot S_{SPsk}^{NP} \cdot \Delta t_{\ln}^{NP} = 27,107 \cdot 64,493 \cdot 54,786 = 95,78 \text{ kW}$$

Původně navržená hodnota předaného tepla byla:

$$Q^{NP} = 92,71 \text{ kW}$$

Kontrolu, zda rozdíl mezi navrženým a skutečným předaným teplem vychází menší než 5 %, lze provést následujícím vztahem:

$$x_Q^{NP} = \left| 5 \cdot \frac{Q_{sk}^{NP} - Q^{NP}}{Q_{sk}^{NP} \cdot 0,05} \right| = \left| 5 \cdot \frac{0,09578 - 0,09271}{0,09578 \cdot 0,05} \right| = 3,203\%$$

Jelikož rozdíl vychází 3,203%, zvolený počet řad $n_R^{NP} = 1$ vyhovuje.

4.5.9 Výpočet skutečné teploty spalin v bodě F

Výpočet skutečné entalpie spalin v bodě F:

$$I_{SPF} = I_{SPE} - \frac{Q_{sk}^{NP}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 297,5 - \frac{95,78}{108,264 \cdot (1 - 0,003)} = 296,7kJ$$

Z této entalpie dále podobně jako v kapitole 3.6 určíme skutečnou teplotu v bodě F:

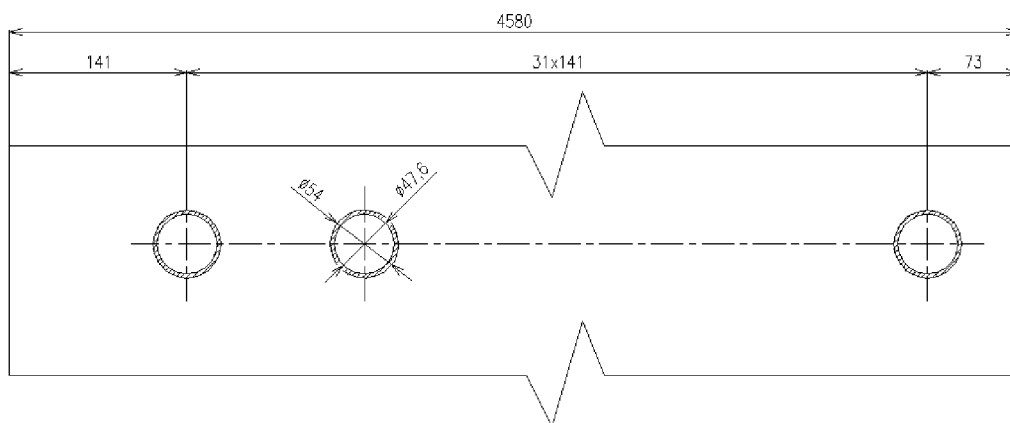
$$t_F = \frac{(I_{SPF} - I_{SP200}) \cdot 100}{I_{SP300} - I_{SP200}} + 200 = \frac{(296,7 - 268,9) \cdot 100}{407,4 - 268,9} + 200 = 220,017^\circ C$$

4.5.10 Přehled vypočtených hodnot a nákres NP

Hodnoty vypočtené v této kapitole jsou pro přehled uvedeny v tab. 4.15.

Tab. 4.15. Přehled vypočtených hodnot pro NP

Veličina	Značení	Hodnota
Počet trubek NP v jedné podélné řadě	n_{tr}^{NP}	32
Počet podélných řad trubek NP	n_R^{NP}	1
Příčná rozteč mezi trubkami NP	s_{1NP}	141mm
Podélná rozteč mezi trubkami NP	s_2^{NP}	117mm
Rychlost proudění spalin v kanále	w_{SP}^{NP}	$5,773m \cdot s^{-1}$
Rychlost proudění páry v trubkách NP	w_p^{NP}	$19,696m \cdot s^{-1}$
Skutečné předané teplo ve NP	Q_{sk}^{NP}	95,78kW
Skutečná teplota spalin v bodě F	t_F	220,017°C

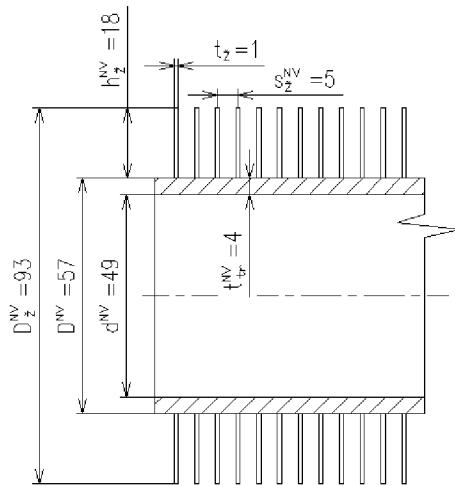


Obr. 4.20. Nákres trubek NP ve spalinovém kanále

4.6 Návrh nízkotlakého výparníku (NV)

4.6.1 Vstupní parametry a návrh rozměrů trubek NV

Nákres a rozměry trubek NV jsou uvedeny na obr. 4.21 a v tab. 4.16, vstupní parametry pro výpočet NV, vypočtené v předchozích kapitolách, jsou uvedeny v tab. 4.17.



Obr. 4.21. Rozměry trubek NV

Tab. 4.16. Zvolené rozměry trubek NV

Rozměr trubky	Značení	Hodnota
Vnější průměr trubky	D^{NV}	57 mm
Tloušťka trubky	t_{tr}^{NV}	4 mm
Vnitřní průměr trubky	d^{NV}	49 mm
Tloušťka žeber	t_z	1 mm
Počet žeber na 1m délky trubky	n_z^{NV}	200 m^{-1}
Rozteč mezi žebry	s_z^{NV}	5 mm
Výška žeber	h_z^{NV}	18 mm
Průměr žeber	D_z^{NV}	93 mm

Tab. 4.17. Parametry potřebné pro návrh NV

Veličina	Značení	Hodnota
Hmotnostní průtok páry nízkotlakým okruhem	M_{PN}	3,272 $kg \cdot s^{-1}$
Teplo předané ve NV	Q^{NV}	6,932 MW
Entalpie spalín v bodě F pilového diagramu	I_{SPF}	296,7 $kJ \cdot m^{-3}$
Entalpie spalín pro 100°C	I_{SP100}	133,7 $kJ \cdot m^{-3}$
Entalpie spalín pro 200°C	I_{SP200}	268,9 $kJ \cdot m^{-3}$
Teplota spalín v bodě F pilového diagramu	t_F	220,017 °C
Teplota páry v bodě 2N pilového diagramu	t_{2N}	162 °C
Teplota vody v bodě 3N pilového diagramu	t_{3N}	162 °C

4.6.2 Počet trubek v jedné podélné řadě NV

Mezera mezi trubkami (obr. 3.2) pro výpočet podélné rozteče byla zvolena $a^{NV} = 10\text{mm}$ (hodnotu volíme z rozmezí 5 až 15 mm) a příčná rozteč mezi trubkami je potom:

$$s_1^{NV} = D_z^{NV} + a^{NV} = 93 + 10 = 103\text{mm}$$

Při návrhu počtu trubek se vychází z upraveného vzorce (3-5):

$$n_{tr}^{NV} = \frac{\check{s}}{s_1^{NV}} - \frac{1}{2} = \frac{4,58}{0,103} - \frac{1}{2} = 43,966$$

Byl zvolen počet trubek v podélné řadě $n_{TR}^{NV} = 44$.

4.6.3 Výpočet objemového průtoku a rychlosti spalín ve NV

Výpočet entalpie spalín v bodě G:

$$I_{SPG} = I_{SPF} - \frac{Q^{NV}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 296,7 - \frac{6932}{108,264 \cdot (1 - 0,003)} = 232,4 kJ$$

Teplota v bodě E pilového diagramu se vypočte interpolací z hodnot entalpií pro teploty 100 až 600°C (viz tab. 2.3) a z vypočtené entalpie v bodě G (jedná se zatím o návrhovou teplotu):

$$t_{GN} = \frac{(I_{SPG} - I_{SP100}) \cdot 100}{I_{SP200} - I_{SP100}} + 100 = \frac{(232,4 - 133,7) \cdot 100}{268,9 - 133,7} + 100 = 173,019^\circ C$$

Střední teplota proudu spalín pro NV se vypočte jako aritmetický průměr hodnot v bodech F a G:

$$t_{SP}^{NV} = \frac{t_F + t_{GN}}{2} = \frac{220,017 + 173,019}{2} = 196,52^\circ C$$

Výpočet skutečného objemového průtoku spalín ve NV dosazením do vzorce (3-4):

$$M_{SPOsk}^{NV} = M_{SPO} \cdot \frac{t_{SP}^{NV} + 273,15}{273,15} = 108,264 \cdot \frac{196,52 + 273,15}{273,15} = 186,155 m^3 \cdot s^{-1}$$

Výpočet průtočné plochy spalín pro NV dosazením do vzorce (3-6):

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

$$= 11,88 \cdot 4,58 - 11,88 \cdot 0,057 \cdot 44 - 2 \cdot 0,018 \cdot 0,001 \cdot 200 \cdot 44 \cdot 11,88 = 20,852 m^2$$

Výpočet skutečné rychlosti spalín ve NV dosazením do vzorce (3-7):

$$w_{SP}^{NV} = \frac{M_{SPOsk}^{NV}}{S_{SP-PR}^{NV}} = \frac{186,155}{20,852} = 8,928 m \cdot s^{-1}$$

4.6.4 Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalín NV

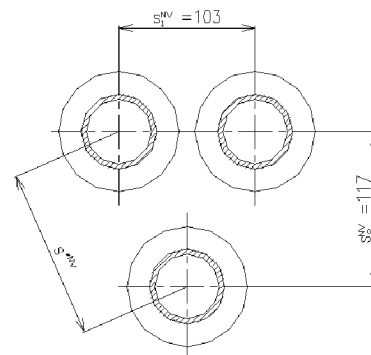
Součinitel přestupu tepla ze strany spalín bude vypočítán ze vzorce (4-9).

4.6.4.1 Součinitel přestupu tepla konvekcePodélná rozteč mezi trubkami byla zvolena $s_2^{NV} = 117 mm$ a přeponu s'^{NV} (viz obr. 4.22) potom lze vypočítat ze vzorce:

$$s'^{NV} = \sqrt{\left(\frac{s_1^{NV}}{2}\right)^2 + (s_2^{NV})^2} = \sqrt{\left(\frac{103}{2}\right)^2 + 117^2} = 127,833 mm$$

Nejdříve je nutno vypočítat poměrné podélné rozteče:

- $\sigma_1^{NV} = \frac{s_1^{NV}}{D^{NV}} = \frac{103}{57} = 1,807,$
- $\sigma_2'^{NV} = \frac{s'^{NV}}{D^{NV}} = \frac{127,833}{57} = 2,243.$



Obr. 4.22. Rozteče trubek NV

Tyto budou dosazeny do vzorce (4-14) pro výpočet poměrných podélných roztečů:

$$\varphi_{\sigma}^{NV} = \frac{\sigma_1^{NV} - 1}{\sigma_2'^{NV} - 1} = \frac{1,807 - 1}{2,243 - 1} = 0,649$$

Součinitel opravy na počet podélných řad lze určit z [1], obr. 8.4 na str. 116. Je zde předpokládán počet podélných řad přibližně 10, a proto je volena hodnota:

$$c_Z^{NV} = 1$$

Součinitele tepelné vodivosti spalín a součinitele kinematické viskozity spalín lze určit interpolací z [1], tab. 3-3 na str. 24 pro danou střední teplotu spalín $t_{SP}^{NV} = 196,52^\circ C$ a objemový podíl vodní páry ve spalínách 9,7%:

- $\lambda_{SP}^{NV} = 0,04 \cdot W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$,
- $\nu_{SP}^{NV} = 3,241 \cdot 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}$.

Součinitel přestupu tepla konvekcí je nyní možno spočítat dosazením do vzorce (4-13):

$$\begin{aligned} \alpha_K^{NV} &= 0,23 \cdot c_Z^{NV} \cdot (\varphi_\sigma^{NV})^{0,2} \cdot \frac{\lambda_{SP}^{NV}}{s_Z^{NV}} \cdot \left(\frac{D^{NV}}{s_Z^{NV}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_Z^{NV}}{s_Z^{NV}}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{W_{SP}^{NV} \cdot s_Z^{NV}}{\nu_{SP}^{NV}}\right)^{0,65} = \\ &= 0,23 \cdot 1 \cdot 0,649^{0,2} \cdot \frac{0,04}{5 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{0,057}{5 \cdot 10^{-3}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,018}{5 \cdot 10^{-3}}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{8,928 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{3,241 \cdot 10^{-5}}\right)^{0,65} = \\ &= 41,082 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \end{aligned}$$

4.6.4.2 Součinitel efektivnosti žebber

Pro zjištění součinitele efektivnosti žebber je nutno spočítat součinitel β ze vzorce (4-10):

$$\beta^{NV} = \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_Z \cdot \alpha_K^{NV}}{t_Z \cdot \lambda_Z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_Z \cdot \alpha_K^{NV})}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 41,082}{0,001 \cdot 40 \cdot (1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 41,082)}} = 40,398 m^{-1}$$

Hodnotu součinitele E nyní lze zjistit z [1], grafu na str. 114 pomocí součinu $\beta \cdot h_Z^{NV}$ a poměru

$$\frac{D_Z^{NV}}{D^{NV}}:$$

- $\beta \cdot h_Z^{NV} = 40,398 \cdot 0,018 = 0,727$,
- $\frac{D_Z^{NV}}{D^{NV}} = \frac{93}{57} = 1,632$.

Z grafu byla odečtena hodnota:

$$E^{NV} = 0,82$$

4.6.4.3 Podíl teplosměnných ploch žebber a celkové plochy ze strany spalín

Podíl výhřevných ploch žebber a celkové plochy ze strany spalín pro kruhové trubky s kruhovými žebry se vypočítá ze vzorce (4-11):

$$\frac{S_Z^{NV}}{S^{NV}} = \frac{\left(\frac{D_Z^{NV}}{D^{NV}}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_Z^{NV}}{D^{NV}}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left[\left(\frac{s_Z^{NV}}{D^{NV}}\right) - \left(\frac{t_Z}{D^{NV}}\right)\right]} = \frac{\left(\frac{93}{57}\right)^2 - 1}{\left(\frac{93}{57}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left[\left(\frac{5}{57}\right) - \left(\frac{1}{57}\right)\right]} = 0,922$$

Podíl volných částí trubky, kde nejsou žebra a celkové plochy na straně spalín se vypočítá ze vzorce (4-12):

$$\frac{S_h^{NV}}{S^{NV}} = 1 - \frac{S_Z^{NV}}{S^{NV}} = 1 - 0,922 = 0,078$$

4.6.4.4 Součinitel přestupu tepla ze strany spalin

Nyní lze vypočtené hodnoty dosadit do vzorce (4-9) a určit hodnotu α_r :

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

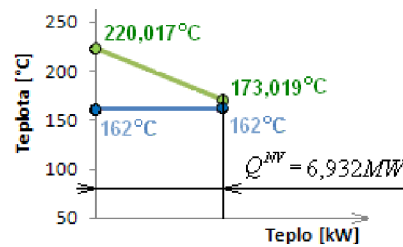
$$= (0,922 \cdot 0,82 \cdot 1 + 0,078) \cdot \frac{0,85 \cdot 41,082}{1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 41,082} = 27,222 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

4.6.5 Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu NV

Součinitel prostupu tepla se vypočítá dosazením do (4-7), avšak jelikož se předpokládá vysoká hodnota α_{2r}^{NV} , tak lze celý člen přibližně uvažovat

$$\frac{1}{\alpha_{2r}^{NV}} = 0, \text{ a potom platí:}$$

$$K^{NV} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1r}^{NV}} + \varepsilon} = \frac{1}{\frac{1}{27,222} + 0,002} = 25,817 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$



Obr. 4.23. Logaritmický teplotní spád NV

Výpočet logaritmického teplotního spádu dosazením do (4-6):

- $\Delta t_1^{NV} = t_F - t_{2N} = 220,017 - 162 = 58,017^\circ C$
- $\Delta t_2^{NV} = t_{GN} - t_{3N} = 173,019 - 162 = 11,019^\circ C$

$$\Delta t_{\ln}^{NV} = \frac{\Delta t_1^{NV} - \Delta t_2^{NV}}{\ln\left(\frac{\Delta t_1^{NV}}{\Delta t_2^{NV}}\right)} = \frac{58,017 - 11,019}{\ln\left(\frac{58,017}{11,019}\right)} = 28,293^\circ C$$

4.6.6 Volba počtu podélných řad NV

Výpočet celkové teplosměnné plochy ze strany spalin dosazením do (4-5):

$$S_{SP}^{NV} = \frac{Q^{NV}}{K^{NV} \cdot \Delta t_{\ln}^{NV}} = \frac{6932}{25,817 \cdot 28,293} = 9490 m^2$$

Výpočet teplosměnné plochy ze strany spalin na 1m délky trubky dosazením do (4-3):

$$S_{SP-1m}^{NV} = \pi \cdot D^{NV} + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{(D_{\dot{z}}^{NV})^2 - (D^{NV})^2}{4} \right) \cdot n_{\dot{z}}^{NV} = \pi \cdot 0,057 + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,093^2 - 0,057^2}{4} \right) \cdot 200 = 1,876 m$$

Výpočet plochy ze strany spalin na jednu řadu dosazením do (4-2):

$$S_{SP-1r}^{NV} = S_{SP-1m}^{NV} \cdot l \cdot n_{tr}^{NV} = 1,876 \cdot 11,88 \cdot 44 = 980,377 m^2$$

Počet podélných řad pak lze určit dosazením do vzorce (4-1):

$$n_R^{NV} = \frac{S_{SP}^{NV}}{S_{SP-1r}^{NV}} = \frac{9490}{980,377} = 9,68$$

Hodnotu je potřeba zaokrouhlit na celé číslo:

$$n_R^{NV} = 10$$

4.6.7 Výpočet skutečného předaného tepla ve NV

Skutečná teplosměnná plocha ze strany spalín při zvoleném počtu řad:

$$S_{SPsk}^{NV} = S_{SP-1r}^{NV} \cdot n_R^{NV} = 980,377 \cdot 10 = 9803,77m^2$$

Skutečné předané teplo:

$$Q_{sk}^{NV} = K^{NV} \cdot S_{SPsk}^{NV} \cdot \Delta t_{ln}^{NV} = 25,817 \cdot 9803,77 \cdot 28,293 = 7,161MW$$

Původně navržená hodnota předaného tepla byla:

$$Q^{NV} = 6,932MW$$

Kontrolu, zda rozdíl mezi navrženým a skutečným předaným teplem vychází menší než 5 %, lze provést následujícím vztahem:

$$x_Q^{NV} = \left| 5 \cdot \frac{Q_{sk}^{NV} - Q^{NV}}{Q_{sk}^{NV} \cdot 0,05} \right| = \left| 5 \cdot \frac{7,161 - 6,932}{7,161 \cdot 0,05} \right| = 3,201\%$$

Jelikož rozdíl vychází 3,201%, zvolený počet řad $n_R^{NV} = 10$ vyhovuje.

4.6.8 Výpočet skutečné teploty spalín v bodě G

Výpočet skutečné entalpie spalín v bodě G:

$$I_{SPG} = I_{SPF} - \frac{Q_{sk}^{NV}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 665,8 - \frac{7161}{108,264 \cdot (1 - 0,003)} = 230,3kJ$$

Z nové hodnoty entalpie lze nyní určit skutečnou teplotu v bodě G:

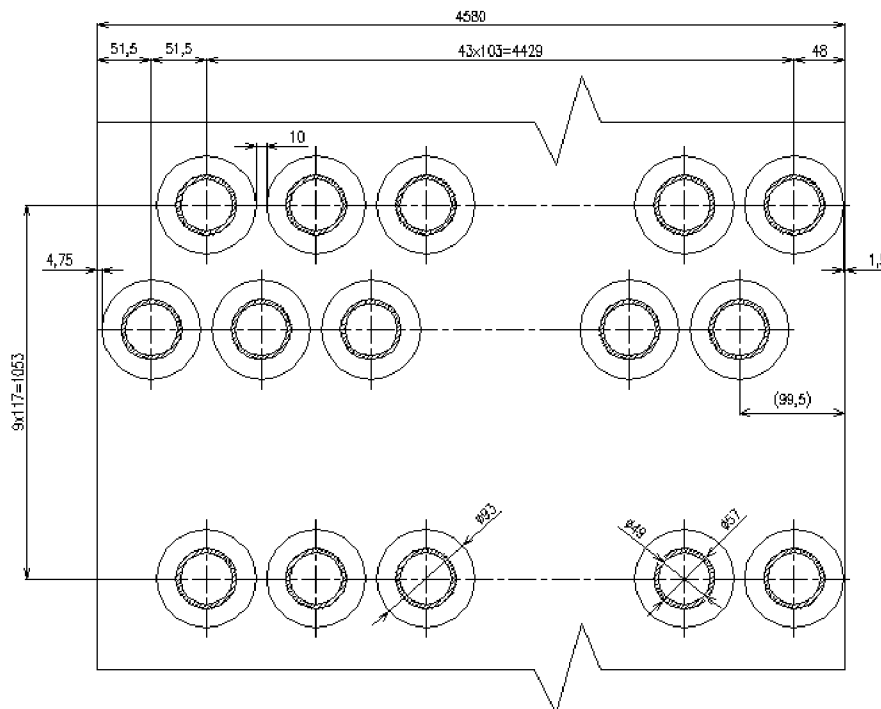
$$t_G = \frac{(I_{SPG} - I_{SP100}) \cdot 100}{I_{SP200} - I_{SP100}} + 100 = \frac{(230,3 - 133,7) \cdot 100}{268,9 - 133,7} + 100 = 171,45^\circ C$$

4.6.9 Přehled vypočtených hodnot a nákres NV

Hodnoty vypočtené v této kapitole jsou pro přehled uvedeny v tab. 4.18.

Tab. 4.18. Přehled vypočtených hodnot pro NV

Veličina	Značení	Hodnota
Počet trubek NV v jedné podélné řadě	n_{tr}^{NV}	44
Počet podélných řad trubek NV	n_R^{NV}	10
Příčná rozteč mezi trubkami NV	s_1^{NV}	103mm
Podélná rozteč mezi trubkami NV	s_2^{NV}	117mm
Rychlost proudění spalín v kanále	w_{SP}^{NV}	$8,928m \cdot s^{-1}$
Rychlost proudění páry v trubkách NV	w_p^{NV}	$5,787m \cdot s^{-1}$
Skutečné předané teplo ve NV	Q_{sk}^{NV}	7,161MW
Skutečná teplota spalín v bodě G	t_G	171,45°C

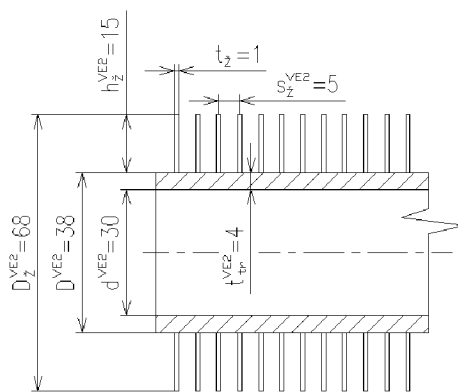


Obr. 4.24. Náskres trubek NV ve spalinovém kanále

4.7 Návrh druhého stupně vysokotlakého ekonomizéru (VE2)

4.7.1 Vstupní parametry a návrh rozměrů trubek VE2

Náskres a rozměry trubek VE2 jsou uvedeny na obr. 4.25 a v tab. 4.19, vstupní parametry pro výpočet VE2, vypočtené v předchozích kapitolách, jsou uvedeny v tab. 4.20.



Obr. 4.25. Rozměry trubek VE2

Tab. 4.19. Zvolené rozměry trubek VE2

Rozměr trubky	Značení	Hodnota
Vnější průměr trubky	D^{VE2}	38 mm
Tloušťka trubky	t_{tr}^{VE2}	4 mm
Vnitřní průměr trubky	d^{VE2}	30 mm
Tloušťka žebry	t_z	1 mm
Počet žebry na 1m délky trubky	n_z^{VE2}	200 m^{-1}
Rozteč mezi žebry	s_z^{VE2}	5 mm
Výška žebry	h_z^{VE2}	15 mm
Průměr žebry	D_z^{VE2}	68 mm

Tab. 4.20. Parametry potřebné pro návrh VE2

Veličina	Značení	Hodnota
Hmotnostní průtok páry vysokotlakým okruhem	M_{PV}	$19,797 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Teplo předané ve VE2	Q^{VE2}	$1,4514 \text{ MW}$
Entalpie spalín v bodě G pilového diagramu	I_{SPG}	$230,3 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Entalpie spalín pro 100°C	I_{SP100}	$133,7 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Entalpie spalín pro 200°C	I_{SP200}	$268,9 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Teplota spalín v bodě G pilového diagramu	t_G	$171,45^\circ \text{ C}$
Teplota páry v bodě 7V pilového diagramu	t_{7V}	158° C
Teplota vody v bodě 8V pilového diagramu	t_{8V}	140° C
Měrný objem vody v bodě 7V pilového diagramu	v_{7V}	$0,0010959 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Měrný objem vody v bodě 8V pilového diagramu	v_{8V}	$0,0010762 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

4.7.2 Počet trubek v jedné podélné řadě VE2

Mezera mezi trubkami (obr. 3.2) pro výpočet podélné rozteče byla zvolena $a^{VE2} = 9 \text{ mm}$ (hodnotu volíme z rozmezí 5 až 15 mm) a příčná rozteč mezi trubkami je potom:

$$s_1^{VE2} = D_z^{VE2} + a^{VE2} = 68 + 9 = 77 \text{ mm}$$

Při návrhu počtu trubek se vychází z upraveného vzorce (3-5):

$$n_{ir}^{VE2} = \frac{\check{s}}{s_1^{VE2}} - \frac{1}{2} = \frac{4,58}{0,077} - \frac{1}{2} = 58,981$$

Byl zvolen počet trubek v podélné řadě $n_{ir}^{VE2} = 59$.

Střední měrný objem páry ve VE2 se vypočte jako průměr hodnot v bodech 7V a 8V:

$$v_P^{VE2} = \frac{v_{7V} + v_{8V}}{2} = \frac{0,0010959 + 0,0010762}{2} = 0,00108605 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

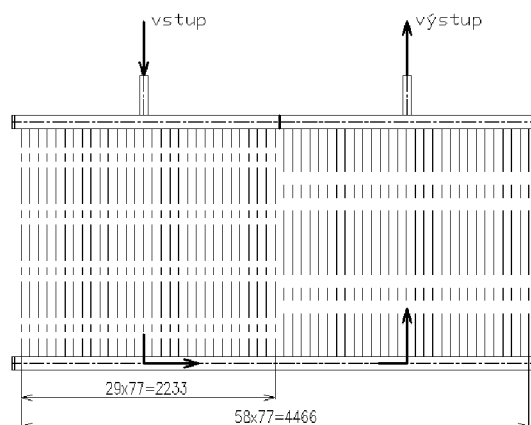
Pro zvolený počet trubek v podélné řadě je nutno zkontrolovat dosazením do vztahu (3-3), jestli vychází rychlost proudění v přípustných mezích pro VE2, tedy $1 \div 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$:

$$w_P^{VE2} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot v_P^{VE2}}{\pi \cdot (d^{VE2})^2 \cdot n_{ir}^{VE2}} =$$

$$= \frac{4 \cdot 0,95 \cdot 19,797 \cdot 0,00108605}{\pi \cdot 0,03^2 \cdot 59} = 0,49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost proudění při zvoleném počtu trubek je příliš nízká, proto bude rozváděcí kanál rozdělen na dvě části, kde tekutina proudí střídavě, čímž se rychlost proudění zdvojnásobí:

$$w_P^{VE2} = 2 \cdot 0,49 = 0,98 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$



Obr. 4.26. Rozdělený rozváděcí kanál VE2

4.7.3 Výpočet objemového průtoku a rychlosti spalín ve VE2

Výpočet entalpie spalín v bodě H:

$$I_{SPH} = I_{SPG} - \frac{Q^{VE2}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 230,3 - \frac{1451,4}{108,264 \cdot (1 - 0,003)} = 216,9 kJ$$

Teplota v bodě H pilového diagramu se vypočte interpolací z hodnot entalpií pro teploty 100 až 600°C (viz tab. 2.3) a z vypočtené entalpie v bodě H (jedná se zatím o návrhovou teplotu):

$$t_{HN} = \frac{(I_{SPH} - I_{SP100}) \cdot 100}{I_{SP200} - I_{SP100}} + 100 = \frac{(216,9 - 133,7) \cdot 100}{268,9 - 133,7} + 100 = 161,506^\circ C$$

Střední teplota proudu spalín pro VE2 se vypočte jako aritmetický průměr hodnot v bodech G a H:

$$t_{SP}^{VE2} = \frac{t_G + t_{HN}}{2} = \frac{171,45 + 161,506}{2} = 166,48^\circ C$$

Výpočet skutečného objemového průtoku spalín ve VE2 dosazením do vzorce (3-4):

$$M_{SPOsk}^{VE2} = M_{SPO} \cdot \frac{t_{SP}^{VE2} + 273,15}{273,15} = 108,264 \cdot \frac{166,48 + 273,15}{273,15} = 174,249 m^3 \cdot s^{-1}$$

Výpočet průtočné plochy spalín pro VE2 dosazením do vzorce (3-6):

$$S_{SP-PR}^{VE2} = l \cdot \check{s} - l \cdot D^{VE2} \cdot n_{tr}^{VE2} - 2 \cdot h_{\check{z}}^{VE2} \cdot t_{\check{z}} \cdot n_{\check{z}}^{VE2} \cdot n_{tr}^{VE2} \cdot l =$$

$$= 11,88 \cdot 4,58 - 11,88 \cdot 0,038 \cdot 59 - 2 \cdot 0,015 \cdot 0,001 \cdot 200 \cdot 59 \cdot 11,88 = 23,57 m^2$$

Výpočet skutečné rychlosti spalín ve VE2 dosazením do vzorce (3-7):

$$w_{SP}^{VE2} = \frac{M_{SPOsk}^{VE2}}{S_{SP-PR}^{VE2}} = \frac{174,249}{23,57} = 7,393 m \cdot s^{-1}$$

4.7.4 Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalín VE2

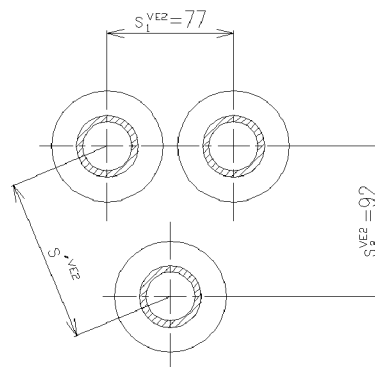
Součinitel přestupu tepla ze strany spalín bude vypočítán ze vzorce (4-9).

4.7.4.1 Součinitel přestupu tepla konvekcíPodélná rozteč mezi trubkami byla zvolena $s_2^{VE2} = 92 mm$ a přeponu s'^{VE2} (viz obr. 4.27) potom lze vypočítat ze vzorce:

$$s'^{VE2} = \sqrt{\left(\frac{s_1^{VE2}}{2}\right)^2 + (s_2^{VE2})^2} = \sqrt{\left(\frac{77}{2}\right)^2 + 92^2} = 99,73 mm$$

Nejdříve je nutno vypočítat poměrné podélné rozteče:

- $\sigma_1^{VE2} = \frac{s_1^{VE2}}{D^{VE2}} = \frac{77}{38} = 2,026,$
- $\sigma_2'^{VE2} = \frac{s'^{VE2}}{D^{VE2}} = \frac{99,73}{38} = 2,624.$



Obr. 4.27. Rozteče trubek VE2

Tyto budou dosazeny do vzorce (4-14) pro výpočet poměrných podélných roztečí:

$$\phi_{\sigma}^{VE2} = \frac{\sigma_1^{VE2} - 1}{\sigma_2'^{VE2} - 1} = \frac{2,026 - 1}{2,624 - 1} = 0,632$$

Součinitel opravy na počet podélných řad lze určit z [1], obr. 8.4 na str. 116. Je zde předpokládán počet podélných řad menší než 5, a proto je volena hodnota:

$$c_Z^{VE2} = 0,9$$

Součinitele tepelné vodivosti spalín a součinitele kinematické viskozity spalín lze určit interpolací z [1], tab. 3-3 na str. 24 pro danou střední teplotu spalín $t_{SP}^{VE2} = 166,48^\circ C$ a objemový podíl vodní páry ve spalínách 9,7%:

- $\lambda_{SP}^{VE2} = 0,037 \cdot W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$,
- $\nu_{SP}^{VE2} = 2,901 \cdot 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}$.

Součinitel přestupu tepla konvekcí je nyní možno spočítat dosazením do vzorce (4-13):

$$\begin{aligned} \alpha_K^{VE2} &= 0,23 \cdot c_Z^{VE2} \cdot (\phi_\sigma^{VE2})^{0,2} \cdot \frac{\lambda_{SP}^{VE2}}{s_Z^{VE2}} \cdot \left(\frac{D^{VE2}}{s_Z^{VE2}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_Z^{VE2}}{s_Z^{VE2}}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{w_{SP}^{VE2} \cdot s_Z^{VE2}}{\nu_{SP}^{VE2}}\right)^{0,65} = \\ &= 0,23 \cdot 0,9 \cdot 0,632^{0,2} \cdot \frac{0,037}{5 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{0,038}{5 \cdot 10^{-3}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,015}{5 \cdot 10^{-3}}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{7,393 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{2,901}\right)^{0,65} = \\ &= 41,714 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \end{aligned}$$

4.7.4.2 Součinitel efektivnosti žeber

Pro zjištění součinitele efektivnosti žeber je nutno spočítat součinitel β ze vzorce (4-10):

$$\beta^{VE2} = \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_Z \cdot \alpha_K^{VE2}}{t_Z \cdot \lambda_Z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_Z \cdot \alpha_K^{VE2})}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 41,714}{0,001 \cdot 40 \cdot (1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 41,714)}} = 40,687 m^{-1}$$

Hodnotu součinitele E nyní lze zjistit z [1], grafu na str. 114 pomocí součinu $\beta \cdot h_Z^{VE2}$ a poměru

$$\frac{D_Z^{VE2}}{D^{VE2}}:$$

- $\beta^{VE2} \cdot h_Z^{VE2} = 40,687 \cdot 0,015 = 0,61$,
- $\frac{D_Z^{VE2}}{D^{VE2}} = \frac{68}{38} = 1,789$.

Z grafu byla odečtena hodnota:

$$E^{VE2} = 0,86$$

4.7.4.3 Podíly teplosměnných ploch žeber a celkové plochy ze strany spalín

Podíl výhřevných ploch žeber a celkové plochy ze strany spalín pro kruhové trubky s kruhovými žebry se vypočítá ze vzorce (4-11):

$$\frac{S_Z^{VE2}}{S^{VE2}} = \frac{\left(\frac{D_Z^{VE2}}{D^{VE2}}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_Z^{VE2}}{D^{VE2}}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left[\left(\frac{S_Z^{VE2}}{D^{VE2}}\right) - \left(\frac{t_Z}{D^{VE2}}\right)\right]} = \frac{\left(\frac{68}{38}\right)^2 - 1}{\left(\frac{68}{38}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left[\left(\frac{5}{38}\right) - \left(\frac{1}{38}\right)\right]} = 0,913$$

Podíl volných částí trubky, kde nejsou žebra a celkové plochy na straně spalín se vypočítá ze vzorce (4-12):

$$\frac{S_h^{VE2}}{S^{VE2}} = 1 - \frac{S_Z^{VE2}}{S^{VE2}} = 1 - 0,913 = 0,087$$

4.7.4.4 Součinitel přestupu tepla ze strany spalín

Nyní lze vypočtené hodnoty dosadit do vzorce (4-9) a určit hodnotu α_r :

$$\alpha_{1r}^{VE2} = \left(\frac{S_{\dot{z}}^{VE2}}{S^{VE2}} \cdot E^{VE2} \cdot \mu + \frac{S_h^{VE2}}{S^{VE2}} \right) \cdot \frac{\psi_{\dot{z}} \cdot \alpha_K^{VE2}}{1 + \varepsilon \cdot \psi_{\dot{z}} \cdot \alpha_K^{VE2}} =$$

$$= (0,913 \cdot 0,86 \cdot 1 + 0,087) \cdot \frac{0,85 \cdot 41,714}{1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 41,714} = 28,878 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

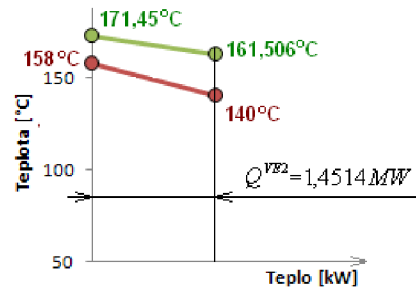
4.7.5 Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu VE2

Součinitel prostupu tepla se vypočítá dosazením do (4-7), avšak jelikož se předpokládá vysoká hodnota

α_{2r}^{VE2} , tak lze celý člen přibližně uvažovat $\frac{1}{\alpha_{2r}^{VE2}} = 0$, a

potom platí:

$$K^{VE2} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1r}^{VE2}} + \varepsilon} = \frac{1}{\frac{1}{28,878} + 0,002} = 27,302 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$



Výpočet logaritmického teplotního spádu dosazením do (4-6):

- $\Delta t_1^{VE2} = t_G - t_{7V} = 171,45 - 158 = 13,45^\circ C$
- $\Delta t_2^{VE2} = t_{HN} - t_{7V} = 161,506 - 140 = 21,506^\circ C$

$$\Delta t_{in}^{VE2} = \frac{\Delta t_2^{VE2} - \Delta t_1^{VE2}}{\ln\left(\frac{\Delta t_2^{VE2}}{\Delta t_1^{VE2}}\right)} = \frac{21,506 - 13,45}{\ln\left(\frac{21,506}{13,45}\right)} = 17,163^\circ C$$

Obr. 4.28. Logaritmický teplotní spád VE2

4.7.6 Volba počtu podélných řad VE2

Výpočet celkové teplosměnné plochy ze strany spalín dosazením do (4-5):

$$S_{SP}^{VE2} = \frac{Q^{VE2}}{K^{VE2} \cdot \Delta t_{in}^{VE2}} = \frac{1451,4}{27,302 \cdot 17,163} = 3097 m^2$$

Výpočet teplosměnné plochy ze strany spalín na 1m délky trubky dosazením do (4-3):

$$S_{SP-1m}^{VE2} = \pi \cdot D^{VE2} + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{(D_{\dot{z}}^{VE2})^2 - (D^{VE2})^2}{4} \right) \cdot n_{\dot{z}}^{VE2} = \pi \cdot 0,038 + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,068^2 - 0,038^2}{4} \right) \cdot 200 = 1,118 m$$

Výpočet plochy ze strany spalín na jednu řadu dosazením do (4-2):

$$S_{SP-1r}^{VE2} = S_{SP-1m}^{VE2} \cdot l \cdot n_{tr}^{VE2} = 1,118 \cdot 11,88 \cdot 59 = 783,914 m^2$$

Počet podélných řad pak lze určit dosazením do vzorce (4-1):

$$n_R^{VE2} = \frac{S_{SP}^{VE2}}{S_{SP-1r}^{VE2}} = \frac{3097}{783,914} = 3,951$$

Hodnotu je potřeba zaokrouhlit na celé číslo:

$$n_R^{VE2} = 4$$

4.7.7 Výpočet skutečného předaného tepla ve VE2

Skutečná teplosměnná plocha ze strany spalín při zvoleném počtu řad:

$$S_{SPsk}^{VE2} = S_{SP-1r}^{VE2} \cdot n_R^{VE2} = 783,914 \cdot 4 = 3136m^2$$

Skutečné předané teplo:

$$Q_{sk}^{VE2} = K^{VE2} \cdot S_{SPsk}^{VE2} \cdot \Delta t_{ln}^{VE2} = 27,302 \cdot 3136 \cdot 17,163 = 1,469MW$$

Původně navržená hodnota předaného tepla byla:

$$Q^{VE2} = 1,4514MW$$

Kontrolu, zda rozdíl mezi navrženým a skutečným předaným teplem vychází menší než 5 %, lze provést následujícím vztahem:

$$x_Q^{VE2} = \left| 5 \cdot \frac{Q_{sk}^{VE2} - Q^{VE2}}{Q_{sk}^{VE2} \cdot 0,05} \right| = \left| 5 \cdot \frac{1,469 - 1,4514}{1,469 \cdot 0,05} \right| = 1,221\%$$

Jelikož rozdíl vychází 1,221%, zvolený počet řad $n_R^{VE2} = 4$ vyhovuje.

4.7.8 Výpočet skutečné teploty spalín v bodě H

Výpočet skutečné entalpie spalín v bodě H:

$$I_{SPH} = I_{SPG} - \frac{Q_{sk}^{VE2}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 386,2 - \frac{1469}{108,264 \cdot (1 - 0,003)} = 217,4kJ$$

Z nové hodnoty entalpie lze nyní určit skutečnou teplotu v bodě H:

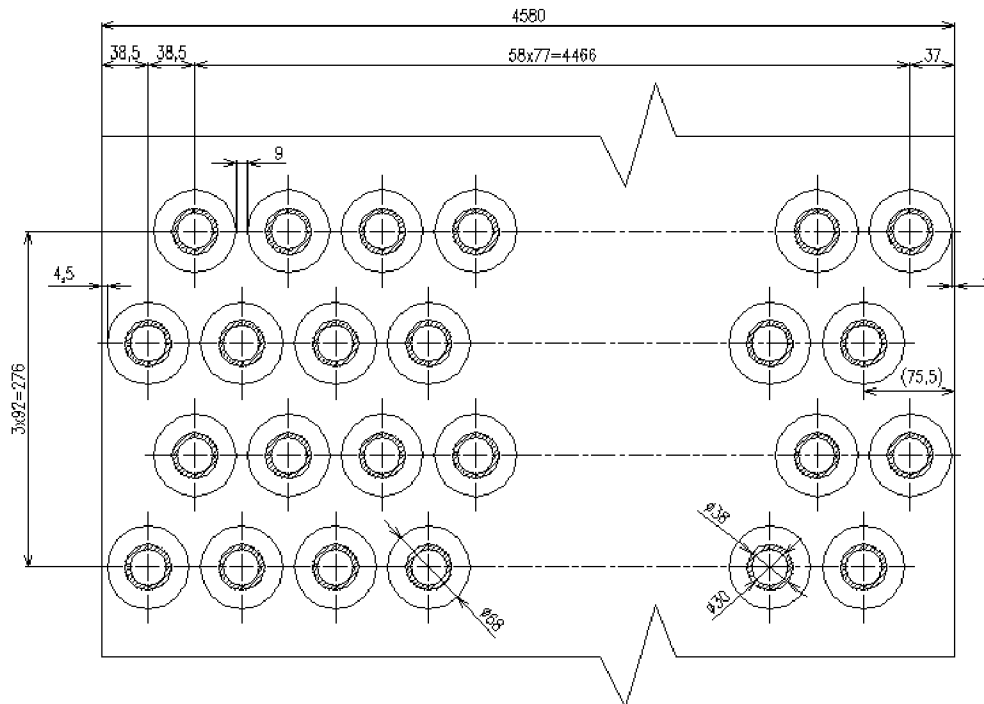
$$t_H = \frac{(I_{SPH} - I_{SP100}) \cdot 100}{I_{SP200} - I_{SP100}} + 100 = \frac{(217,4 - 133,7) \cdot 100}{268,9 - 133,7} + 100 = 161,935^\circ C$$

4.7.9 Přehled vypočtených hodnot a nákras VE2

Hodnoty vypočtené v této kapitole jsou pro přehled uvedeny v tab. 4.21.

Tab. 4.21. Přehled vypočtených hodnot pro VE2

Veličina	Značení	Hodnota
Počet trubek VE2 v jedné podélné řadě	n_{tr}^{VE2}	59
Počet podélných řad trubek VE2	n_R^{VE2}	4
Příčná rozteč mezi trubkami VE2	s_1^{VE2}	77mm
Podélná rozteč mezi trubkami VE2	s_2^{VE2}	92mm
Rychlost proudění spalín v kanále	w_{SP}^{VE2}	$7,393m \cdot s^{-1}$
Rychlost proudění vody v trubkách VE2	w_P^{VE2}	$0,98m \cdot s^{-1}$
Skutečné předané teplo ve VE2	Q_{sk}^{VE2}	1,469MW
Skutečná teplota spalín v bodě H	t_H	161,935°C

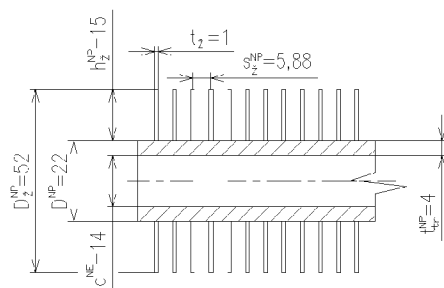


Obr. 4.29. Náčrsek trubek VE2 ve spalínovém kanále

4.8 Návrh nízkotlakého ekonomizéru (NE)

4.8.1 Vstupní parametry a návrh rozměrů trubek NE

Náčrsek a rozměry trubek NE jsou uvedeny na obr. 4.30 a v tab. 4.22, vstupní parametry pro výpočet NE, vypočtené v předchozích kapitolách, jsou uvedeny v tab. 4.23.



Obr. 4.30. Rozměry trubek NE

Tab. 4.22. Zvolené rozměry trubek NE

Rozměr trubky	Značení	Hodnota
Vnější průměr trubky	D^{NE}	22 mm
Tloušťka trubky	t_{tr}^{NE}	4 mm
Vnitřní průměr trubky	d^{NE}	14 mm
Tloušťka žebry	t_z	1 mm
Počet žebry na 1m délky trubky	n_z^{NE}	170 m^{-1}
Rozteč mezi žebry	s_z^{NE}	$\approx 5,88mm$
Výška žebry	h_z^{NE}	15 mm
Průměr žebry	D_z^{NE}	52 mm

Tab. 4.23. Parametry potřebné pro návrh NE

Veličina	Značení	Hodnota
Hmotnostní průtok páry nízkotlakým okruhem	M_{PN}	$3,272 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Teplo předané v NE	Q^{NE}	$1,205 \text{ MW}$
Entalpie spalín v bodě H pilového diagramu	I_{SPH}	$217,4 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Entalpie spalín pro 100°C	I_{SP100}	$133,7 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Entalpie spalín pro 200°C	I_{SP200}	$268,9 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Teplota spalín v bodě H pilového diagramu	t_H	$161,935^\circ \text{ C}$
Teplota páry v bodě 4N pilového diagramu	t_{4N}	152° C
Teplota vody v bodě 5N pilového diagramu	t_{5N}	65° C
Měrný objem vody v bodě 4N pilového diagramu	v_{4N}	$0,0010926 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Měrný objem vody v bodě 5N pilového diagramu	v_{5N}	$0,0010195 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

4.8.2 Počet trubek v jedné podélné řadě NE

Mezera mezi trubkami (obr. 3.2) pro výpočet podélné rozteče byla zvolena $a^{NE} = 12 \text{ mm}$ (hodnotu volíme z rozmezí 5 až 15 mm) a příčná rozteč mezi trubkami je potom:

$$s_1^{NE} = D_z^{NE} + a^{NE} = 52 + 12 = 64 \text{ mm}$$

Při návrhu počtu trubek se vychází z upraveného vzorce (3-5):

$$n_{tr}^{NE} = \frac{\check{s}}{s_1^{NE}} - \frac{1}{2} = \frac{4,58}{0,064} - \frac{1}{2} = 71,063$$

Byl zvolen počet trubek v podélné řadě $n_{tr}^{NE} = 71$.

Střední měrný objem páry v NE se vypočte jako průměr hodnot v bodech 4N a 5N:

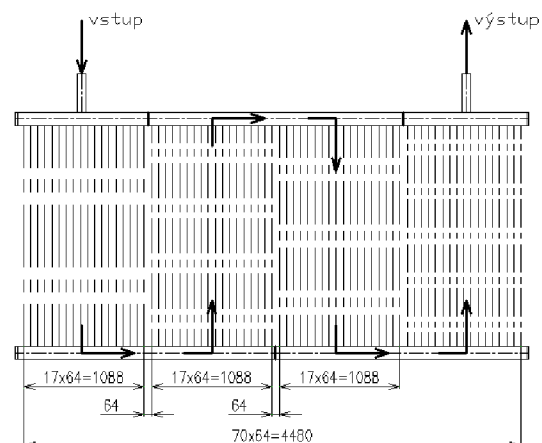
$$v_p^{NE} = \frac{v_{4N} + v_{5N}}{2} = \frac{0,0010926 + 0,00195}{2} = 0,00105605 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Pro zvolený počet trubek v podélné řadě je nutno zkontrolovat dosažením do vztahu (3-3), jestli vychází rychlost proudění v přípustných mezích pro NE, tedy $1 \div 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$:

$$w_p^{NE} = \frac{4 \cdot M_{PN} \cdot v_p^{NE}}{\pi \cdot (d^{NE})^2 \cdot n_{tr}^{NE}} = \frac{4 \cdot 3,272 \cdot 0,00105605}{\pi \cdot 0,014^2 \cdot 71} = 0,316 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost proudění při zvoleném počtu trubek je příliš nízká, proto bude rozváděcí kanál rozdělen na 4 části, kde tekutina proudí střídavě, čímž se rychlost proudění zečtyřnásobí:

$$w_p^{NE} = 4 \cdot 0,316 = 1,264 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$



Obr. 4.31. Rozdělený rozváděcí kanál NE

4.8.3 Výpočet objemového průtoku a rychlosti spalín v NE

Výpočet entalpie spalín v bodě I:

$$I_{SPI} = I_{SPH} - \frac{Q^{NE}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 217,4 - \frac{1205}{108,264 \cdot (1 - 0,003)} = 206,3 \text{ kJ}$$

Teplota v bodě I pilového diagramu se vypočte interpolací z hodnot entalpií pro teploty 100 až 600°C (viz tab. 2.3) a z vypočtené entalpie v bodě I (jedná se zatím o návrhovou teplotu):

$$t_{IN} = \frac{(I_{SPI} - I_{SP100}) \cdot 100}{I_{SP200} - I_{SP100}} + 100 = \frac{(206,3 - 133,7) \cdot 100}{268,9 - 133,7} + 100 = 153,68^\circ \text{C}$$

Střední teplota proudu spalín pro NE se vypočte jako aritmetický průměr hodnot v bodech H a I:

$$t_{SP}^{NE} = \frac{t_H + t_{IN}}{2} = \frac{161,935 + 153,68}{2} = 157,81^\circ \text{C}$$

Výpočet skutečného objemového průtoku spalín v NE dosazením do vzorce (3-4):

$$M_{SPOsk}^{NE} = M_{SPO} \cdot \frac{t_{SP}^{NE} + 273,15}{273,15} = 108,264 \cdot \frac{157,81 + 273,15}{273,15} = 170,813 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Výpočet průtočné plochy spalín pro NE dosazením do vzorce (3-6):

$$S_{SP-PR}^{NE} = l \cdot \check{s} - l \cdot D^{NE} \cdot n_{ir}^{NE} - 2 \cdot h_Z^{NE} \cdot t_Z \cdot n_Z^{NE} \cdot n_{ir}^{NE} \cdot l =$$

$$= 11,88 \cdot 4,58 - 11,88 \cdot 0,022 \cdot 71 - 2 \cdot 0,015 \cdot 0,001 \cdot 170 \cdot 71 \cdot 11,88 = 31,552 \text{ m}^2$$

Výpočet skutečné rychlosti spalín ve NE dosazením do vzorce (3-7):

$$w_{SP}^{NE} = \frac{M_{SPOsk}^{NE}}{S_{SP-PR}^{NE}} = \frac{170,813}{31,552} = 5,414 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

4.8.4 Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalín NE

Součinitel přestupu tepla ze strany spalín bude vypočítán ze vzorce (4-9).

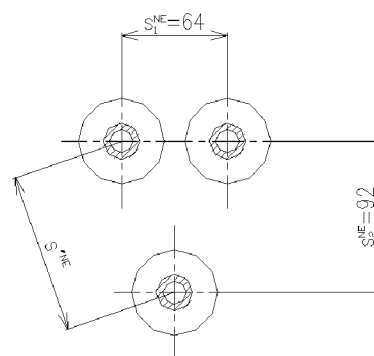
4.8.4.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí

Podélná rozteč mezi trubkami byla zvolena $s_2^{NE} = 92 \text{ mm}$ a přeponu s'^{NE} (viz obr. 4.32) potom lze vypočítat ze vzorce:

$$s'^{NE} = \sqrt{\left(\frac{s_1^{NE}}{2}\right)^2 + (s_2^{NE})^2} = \sqrt{\left(\frac{64}{2}\right)^2 + 92^2} = 97,406 \text{ mm}$$

Nejdříve je nutno vypočítat poměrné podélné rozteče:

- $\sigma_1^{NE} = \frac{s_1^{NE}}{D^{NE}} = \frac{64}{22} = 2,909$,
- $\sigma_2^{NE} = \frac{s'^{NE}}{D^{NE}} = \frac{97,406}{22} = 4,428$.



Obr. 4.32. Rozteče trubek NE

Tyto budou dosazeny do vzorce (4-14) pro výpočet poměrných podélných roztečí:

$$\varphi_{\sigma}^{NE} = \frac{\sigma_1^{NE} - 1}{\sigma_2^{NE} - 1} = \frac{2,909 - 1}{4,428 - 1} = 0,557$$

Součinitel opravy na počet podélných řad lze určit z [1], obr. 8.4 na str. 116. Je zde předpokládán počet podélných řad menší než 5, a proto je volena hodnota:

$$c_Z^{NE} = 0,9$$

Součinitele tepelné vodivosti spalín a součinitele kinematické viskozity spalín lze určit interpolací z [1], tab. 3-3 na str. 24 pro danou střední teplotu spalín $t_{SP}^{NE} = 157,81^\circ C$ a objemový podíl vodní páry ve spalínách 9,7%:

- $\lambda_{SP}^{NE} = 0,036 \cdot W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$,
- $\nu_{SP}^{NE} = 2,803 \cdot 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}$.

Součinitel přestupu tepla konvekcí je nyní možno spočítat dosazením do vzorce (4-13):

$$\begin{aligned} \alpha_K^{NE} &= 0,23 \cdot c_Z^{NE} \cdot (\varphi_\sigma^{NE})^{0,2} \cdot \frac{\lambda_{SP}^{NE}}{s_Z^{NE}} \cdot \left(\frac{D^{NE}}{s_Z^{NE}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_Z^{NE}}{s_Z^{NE}}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{w_{SP}^{NE} \cdot s_Z^{NE}}{\nu_{SP}^{NE}}\right)^{0,65} = \\ &= 0,23 \cdot 0,9 \cdot 0,557^{0,2} \cdot \frac{0,036}{5,88 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{0,022}{5,88 \cdot 10^{-3}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,015}{5,88 \cdot 10^{-3}}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{5,414 \cdot 5,88 \cdot 10^{-3}}{2,803 \cdot 10^{-5}}\right)^{0,65} = \\ &= 47,172 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \end{aligned}$$

4.8.4.2 Součinitel efektivnosti žebor

Pro zjištění součinitele efektivnosti žebor je nutno spočítat součinitel β ze vzorce (4-10):

$$\beta^{NE} = \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_Z \cdot \alpha_K^{NE}}{t_Z \cdot \lambda_Z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_Z \cdot \alpha_K^{NE})}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 47,172}{0,001 \cdot 40 \cdot (1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 47,172)}} = 43,081 m^{-1}$$

Hodnotu součinitele E nyní lze zjistit z [1], grafu na str. 114 pomocí součinu $\beta \cdot h_Z^{NE}$ a poměru

$$\frac{D_Z^{NE}}{D^{NE}}:$$

- $\beta^{NE} \cdot h_Z^{NE} = 43,081 \cdot 0,015 = 0,646$,
- $\frac{D_Z^{NE}}{D^{NE}} = \frac{52}{22} = 2,364$.

Z grafu byla odečtena hodnota:

$$E^{NE} = 0,84$$

4.8.4.3 Podíl teplosměnných ploch žebor a celkové plochy ze strany spalín

Podíl výhřevných ploch žebor a celkové plochy ze strany spalín pro kruhové trubky s kruhovými žebory se vypočítá ze vzorce (4-11):

$$\frac{S_Z^{NE}}{S^{NE}} = \frac{\left(\frac{D_Z^{NE}}{D^{NE}}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_Z^{NE}}{D^{NE}}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left[\left(\frac{s_Z^{NE}}{D^{NE}}\right) - \left(\frac{t_Z}{D^{NE}}\right)\right]} = \frac{\left(\frac{52}{22}\right)^2 - 1}{\left(\frac{52}{22}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left[\left(\frac{5,88}{22}\right) - \left(\frac{1}{22}\right)\right]} = 0,912$$

Podíl volných částí trubky, kde nejsou žebra a celkové plochy na straně spalín se vypočítá ze vzorce (4-12):

$$\frac{S_h^{NE}}{S^{NE}} = 1 - \frac{S_Z^{NE}}{S^{NE}} = 1 - 0,912 = 0,088$$

4.8.4.4 Součinitel přestupu tepla ze strany spalín

Nyní lze vypočtené hodnoty dosadit do vzorce (4-9) a určit hodnotu α_r :

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

$$= (0,912 \cdot 0,84 \cdot 1 + 0,088) \cdot \frac{0,85 \cdot 47,182}{1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 47,172} = 31,705 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

4.8.5 Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu NE

Součinitel prostupu tepla se vypočítá dosazením do (4-7), avšak jelikož se předpokládá vysoká hodnota

α_{2r}^{NE} , tak lze celý člen přibližně uvažovat $\frac{1}{\alpha_{2r}^{NE}} = 0$,

a potom platí:

$$K^{NE} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1r}^{NE}} + \varepsilon} = \frac{1}{\frac{1}{31,705} + 0,002} = 29,814 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

Výpočet logaritmického teplotního spádu dosazením do (4-6):

- $\Delta t_1^{NE} = t_H - t_{4N} = 161,935 - 152 = 9,935^\circ C$
- $\Delta t_2^{NE} = t_{1N} - t_{5N} = 153,68 - 65 = 88,68^\circ C$

$$\Delta t_{\ln}^{NE} = \frac{\Delta t_2^{NE} - \Delta t_1^{NE}}{\ln\left(\frac{\Delta t_2^{NE}}{\Delta t_1^{NE}}\right)} = \frac{88,68 - 9,935}{\ln\left(\frac{88,68}{9,935}\right)} = 35,974^\circ C$$

4.8.6 Volba počtu podélných řad NE

Výpočet celkové teplosměnné plochy ze strany spalín dosazením do (4-5):

$$S_{SP}^{NE} = \frac{Q^{NE}}{K^{NE} \cdot \Delta t_{\ln}^{NE}} = \frac{9530}{29,814 \cdot 35,974} = 1124 m^2$$

Výpočet teplosměnné plochy ze strany spalín na 1m délky trubky dosazením do (4-3):

$$S_{SP-1m}^{NE} = \pi \cdot D^{NE} + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{(D_{\dot{z}}^{NE})^2 - (D^{NE})^2}{4} \right) \cdot n_{\dot{z}}^{NE} = \pi \cdot 0,022 + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,052^2 - 0,022^2}{4} \right) \cdot 170 = 0,662 m$$

Výpočet plochy ze strany spalín na jednu řadu dosazením do (4-2):

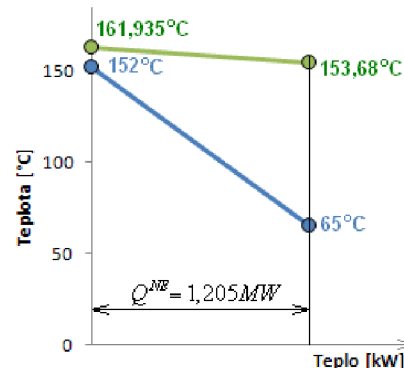
$$S_{SP-1r}^{NE} = S_{SP-1m}^{NE} \cdot l \cdot n_{tr}^{NE} = 0,662 \cdot 11,88 \cdot 71 = 558,328 m^2$$

Počet podélných řad pak lze určit dosazením do vzorce (4-1):

$$n_R^{NE} = \frac{S_{SP}^{NE}}{S_{SP-1r}^{NE}} = \frac{1124}{558,328} = 2,012$$

Hodnotu je potřeba zaokrouhlit na celé číslo:

$$n_R^{NE} = 2$$



Obr. 4.33. Logaritmický teplotní spád NE

4.8.7 Výpočet skutečného předaného tepla v NE

Skutečná teplosměnná plocha ze strany spalín při zvoleném počtu řad:

$$S_{SPsk}^{NE} = S_{SP-1r}^{NE} \cdot n_R^{NE} = 558,328 \cdot 2 = 1117m^2$$

Skutečné předané teplo:

$$Q_{sk}^{NE} = K^{NE} \cdot S_{SPsk}^{NE} \cdot \Delta t_{in}^{NE} = 29,814 \cdot 1117 \cdot 35,974 = 1,198MW$$

Původně navržená hodnota předaného tepla byla:

$$Q^{NE} = 1,205MW$$

Kontrolu, zda rozdíl mezi navrženým a skutečným předaným teplem vychází menší než 5 %, lze provést následujícím vztahem:

$$x_Q^{NE} = \left| 5 \cdot \frac{Q_{sk}^{NE} - Q^{NE}}{Q_{sk}^{NE} \cdot 0,05} \right| = \left| 5 \cdot \frac{1,198 - 1,205}{1,198 \cdot 0,05} \right| = 0,619\%$$

Jelikož rozdíl vychází 0,619%, zvolený počet řad $n_R^{NE} = 2$ vyhovuje.

4.8.8 Výpočet skutečné teploty spalín v bodě I

Výpočet skutečné entalpie spalín v bodě I:

$$I_{SPI} = I_{SPH} - \frac{Q_{sk}^{NE}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 217,4 - \frac{1198}{108,264 \cdot (1 - 0,003)} = 206,4kJ$$

Z nové hodnoty entalpie lze nyní určit skutečnou teplotu v bodě I:

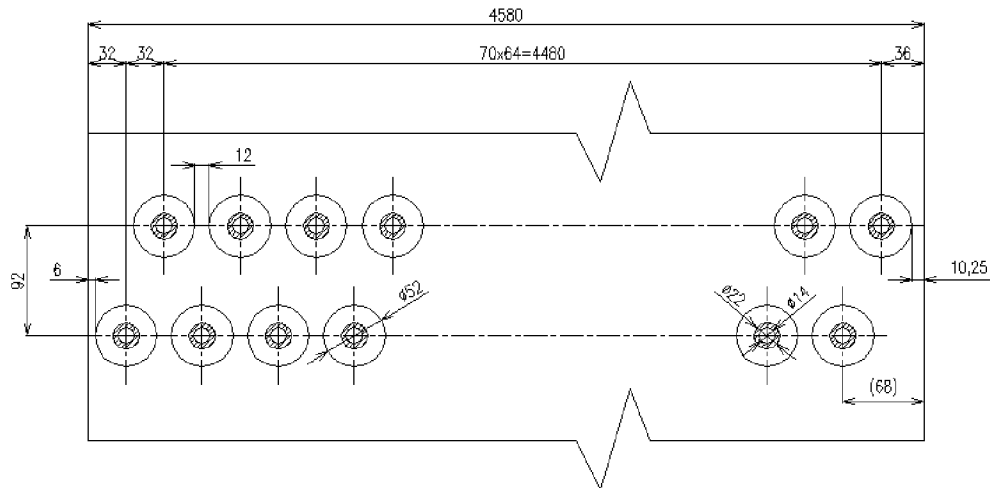
$$t_I = \frac{(I_{SPI} - I_{SP100}) \cdot 100}{I_{SP200} - I_{SP100}} + 100 = \frac{(206,4 - 133,7) \cdot 100}{268,9 - 133,7} + 100 = 153,732^\circ C$$

4.8.9 Přehled vypočtených hodnot a nákras NE

Hodnoty vypočtené v této kapitole jsou pro přehled uvedeny v tab. 4.24.

Tab. 4.24. Přehled vypočtených hodnot pro NE

Veličina	Značení	Hodnota
Počet trubek NE v jedné podélné řadě	n_{tr}^{NE}	71
Počet podélných řad trubek NE	n_R^{NE}	2
Příčná rozteč mezi trubkami NE	s_1^{NE}	64mm
Podélná rozteč mezi trubkami NE	s_2^{NE}	92mm
Rychlost proudění spalín v kanále	w_{SP}^{NE}	$5,414m \cdot s^{-1}$
Rychlost proudění vody v trubkách NE	w_P^{NE}	$1,264m \cdot s^{-1}$
Skutečné předané teplo v NE	Q_{sk}^{NE}	1,198MW
Skutečná teplota spalín v bodě I	t_I	153,732°C



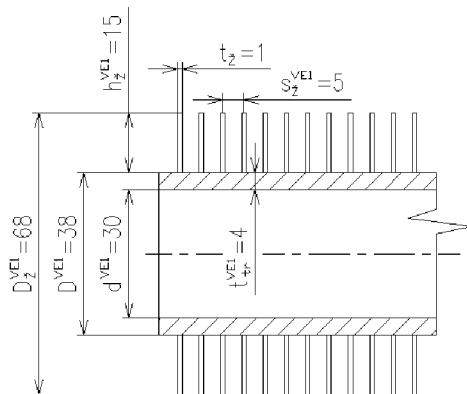
Obr. 4.34. Náskres trubek NE ve spalínovém kanále

4.9 Návrh prvního stupně vysokotlakého ekonomizéru (VE1)

4.9.1 Vstupní parametry a návrh rozměrů trubek VE1

Náskres a rozměry trubek VE1 jsou uvedeny na obr. 4.35 a v tab. 4.25, vstupní parametry pro výpočet VE1, vypočtené v předchozích kapitolách, jsou uvedeny v tab. 4.26.

Tab. 4.25. Zvolené rozměry trubek VE1



Obr. 4.35. Rozměry trubek VE1

Rozměr trubky	Značení	Hodnota
Vnější průměr trubky	D_z^{VE1}	38 mm
Tloušťka trubky	t_{tr}^{VE1}	4 mm
Vnitřní průměr trubky	d^{VE1}	30 mm
Tloušťka žebér	t_z	1 mm
Počet žebér na 1m délky trubky	n_z^{VE1}	200 m^{-1}
Rozteč mezi žebry	s_z^{VE1}	5 mm
Výška žebér	h_z^{VE1}	15 mm
Průměr žebér	D_z^{VE1}	68 mm

Tab. 4.26. Parametry potřebné pro návrh VE1

Veličina	Značení	Hodnota
Hmotnostní průtok páry vysokotlakým okruhem	M_{PV}	$19,797 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Teplo předané ve VE1	Q^{VE1}	$5,94 \text{ MW}$
Entalpie spalín v bodě D pilového diagramu	I_{SPI}	$206,4 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Entalpie spalín pro 100°C	I_{SP100}	$133,7 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Entalpie spalín pro 200°C	I_{SP200}	$268,9 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
Teplota spalín v bodě I pilového diagramu	t_I	$153,732^\circ \text{C}$
Teplota páry v bodě 8V pilového diagramu	t_{8V}	140°C
Teplota vody v bodě 9V pilového diagramu	t_{9V}	65°C
Měrný objem vody v bodě 8V pilového diagramu	v_{8V}	$0,0010762 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Měrný objem vody v bodě 9V pilového diagramu	v_{9V}	$0,0010171 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

4.9.2 Počet trubek v jedné podélné řadě VE1

Mezera mezi trubkami (obr. 3.2) pro výpočet podélné rozteče byla zvolena $a^{VE1} = 13 \text{ mm}$ (hodnotu volíme z rozmezí 5 až 15 mm) a příčná rozteč mezi trubkami je potom:

$$s_1^{VE1} = D_{\check{z}}^{VE1} + a^{VE1} = 68 + 13 = 81 \text{ mm}$$

Při návrhu počtu trubek se vychází z upraveného vzorce (3-5):

$$n_{ir}^{VE1} = \frac{\check{s}}{s_1^{VE1}} - \frac{1}{2} = \frac{4,58}{0,081} - \frac{1}{2} = 56,043$$

Byl zvolen počet trubek v podélné řadě $n_{ir}^{VE1} = 56$.

Střední měrný objem páry ve VE1 se vypočte jako průměr hodnot v bodech 8V a 9V:

$$v_P^{VE1} = \frac{v_{8V} + v_{9V}}{2} = \frac{0,0010762 + 0,0010171}{2} = 0,00104665 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

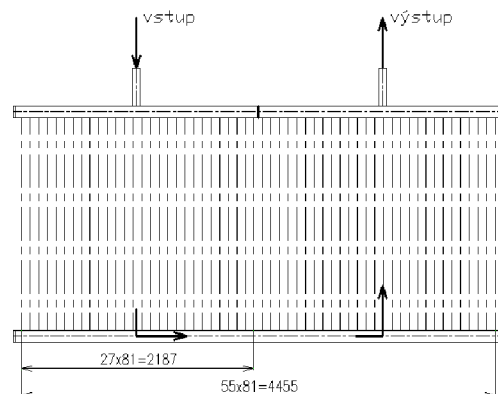
Pro zvolený počet trubek v podélné řadě je nutno zkontrolovat dosažením do vztahu (3-3), jestli vychází rychlost proudění v přípustných mezích pro VE1, tedy $1 \div 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$:

$$w_P^{VE1} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot v_P^{VE1}}{\pi \cdot (d^{VE1})^2 \cdot n_{ir}^{VE1}} =$$

$$= \frac{4 \cdot 0,95 \cdot 19,797 \cdot 0,00104665}{\pi \cdot 0,030^2 \cdot 56} = 0,497 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost proudění při zvoleném počtu trubek je příliš nízká, proto bude rozváděcí kanál rozdělen na dvě části, kde tekutina proudí střídavě, čímž se rychlost proudění zdvojnásobí:

$$w_P^{VE1} = 2 \cdot 0,497 = 0,994 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$



Obr. 4.36. Rozdělený rozváděcí kanál VE1

4.9.3 Výpočet objemového průtoku a rychlosti spalín ve VE1

Výpočet entalpie spalín v bodě J:

$$I_{SPJ} = I_{SPI} - \frac{Q^{VE1}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 206,4 - \frac{5940}{108,264 \cdot (1 - 0,003)} = 151,3kJ$$

Teplota v bodě J pilového diagramu se vypočte interpolací z hodnot entalpií pro teploty 100 až 600°C (viz tab. 2.3) a z vypočtené entalpie v bodě J (jedná se zatím o návrhovou teplotu):

$$t_{JN} = \frac{(I_{SPJ} - I_{SP100}) \cdot 100}{I_{SP200} - I_{SP100}} + 100 = \frac{(151,3 - 133,7) \cdot 100}{268,9 - 133,7} + 100 = 113,054^\circ C$$

Střední teplota proudu spalín pro VE1 se vypočte jako aritmetický průměr hodnot v bodech I a J:

$$t_{SP}^{VE1} = \frac{t_I + t_{JN}}{2} = \frac{153,732 + 113,054}{2} = 133,393^\circ C$$

Výpočet skutečného objemového průtoku spalín ve VE1 dosazením do vzorce (3-4):

$$M_{SPOsk}^{VE1} = M_{SPO} \cdot \frac{t_{SP}^{VE1} + 273,15}{273,15} = 108,264 \cdot \frac{133,393 + 273,15}{273,15} = 161,135 m^3 \cdot s^{-1}$$

Výpočet průtočné plochy spalín pro VE1 dosazením do vzorce (3-6):

$$S_{SP-PR}^{VE1} = l \cdot \check{s} - l \cdot D^{VE1} \cdot n_{tr}^{VE1} - 2 \cdot h_z^{VE1} \cdot t_z \cdot n_z^{VE1} \cdot n_{tr}^{VE1} \cdot l =$$

$$= 11,88 \cdot 4,58 - 11,88 \cdot 0,038 \cdot 56 - 2 \cdot 0,015 \cdot 0,001 \cdot 200 \cdot 56 \cdot 11,88 = 25,138 m^2$$

Výpočet skutečné rychlosti spalín ve VE1 dosazením do vzorce (3-7):

$$w_{SP}^{VE1} = \frac{M_{SPOsk}^{VE1}}{S_{SP-PR}^{VE1}} = \frac{161,135}{25,138} = 6,41 m \cdot s^{-1}$$

4.9.4 Výpočet součinitele přestupu tepla ze strany spalín VE1

Součinitel přestupu tepla ze strany spalín bude vypočítán ze vzorce (4-9).

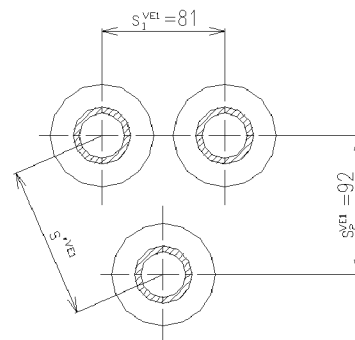
4.9.4.1 Součinitel přestupu tepla konvekce

Podélná rozteč mezi trubkami byla zvolena $s_2^{VE1} = 92mm$ a přeponu s'^{VE1} (viz obr. 4.37) potom lze vypočítat ze vzorce:

$$s'^{VE1} = \sqrt{\left(\frac{s_1^{VE1}}{2}\right)^2 + (s_2^{VE1})^2} = \sqrt{\left(\frac{81}{2}\right)^2 + 92^2} = 100,52mm$$

Nejdříve je nutno vypočítat poměrné podélné rozteče:

- $\sigma_1^{VE1} = \frac{s_1^{VE1}}{D^{VE1}} = \frac{81}{38} = 2,132$,
- $\sigma_2'^{VE1} = \frac{s'^{VE1}}{D^{VE1}} = \frac{100,52}{38} = 2,645$.



Obr. 4.37. Rozteče trubek VE1

Tyto budou dosazeny do vzorce (4-14) pro výpočet poměrných podélných roztečí:

$$\varphi_\sigma^{VE1} = \frac{\sigma_1^{VE1} - 1}{\sigma_2'^{VE1} - 1} = \frac{2,132 - 1}{2,645 - 1} = 0,688$$

Součinitel opravy na počet podélných řad lze určit z [1], obr. 8.4 na str. 116. Je zde předpokládán počet podélných řad přibližně 10, a proto je volena hodnota:

$$c_Z^{VE1} = 1$$

Součinitele tepelné vodivosti spalín a součinitele kinematické viskozity spalín lze určit interpolací z [1], tab. 3-3 na str. 24 pro danou střední teplotu spalín $t_{SP}^{VE1} = 133,393^\circ C$ a objemový podíl vodní páry ve spalínách 9,7%:

- $\lambda_{SP}^{VE1} = 0,034 \cdot W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$,
- $\nu_{SP}^{VE1} = 2,527 \cdot 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}$.

Součinitel přestupu tepla konvekcí je nyní možno spočítat dosazením do vzorce (4-13):

$$\begin{aligned} \alpha_K^{VE1} &= 0,23 \cdot c_Z^{VE1} \cdot (\phi_\sigma^{VE1})^{0,2} \cdot \frac{\lambda_{SP}^{VE1}}{s_Z^{VE1}} \cdot \left(\frac{D^{VE1}}{s_Z^{VE1}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_Z^{VE1}}{s_Z^{VE1}}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{w_{SP}^{VE1} \cdot s_Z^{VE1}}{\nu_{SP}^{VE1}}\right)^{0,65} = \\ &= 0,23 \cdot 1 \cdot 0,688^{0,2} \cdot \frac{0,034}{5 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{0,038}{5 \cdot 10^{-3}}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,015}{5 \cdot 10^{-3}}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{6,41 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{2,527 \cdot 10^{-5}}\right)^{0,65} = \\ &= 43,377 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \end{aligned}$$

4.9.4.2 Součinitel efektivnosti žeber

Pro zjištění součinitele efektivnosti žeber je nutno spočítat součinitel β ze vzorce (4-10):

$$\beta^{VE1} = \sqrt{\frac{2 \cdot \psi_Z \cdot \alpha_K^{VE1}}{t_Z \cdot \lambda_Z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \psi_Z \cdot \alpha_K^{VE1})}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 43,377}{0,001 \cdot 40 \cdot (1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 43,377)}} = 41,436 m^{-1}$$

Hodnotu součinitele E nyní lze zjistit z [1], grafu na str. 114 pomocí součinu $\beta \cdot h_Z^{VE1}$ a poměru

$$\frac{D_Z^{VE1}}{D^{VE1}}:$$

- $\beta^{VE1} \cdot h_Z^{VE1} = 41,436 \cdot 0,015 = 0,622$,
- $\frac{D_Z^{VE1}}{D^{VE1}} = \frac{68}{38} = 1,789$.

Z grafu byla odečtena hodnota:

$$E^{VE1} = 0,87$$

4.9.4.3 Podíly teplosměnných ploch žeber a celkové plochy ze strany spalín

Podíl výhřevných ploch žeber a celkové plochy ze strany spalín pro kruhové trubky s kruhovými žebry se vypočítá ze vzorce (4-11):

$$\frac{S_Z^{VE1}}{S^{VE1}} = \frac{\left(\frac{D_Z^{VE1}}{D^{VE1}}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_Z^{VE1}}{D^{VE1}}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left[\left(\frac{s_Z^{VE1}}{D^{VE1}}\right) - \left(\frac{t_Z}{D^{VE1}}\right)\right]} = \frac{\left(\frac{68}{38}\right)^2 - 1}{\left(\frac{68}{38}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left[\left(\frac{5}{38}\right) - \left(\frac{1}{38}\right)\right]} = 0,913$$

Podíl volných částí trubky, kde nejsou žebra a celkové plochy na straně spalín se vypočítá ze vzorce (4-12):

$$\frac{S_h^{VE1}}{S^{VE1}} = 1 - \frac{S_Z^{VE1}}{S^{VE1}} = 1 - 0,913 = 0,087$$

4.9.4.4 Součinitel přestupu tepla ze strany spalín

Nyní lze vypočtené hodnoty dosadit do vzorce (4-9) a určit hodnotu α_{1r} :

$$\alpha_{1r}^{VE1} = \left(\frac{S_{\dot{z}}^{VE1}}{S^{VE1}} \cdot E^{VE1} \cdot \mu + \frac{S_h^{VE1}}{S^{VE1}} \right) \cdot \frac{\psi_{\dot{z}} \cdot \alpha_K^{VE1}}{1 + \varepsilon \cdot \psi_{\dot{z}} \cdot \alpha_K^{VE1}} = (0,913 \cdot 0,87 \cdot 1 + 0,087) \cdot \frac{0,85 \cdot 43,377}{1 + 0,002 \cdot 0,85 \cdot 43,377} =$$

$$= 36,264 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

4.9.5 Výpočet součinitele prostupu tepla a logaritmického teplotního spádu VE1

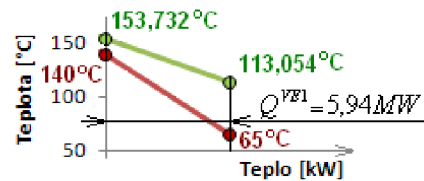
Součinitel prostupu tepla se vypočítá dosazením do (4-7), avšak jelikož se předpokládá vysoká hodnota α_{2r}^{VE1} , tak lze celý člen přibližně uvažovat $\frac{1}{\alpha_{2r}^{VE1}} = 0$, a potom platí:

$$K^{VE2} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1r}^{VE2}} + \varepsilon} = \frac{1}{\frac{1}{36,264} + 0,002} = 28,537 \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

Výpočet logaritmického teplotního spádu dosazením do (4-6):

- $\Delta t_1^{VE1} = t_I - t_{8V} = 153,732 - 140 = 13,732^\circ C$
- $\Delta t_2^{VE1} = t_{JN} - t_{9V} = 113,054 - 65 = 48,054^\circ C$

$$\Delta t_{\ln}^{VE1} = \frac{\Delta t_2^{VE1} - \Delta t_1^{VE1}}{\ln\left(\frac{\Delta t_2^{VE1}}{\Delta t_1^{VE1}}\right)} = \frac{48,054 - 13,732}{\ln\left(\frac{48,054}{13,732}\right)} = 27,4^\circ C$$



Obr. 4.38. Logaritmický teplotní spád VE1

4.9.6 Volba počtu podélných řad VE1

Výpočet celkové teplosměnné plochy ze strany spalín dosazením do (4-5):

$$S_{SP}^{VE1} = \frac{Q^{VE1}}{K^{VE1} \cdot \Delta t_{\ln}^{VE1}} = \frac{5940}{28,537 \cdot 27,4} = 7595 m^2$$

Výpočet teplosměnné plochy ze strany spalín na 1m délky trubky dosazením do (4-3):

$$S_{SP-1m}^{VE1} = \pi \cdot D^{VE1} + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{(D_{\dot{z}}^{VE1})^2 - (D^{VE1})^2}{4} \right) \cdot n_{\dot{z}}^{VE1} = \pi \cdot 0,038 + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,068^2 - 0,038^2}{4} \right) \cdot 200 = 1,118 m$$

Výpočet plochy ze strany spalín na jednu řadu dosazením do (4-2):

$$S_{SP-1r}^{VE1} = S_{SP-1m}^{VE1} \cdot l \cdot n_{tr}^{VE1} = 1,118 \cdot 11,88 \cdot 56 = 744,054 m^2$$

Počet podélných řad pak lze určit dosazením do vzorce (4-1):

$$n_R^{VE1} = \frac{S_{SP}^{VE1}}{S_{SP-1r}^{VE1}} = \frac{7595}{744,054} = 10,207$$

Hodnotu je potřeba zaokrouhlit na celé číslo:

$$n_R^{VE1} = 10$$

4.9.7 Výpočet skutečného předaného tepla ve VE1

Skutečná teplosměnná plocha ze strany spalín při zvoleném počtu řad:

$$S_{SPsk}^{VE1} = S_{SP-1r}^{VE1} \cdot n_R^{VE1} = 744,054 \cdot 10 = 7440,54 m^2$$

Skutečné předané teplo:

$$Q_{sk}^{VE1} = K^{VE1} \cdot S_{SPsk}^{VE1} \cdot \Delta t_{\ln}^{VE1} = 28,537 \cdot 7440,54 \cdot 27,4 = 5,938 MW$$

Původně navržená hodnota předaného tepla byla:

$$Q^{VE1} = 5,94MW$$

Kontrolu, zda rozdíl mezi navrženým a skutečným předaným teplem vychází menší než 5 %, lze provést následujícím vztahem:

$$x_Q^{VE1} = \left| 5 \cdot \frac{Q_{sk}^{VE1} - Q^{VE1}}{Q_{sk}^{VE1} \cdot 0,05} \right| = \left| 5 \cdot \frac{5,938 - 5,94}{5,938 \cdot 0,05} \right| = 2,072\%$$

Jelikož rozdíl vychází 2,072%, zvolený počet řad $n_R^{VE1} = 10$ vyhovuje.

4.9.8 Výpočet skutečné teploty spalín v bodě J

Výpočet skutečné entalpie spalín v bodě J:

$$I_{SPJ} = I_{SP1} - \frac{Q_{sk}^{VE1}}{M_{SPO} \cdot (1 - z_s)} = 206,4 - \frac{5938}{108,264 \cdot (1 - 0,003)} = 152,5kJ$$

Z nové hodnoty entalpie lze nyní určit skutečnou teplotu v bodě J:

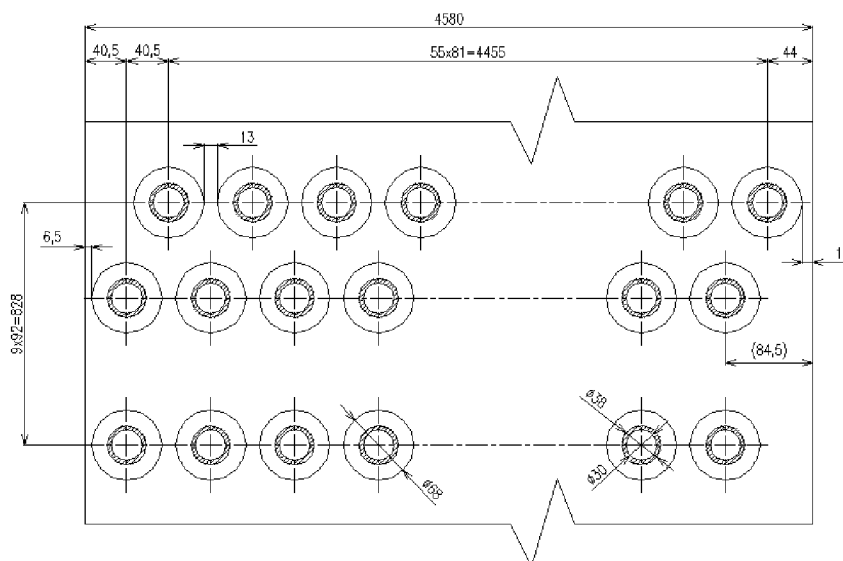
$$t_J = \frac{(I_{SPJ} - I_{SP100}) \cdot 100}{I_{SP200} - I_{SP100}} + 100 = \frac{(152,5 - 133,7) \cdot 100}{268,9 - 133,7} + 100 = 113,88^\circ C$$

4.9.9 Přehled vypočtených hodnot a nákres VE1

Hodnoty vypočtené v této kapitole jsou pro přehled uvedeny v tab. 4.27.

Tab. 4.27. Přehled vypočtených hodnot pro VE1

Veličina	Značení	Hodnota
Počet trubek VE1 v jedné podélné řadě	n_{ir}^{VE1}	56
Počet podélných řad trubek VE1	n_R^{VE1}	10
Příčná rozteč mezi trubkami VE1	s_1^{VE1}	81mm
Podélná rozteč mezi trubkami VE1	s_2^{VE1}	92mm
Rychlost proudění spalín v kanále	w_{SP}^{VE1}	$6,41m \cdot s^{-1}$
Rychlost proudění vody v trubkách VE1	w_P^{VE1}	$0,994m \cdot s^{-1}$
Skutečné předané teplo ve VE1	Q_{sk}^{VE1}	5,938MW
Skutečná teplota spalín v bodě J	t_J	113,88°C



Obr. 4.39. Nákres trubek VE1 ve spalínovém kanále

4.10 Návrh materiálů trubek

Materiály trubek jsou voleny dle norem, kde pro každý materiál je uveden maximální rozsah teplot. Jako vztažnou teplotu pro návrh materiálu trubek bereme vždy vstupní teplotu spalín pro danou výhřevnou plochu rozšířenou o teplotní přídavek: $t_{mat}^i = t_i + \Delta t_{př}^i$.

Teplotní přídávky při ohřevu převážně konvekcí jsou pro přehříváky (VP11, VP1 a NP) $\Delta t_{př}^P = 35^\circ C$, pro ostatní plochy se teplotní přídavek určí podle tloušťky trubky ze vztahu $\Delta t_{př}^{V-E} = (15 + 2 \cdot t_{tr})^\circ C$, max. se však uvažuje hodnota $\Delta t_{př}^{V-E} = 50^\circ C$. Protože tloušťka všech těchto trubek je stejná, přídavek pro všechny ostatní plochy je tedy:

$$\Delta t_{př}^{V-E} = 15 + 2 \cdot t_{tr} = 15 + 2 \cdot 4 = 23^\circ C$$

Pro žebra se při teplotách do $800^\circ C$ volí materiál X10Cr13.

Teploty jednotlivých výhřevných ploch potřebné pro zvolení materiálu a zvolené materiály trubek jsou uvedeny v tab. 4.28.

Tab. 4.28. Volba materiálů trubek

Výhřevná plocha	Vstupní teplota spalín t_i [$^\circ C$]	Teplotní přídavek $\Delta t_{př}^i$ [$^\circ C$]	Vztažná teplota pro výběr materiálu Δt_{mat}^i [$^\circ C$]	Zvolený materiál trubky (norma EN)
VP11	569	35	604	X6CrNiTi18-10
VP1	537,94	35	572,94	13CrMo4-5
VV	479,36	23	502,36	16Mo3
VE3	284,636	23	307,636	P265GH
NP	220,66	35	255,66	P265GH
NV	220,017	23	243,017	P265GH
VE2	171,45	23	194,45	P265GH
NV	161,935	23	184,935	P265GH
VE1	153,732	23	176,732	P265GH

4.11 Návrh rozměrů vstupních a výstupních potrubí výhřevných ploch

Rozměry vstupních a výstupních potrubí jednotlivých výhřevných ploch (vnější průměr D_{vy} , tloušťka stěny t_{vy} a vnitřní průměr $d_{vy} = D_{vy} - 2 \cdot t_{vy}$) jsou voleny především s přihlédnutím k doporučené rychlosti proudění páry, vychází se přitom ze vzorce (3-3), kde $n_{tr} = 1$.

$$w_p = \frac{4 \cdot M_{pv} \cdot v_p}{\pi \cdot d^2} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{4 \cdot M_{pv} \cdot v_p}{\pi \cdot w_p}} \quad (4-23)$$

Pro vstupní a výstupní potrubí u přehříváků je volena rychlost proudění $w_p^P = 25 m \cdot s^{-1}$, u ekonomizérů potom $w_p^E = (1 \div 1,5) m \cdot s^{-1}$. Podle volené rychlosti je vypočítána přibližná hodnota vnitřního průměru potrubí, která je dále zaokrouhlena na nejbližší hodnotu z tabulky vyráběných rozměrů trubek. Pro zvolený vnitřní průměr trubky je poté ověřeno, zda rychlost proudění u ekonomizérů vychází přibližně v rozmezí $w_p^E = (1 \div 3) m \cdot s^{-1}$ a u přehříváků přibližně v rozmezí $w_p^P = (20 \div 30) m \cdot s^{-1}$. Hodnoty měrných objemů a průtoků potřebné pro výpočet jsou uvedeny v tab. 4.29.

Tab. 4.29. Měrné objemy vody/páry v jednotlivých bodech pilového diagramu

Veličina	Značení	Hodnota
Měrný objem páry v bodě 1V	v_{1V}	$0,0602664m^3 \cdot kg^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 2V	v_{2V}	$0,0485803m^3 \cdot kg^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 3V	v_{3V}	$0,0546786m^3 \cdot kg^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 4V	v_{4V}	$0,0336587m^3 \cdot kg^{-1}$
Měrný objem vody v bodě 5V	v_{5V}	$0,00131275m^3 \cdot kg^{-1}$
Měrný objem vody v bodě 6V	v_{6V}	$0,0012974m^3 \cdot kg^{-1}$
Měrný objem vody v bodě 7V	v_{7V}	$0,0010959m^3 \cdot kg^{-1}$
Měrný objem vody v bodě 8V	v_{8V}	$0,0010762m^3 \cdot kg^{-1}$
Měrný objem vody v bodě 9V	v_{9V}	$0,0010171m^3 \cdot kg^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 1N	v_{1N}	$0,3932049m^3 \cdot kg^{-1}$
Měrný objem páry v bodě 2N	v_{2N}	$0,2923977m^3 \cdot kg^{-1}$
Měrný objem vody v bodě 3N	v_{3N}	$0,0011044m^3 \cdot kg^{-1}$
Měrný objem vody v bodě 4N	v_{4N}	$0,0010926m^3 \cdot kg^{-1}$
Měrný objem vody v bodě 5N	v_{5N}	$0,0010195m^3 \cdot kg^{-1}$
Hmotnostní průtok páry nizkotlakým okruhem	M_{PN}	$3,272kg \cdot s^{-1}$
Hmotnostní průtok páry vysokotlakým okruhem	M_{PV}	$19,797kg \cdot s^{-1}$

4.11.1 Výstupní potrubí VPII

Navržená hodnota dosazením do (4-23):

$$d_{vy}^{VPII} = \sqrt{\frac{4 \cdot M_{PV} \cdot v_{1V}}{\pi \cdot w_p^p}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 19,797 \cdot 0,0602664}{\pi \cdot 25}} = 0,2465m$$

Z tabulky byly vybrány následující hodnoty pro výstupní potrubí VPII:

- $D_{vy}^{VPII} = 273mm$
- $t_{vy}^{VPII} = 10mm$
- $d_{vy}^{VPII} = D_{vy}^{VPII} - 2 \cdot t_{vy}^{VPII} = 273 - 2 \cdot 10 = 253mm$

Přepočít skutečné rychlosti proudění pro zvolený rozměr potrubí:

$$w_{P-vy}^{VPII} = \frac{4 \cdot M_{PV} \cdot v_{1V}}{\pi \cdot (d_{vy}^{VPII})^2} = \frac{4 \cdot 19,797 \cdot 0,0602664}{\pi \cdot 0,253^2} = 23,7325m \cdot s^{-1}$$

Rychlost proudění pro zvolené rozměry potrubí vyhovuje.

4.11.2 Výstupní potrubí VPI a vstupní potrubí VPII

Navržená hodnota dosazením do (4-23):

$$d_{vy}^{VPI} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot \frac{v_{2V} + v_{3V}}{2}}{\pi \cdot w_p^p}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot 19,797 \cdot \frac{0,0485803 + 0,0546786}{2}}{\pi \cdot 25}} = 0,222m$$

Z tabulky byly vybrány následující hodnoty pro výstupní potrubí VPI:

- $D_{vy}^{VPI} = 244,5mm$
- $t_{vy}^{VPI} = 10mm$
- $d_{vy}^{VPI} = D_{vy}^{VPI} - 2 \cdot t_{vy}^{VPI} = 244,5 - 2 \cdot 10 = 224,5mm$

Přepoččet skutečné rychlosti proudění pro zvolený rozměr potrubí:

$$w_{P-vy}^{VPI} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot \frac{v_{2V} + v_{3V}}{2}}{\pi \cdot (d_{vy}^{VPI})^2} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot 19,797 \cdot \frac{0,0485803 + 0,0546786}{2}}{\pi \cdot 0,2245^2} = 24,53m \cdot s^{-1}$$

Rychlost proudění pro zvolené rozměry potrubí vyhovuje.

4.11.3 Vstupní potrubí VPI

Navržená hodnota dosazením do (4-23):

$$d_{vs}^{VPI} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot v_{4V}}{\pi \cdot w_p^P}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot 19,797 \cdot 0,0336587}{\pi \cdot 25}} = 0,179m$$

Z tabulky byly vybrány následující hodnoty pro vstupní potrubí VPI:

- $D_{vs}^{VPI} = 193,7mm$
- $t_{vs}^{VPI} = 10mm$
- $d_{vs}^{VPI} = D_{vs}^{VPI} - 2 \cdot t_{vs}^{VPI} = 193,7 - 2 \cdot 10 = 173,7mm$

Přepoččet skutečné rychlosti proudění pro zvolený rozměr potrubí:

$$w_{P-vs}^{VPI} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot v_{4V}}{\pi \cdot (d_{vs}^{VPI})^2} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot 19,797 \cdot 0,0336587}{\pi \cdot 0,1737^2} = 26,7m \cdot s^{-1}$$

Rychlost proudění pro zvolené rozměry potrubí vyhovuje.

4.11.4 Výstupní potrubí VE3

Navržená hodnota dosazením do (4-23):

$$d_{vy}^{VE3} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot \frac{v_{5V} + v_{6V}}{2}}{\pi \cdot w_p^E}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot 19,797 \cdot \frac{0,00131275 + 0,0012974}{2}}{\pi \cdot 1,5}} = 0,144m$$

Z tabulky byly vybrány následující hodnoty pro výstupní potrubí VE3:

- $D_{vy}^{VE3} = 168,3mm$
- $t_{vy}^{VE3} = 10mm$
- $d_{vy}^{VE3} = D_{vy}^{VE3} - 2 \cdot t_{vy}^{VE3} = 168,3 - 2 \cdot 10 = 148,3mm$

Přepoččet skutečné rychlosti proudění pro zvolený rozměr potrubí:

$$w_{P-vy}^{VE3} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot \frac{v_{5V} + v_{6V}}{2}}{\pi \cdot (d_{vy}^{VE3})^2} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot 19,797 \cdot \frac{0,00131275 + 0,0012974}{2}}{\pi \cdot 0,1483^2} = 1,42m \cdot s^{-1}$$

Rychlost proudění pro zvolené rozměry potrubí vyhovuje.

4.11.5 Výstupní potrubí VE2 a vstupní potrubí VE3

Navržená hodnota dosazením do (4-23):

$$d_{vy}^{VE2} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot v_{7V}}{\pi \cdot w_p^E}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot 19,797 \cdot 0,0010959}{\pi \cdot 1,5}} = 0,132m$$

Z tabulky byly vybrány následující hodnoty pro výstupní potrubí VE2:

- $D_{vy}^{VE2} = 152,4mm$
- $t_{vy}^{VE2} = 10mm$
- $d_{vy}^{VE2} = D_{vy}^{VE2} - 2 \cdot t_{vy}^{VE2} = 152,4 - 2 \cdot 10 = 132,4mm$

Přepoččet skutečné rychlosti proudění pro zvolený rozměr potrubí:

$$w_{P-vy}^{VE2} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot v_{7V}}{\pi \cdot (d_{vy}^{VE2})^2} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot 19,797 \cdot 0,0010959}{\pi \cdot 0,1324^2} = 1,497m \cdot s^{-1}$$

Rychlost proudění pro zvolené rozměry potrubí vyhovuje.

4.11.6 Výstupní potrubí VE1 a vstupní potrubí VE2

Navržená hodnota dosazením do (4-23):

$$d_{vy}^{VE1} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot v_{8V}}{\pi \cdot w_p^E}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot 19,797 \cdot 0,0010762}{\pi \cdot 1,5}} = 0,131m$$

Z tabulky byly vybrány následující hodnoty pro výstupní potrubí VE1:

- $D_{vy}^{VE1} = 152,4mm$
- $t_{vy}^{VE1} = 10mm$
- $d_{vy}^{VE1} = D_{vy}^{VE1} - 2 \cdot t_{vy}^{VE1} = 152,4 - 2 \cdot 10 = 132,4mm$

Přepoččet skutečné rychlosti proudění pro zvolený rozměr potrubí:

$$w_{P-vy}^{VE1} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot v_{8V}}{\pi \cdot (d_{vy}^{VE1})^2} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot 19,797 \cdot 0,0010762}{\pi \cdot 0,1324^2} = 1,47m \cdot s^{-1}$$

Rychlost proudění pro zvolené rozměry potrubí vyhovuje.

4.11.7 Vstupní potrubí VE1

Navržená hodnota dosazením do (4-23):

$$d_{vs}^{VE1} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot v_{9V}}{\pi \cdot w_p^E}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,95 \cdot 19,797 \cdot 0,0010171}{\pi \cdot 1,5}} = 0,127m$$

Z tabulky byly vybrány následující hodnoty pro vstupní potrubí VE1:

- $D_{vs}^{VE1} = 152,4mm$
- $t_{vs}^{VE1} = 10mm$
- $d_{vs}^{VE1} = D_{vs}^{VE1} - 2 \cdot t_{vs}^{VE1} = 152,4 - 2 \cdot 10 = 132,4mm$

Přepoččet skutečné rychlosti proudění pro zvolený rozměr potrubí:

$$w_{P-vs}^{VE1} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot M_{PV} \cdot v_{9V}}{\pi \cdot (d_{vs}^{VE1})^2} = \frac{4 \cdot 0,95 \cdot 19,797 \cdot 0,0010171}{\pi \cdot 0,1324^2} = 1,39m \cdot s^{-1}$$

Rychlost proudění pro zvolené rozměry potrubí vyhovuje.

4.11.8 Výstupní potrubí NP

Navržená hodnota dosažením do (4-23):

$$d_{vy}^{NP} = \sqrt{\frac{4 \cdot M_{PN} \cdot v_{1N}}{\pi \cdot w_p^p}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,272 \cdot 0,3932049}{\pi \cdot 25}} = 0,256m$$

Z tabulky byly vybrány následující hodnoty pro výstupní potrubí NP:

- $D_{vy}^{NP} = 273mm$
- $t_{vy}^{NP} = 10mm$
- $d_{vy}^{NP} = D_{vy}^{NP} - 2 \cdot t_{vy}^{NP} = 273 - 2 \cdot 10 = 253mm$

Přepočít skutečné rychlosti proudění pro zvolený rozměr potrubí:

$$w_{p-vy}^{NP} = \frac{4 \cdot M_{PN} \cdot v_{1N}}{\pi \cdot (d_{vy}^{NP})^2} = \frac{4 \cdot 3,272 \cdot 0,3932049}{\pi \cdot 0,253^2} = 25,6m \cdot s^{-1}$$

Rychlost proudění pro zvolené rozměry potrubí vyhovuje.

4.11.9 Vstupní potrubí NP

Navržená hodnota dosažením do (4-23):

$$d_{vs}^{NP} = \sqrt{\frac{4 \cdot M_{PN} \cdot v_{2N}}{\pi \cdot w_p^p}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,272 \cdot 0,2923977}{\pi \cdot 25}} = 0,221m$$

Z tabulky byly vybrány následující hodnoty pro vstupní potrubí NP:

- $D_{vs}^{NP} = 244,5mm$
- $t_{vs}^{NP} = 10mm$
- $d_{vs}^{NP} = D_{vs}^{NP} - 2 \cdot t_{vs}^{NP} = 244,5 - 2 \cdot 10 = 224,5mm$

Přepočít skutečné rychlosti proudění pro zvolený rozměr potrubí:

$$w_{p-vs}^{NP} = \frac{4 \cdot M_{PN} \cdot v_{2N}}{\pi \cdot (d_{vs}^{NP})^2} = \frac{4 \cdot 3,272 \cdot 0,2923977}{\pi \cdot 0,2245^2} = 24,17m \cdot s^{-1}$$

Rychlost proudění pro zvolené rozměry potrubí vyhovuje.

4.11.10 Výstupní potrubí NE

Navržená hodnota dosažením do (4-23):

$$d_{vy}^{NE} = \sqrt{\frac{4 \cdot M_{PN} \cdot \frac{v_{3N} + v_{4N}}{2}}{\pi \cdot w_p^{E-V}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,272 \cdot \frac{0,0011044 + 0,0010926}{2}}{\pi \cdot 1}} = 0,068m$$

Z tabulky byly vybrány následující hodnoty pro výstupní potrubí NE:

- $D_{vy}^{NE} = 88,9mm$
- $t_{vy}^{NE} = 10mm$
- $d_{vy}^{NE} = D_{vy}^{NE} - 2 \cdot t_{vy}^{NE} = 88,9 - 2 \cdot 10 = 68,9mm$

Přepočít skutečné rychlosti proudění pro zvolený rozměr potrubí:

$$w_{p-vy}^{NE} = \frac{4 \cdot M_{PN} \cdot \frac{v_{3N} + v_{4N}}{2}}{\pi \cdot (d_{vy}^{NE})^2} = \frac{4 \cdot 3,272 \cdot \frac{0,0011044 + 0,0010926}{2}}{\pi \cdot 0,0689^2} \doteq 1m \cdot s^{-1}$$

Rychlost proudění pro zvolené rozměry potrubí vyhovuje.

4.11.11 Vstupní potrubí NE

Navržená hodnota dosažením do (4-23):

$$d_{vs}^{NP} = \sqrt{\frac{4 \cdot M_{PN} \cdot v_{SN}}{\pi \cdot w_p^{E-V}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,272 \cdot 0,0010195}{\pi \cdot 1}} = 0,0652m$$

Z tabulky byly vybrány následující hodnoty pro vstupní potrubí NE:

- $D_{vs}^{NE} = 88,9mm$
- $t_{vs}^{NE} = 12,5mm$
- $d_{vs}^{NE} = D_{vs}^{NE} - 2 \cdot t_{vs}^{NE} = 88,9 - 2 \cdot 12,5 = 63,9mm$

Přepočet skutečné rychlosti proudění pro zvolený rozměr potrubí:

$$w_{P-vs}^{NE} = \frac{4 \cdot M_{PN} \cdot v_{SN}}{\pi \cdot (d_{vs}^{NE})^2} = \frac{4 \cdot 3,272 \cdot 0,0010195}{\pi \cdot 0,0639^2} = 1,04m \cdot s^{-1}$$

Rychlost proudění pro zvolené rozměry potrubí vyhovuje.

4.11.12 Přehled vypočtených rozměrů

Vypočtené rozměry trubek jsou uvedeny v tab. 4.30.

Tab. 4.30. Rozměry vstupních a výstupních potrubí

	Vnější průměr D^i [mm]	Tloušťka trubky t^i [mm]	Vnitřní průměr d^i [mm]
Výstupní potrubí VP11	273	10	253
Výstupní potrubí VPI	244,5	10	224,5
Vstupní potrubí VPI	193,7	10	173,7
Výstupní potrubí VE3	168,3	10	148,3
Výstupní potrubí VE2	152,4	10	132,4
Výstupní potrubí VE1	152,4	10	132,4
Vstupní potrubí VE1	152,4	10	132,4
Výstupní potrubí NP	273	10	253
Vstupní potrubí NP	244,5	10	224,5
Výstupní potrubí NE	88,9	10	68,9
Vstupní potrubí NE	88,9	12,5	63,9

5 Návrh bubnů

Vnější průměr bubnu D_{Bu} se volí podle hmotnostního průtoku, kdy platí:

- pro průtok $M_p \leq 15t \cdot h^{-1}$ se volí průměr $D_{Bu} = 1200mm$,
- pro $M_p = (15 \div 60)t \cdot h^{-1}$ se volí průměr $D_{Bu} = 1400mm$,
- pro $M_p > 60t \cdot h^{-1}$ se volí průměr $D_{Bu} = 1600mm$.

Délka bubnu l_{Bu} se bere rovna šířce kanálu \check{s} . Tloušťka stěny bubnu se volí z rozmezí $t_{Bu} = 40 \div 120mm$ a vnitřní průměr se poté dopočítá ze vztahu $d_{Bu} = D_{Bu} - 2 \cdot t_{Bu}$.

Pro navržené hodnoty se poté vypočítá **zatížení bubnu** z_{Bu} :

$$z_{Bu} = \frac{M_p}{V_{Bu}}, \text{ kde:} \quad (5-1)$$

- V_{Bu} je polovina objemu bubnu.

Toto zatížení musí poté vyjít menší než běžné zatížení z_{Bu-B} , jehož hodnota je zjištěna z tabulky pro odpovídající tlak v bubnu.

5.1 Návrh rozměrů a kontrola zatížení vysokotlakého bubnu

Pro $M_{pV} = 19,797kg \cdot s^{-1} = 71,27t \cdot h^{-1}$ jsou voleny tyto rozměry bubnu:

- $D_{Bu}^V = 1600mm$,
- $t_{Bu}^V = 40mm$,
- $d_{Bu}^V = D_{Bu}^V - 2 \cdot t_{Bu}^V = 1600 - 2 \cdot 40 = 1520mm$,
- $l_{Bu}^V = \check{s} = 4,58m$.

Poloviční objem bubnu se vypočítá ze vztahu:

$$V_{Bu}^V = \frac{\pi \cdot (d_{Bu}^V)^2}{4} \cdot \frac{l_{Bu}^V}{2} = \frac{\pi \cdot 1,52^2}{4} \cdot \frac{4,58}{2} = 4,155m^3$$

Zatížení bubnu se vypočítá ze vzorce (5-1):

$$z_{Bu}^V = \frac{M_{pV}}{V_{Bu}^V} = \frac{19,797}{4,155} = 4,764kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$$

Tlak v bubnu je uvažován roven tlaku ve vysokotlakém výparníku $p_{Bu}^V = p_{AV} = 5,8Mpa$ a pro tuto hodnotu se interpolací z tabulky odečte hodnota běžného zatížení bubnu:

$$z_{Bu-B}^V = 6,328kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$$

Navržený buben vyhovuje, neboť platí, že vypočtené zatížení je menší než běžné:

$$z_{Bu}^V = 4,764kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1} \leq z_{Bu-B}^V = 6,328kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$$

5.2 Návrh rozměrů a kontrola zatížení nízkotlakého bubnu

Pro $M_{PN} = 3,272 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 11,78 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ jsou voleny tyto rozměry bubnu:

- $D_{Bu}^N = 1200 \text{ mm}$,
- $t_{Bu}^N = 40 \text{ mm}$,
- $d_{Bu}^N = D_{Bu}^N - 2 \cdot t_{Bu}^N = 1600 - 2 \cdot 40 = 1120 \text{ mm}$,
- $l_{Bu}^N = \check{s} = 4,58 \text{ m}$.

Poloviční objem bubnu se vypočítá ze vzorce:

$$V_{Bu}^N = \frac{\pi \cdot (d_{Bu}^N)^2}{4} \cdot \frac{l_{Bu}^N}{2} = \frac{\pi \cdot 1,12^2}{4} \cdot \frac{4,58}{2} = 2,256 \text{ m}^3$$

Zatížení bubnu se vypočítá ze vzorce (5-1):

$$z_{Bu}^N = \frac{M_{PN}}{V_{Bu}^N} = \frac{3,272}{2,256} = 1,45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$$

Tlak v bubnu je uvažován roven tlaku v nízkotlakém výparníku $p_{Bu}^N = p_{2N} = 0,65 \text{ Mpa}$ a pro tuto hodnotu se interpolací z tabulky odečte hodnota běžného zatížení bubnu:

$$z_{Bu-B}^N = 2,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$$

Navržený buben vyhovuje, neboť platí, že vypočtené zatížení je menší než běžné:

$$z_{Bu}^N = 1,45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1} \leq z_{Bu-B}^N = 2,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$$

6 Návrh rozměrů zavodňovacích potrubí

Při návrhu se vychází ze součtu průtočných průřezů všech varných trubek S_{0V} a poměru průřezů zavodňovacích a varných trubek $\frac{S_{0Z}}{S_{0V}}$, který se vypočítá z empirického vzorce:

$$\frac{S_{0Z}}{S_{0V}} = 0,06 + 0,016 \cdot p_{Bu} + 0,005 \cdot h_p, \text{ kde:} \quad (6-1)$$

- h_p [m] je přibližná výška umístění bubnu.

Do vzorce (6-1) se za p_{Bu} dosazuje hodnota v řádu [MPa] a za h_p se dosazuje hodnota v řádu [m], avšak obě hodnoty se do vzorce dosazují bez jednotek, tedy pouze číselně.

Přibližná výška umístění bubnů se zvolí ze vztahu:

$$h_p = l + 3 = 11,88 + 3 = 14,88m$$

Z poměru $\frac{S_{0Z}}{S_{0V}}$ lze poté vypočítat součet průtočných průřezů všech zavodňovacích trubek S_{0Z} , pro který se zvolí počet zavodňovacích trubek n_{1Z} a z tabulky se zvolí velikost vnějšího průměru D_Z , tloušťky trubky t_Z a dopočítá se vnitřní průměr $d_Z = D_Z - 2 \cdot t_Z$.

6.1 Návrh rozměrů zavodňovacího potrubí pro vysokotlaký okruh

Výpočet průtočných průřezů všech varných trubek:

$$S_{0V}^V = \frac{\pi \cdot (d^{VV})^2}{4} \cdot n_{1r}^{VV} \cdot n_R^{VV} = \frac{\pi \cdot 0,049^2}{4} \cdot 44 \cdot 17 = 1,411m^2$$

Výpočet poměru průřezů zavodňovacích a varných trubek:

$$\frac{S_{0Z}^V}{S_{0V}^V} = 0,06 + 0,016 \cdot p_{Bu}^V + 0,005 \cdot h_p = 0,06 + 0,016 \cdot 5,8 + 0,005 \cdot 14,88 = 0,227$$

Výpočet průtočných průřezů všech zavodňovacích trubek:

$$S_{0Z}^V = \frac{S_{0Z}^V}{S_{0V}^V} \cdot S_{0V}^V = 0,227 \cdot 1,411 = 0,32m^2$$

Volba počtu zavodňovacích trubek:

$$n_{1Z}^V = 4$$

Výpočet průtočného průřezu jedné zavodňovací trubky:

$$S_{1Z}^V = \frac{S_{0Z}^V}{n_{1Z}^V} = \frac{0,32}{4} = 0,08m^2$$

Návrh vnitřního průměru zavodňovací trubky:

$$d_Z^V = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{1Z}^V}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,08}{\pi}} = 0,319m$$

Z tabulky byly vybrány následující rozměry zavodňovacích trubek:

- $D_Z^V = 355,6mm$
- $t_Z^V = 20mm$
- $d_Z^V = D_Z^V - 2 \cdot t_Z^V = 355,6 - 2 \cdot 20 = 315,6mm$

6.2 Návrh rozměrů zavodňovacího potrubí pro nízkotlaký okruh

Výpočet průtočných průřezů všech varných trubek:

$$S_{0V}^N = \frac{\pi \cdot (d^{NV})^2}{4} \cdot n_{ir}^{NV} \cdot n_R^{NV} = \frac{\pi \cdot 0,049^2}{4} \cdot 44 \cdot 10 = 0,83m^2$$

Výpočet poměru průřezů zavodňovacích a varných trubek:

$$\frac{S_{0Z}^N}{S_{0V}^N} = 0,06 + 0,016 \cdot p_{Bu}^N + 0,005 \cdot h_p = 0,06 + 0,016 \cdot 0,65 + 0,005 \cdot 14,88 = 0,145$$

Výpočet průtočných průřezů všech zavodňovacích trubek:

$$S_{0Z}^N = \frac{S_{0Z}^N}{S_{0V}^N} \cdot S_{0V}^N = 0,145 \cdot 0,83 = 0,12m^2$$

Volba počtu zavodňovacích trubek:

$$n_{irZ}^N = 2$$

Výpočet průtočného průřezu jedné zavodňovací trubky:

$$S_{1Z}^N = \frac{S_{0Z}^N}{n_{irZ}^N} = \frac{0,12}{2} = 0,06m^2$$

Návrh vnitřního průměru zavodňovací trubky:

$$d_Z^N = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{1Z}^N}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,06}{\pi}} = 0,277m$$

Z tabulky byly vybrány následující rozměry zavodňovacích trubek:

- $D_Z^N = 323,9mm$
- $t_Z^N = 20mm$
- $d_Z^N = D_Z^N - 2 \cdot t_Z^N = 323,9 - 2 \cdot 20 = 283,9mm$

7 Návrh rozměrů převáděcích potrubí

Při návrhu se vychází ze součtu průtočných průřezů převáděcích trubek S_{0P} , který se určí z empirického vztahu:

$$S_{0P} = (0,1 + 0,01 \cdot p_{Bu} + 0,01 \cdot h_p) \cdot S_{0V} \quad (7-1)$$

Do vzorce (7-1) se za p_{Bu} dosazuje hodnota v řádu [MPa] a za $h_p = 14,38m$ (viz předchozí kapitola) se dosazuje hodnota v řádu [m], avšak obě hodnoty se do vzorce dosazují bez jednotek, tedy pouze číselně.

Pro vypočtený součet průtočných průřezů převáděcích trubek S_{0P} se zvolí počet převáděcích trubek n_{irp} a z tabulky se zvolí velikost vnějšího průměru D_p , tloušťky trubky t_p a dopočítá se vnitřní průměr $d_p = D_p - 2 \cdot t_p$.

7.1 Návrh rozměrů převáděcího potrubí pro vysokotlaký okruh

Výpočet průtočných průřezů všech převáděcích trubek:

$$S_{0P}^V = (0,1 + 0,01 \cdot p_{Bu}^V + 0,01 \cdot h_p) \cdot S_{0V}^V = (0,1 + 0,01 \cdot 5,8 + 0,01 \cdot 14,88) \cdot 1,411 = 0,433m^2$$

Volba počtu převáděcích trubek:

$$n_{irp}^V = 20$$

Výpočet průtočného průřezu jedné převáděcí trubky:

$$S_{1P}^V = \frac{S_{0P}^V}{n_{irp}^V} = \frac{0,433}{20} = 0,022m^2$$

Návrh vnitřního průměru převáděcí trubky:

$$d_p^V = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{1P}^V}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,022}{\pi}} = 0,166m$$

Z tabulky byly vybrány následující rozměry převáděcích trubek:

- $D_p^V = 177,8mm$
- $t_p^V = 7,1mm$
- $d_p^V = D_p^V - 2 \cdot t_p^V = 177,8 - 2 \cdot 7,1 = 163,6mm$

7.2 Návrh rozměrů převáděcího potrubí pro nízkotlaký okruh

Výpočet průtočných průřezů všech převáděcích trubek:

$$S_{0P}^N = (0,1 + 0,01 \cdot p_{Bu}^N + 0,01 \cdot h_p) \cdot S_{0V}^N = (0,1 + 0,01 \cdot 0,65 + 0,01 \cdot 14,88) \cdot 0,83 = 0,212m^2$$

Volba počtu převáděcích trubek:

$$n_{trP}^N = 12$$

Výpočet průtočného průřezu jedné převáděcí trubky:

$$S_{1P}^N = \frac{S_{0P}^N}{n_{trP}^N} = \frac{0,212}{12} = 0,018m^2$$

Návrh vnitřního průměru převáděcí trubky:

$$d_p^N = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{1P}^N}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,018}{\pi}} = 0,15m$$

Z tabulky byly vybrány následující rozměry převáděcích trubek:

- $D_p^N = 168,3mm$
- $t_p^N = 10mm$
- $d_p^N = D_p^N - 2 \cdot t_p^N = 168,3 - 2 \cdot 10 = 148,3mm$

8 Výpočet tahové ztráty kotle

Celková tahová ztráta Δp_{zC} se vypočítá jako součet tlakových ztrát na jednotlivých výhřevných plochách a ztráty v komíně. Tato hodnota musí vycházet nižší, než maximální dovolená hodnota tahové ztráty $\Delta p_{zD} = 2000 Pa$. Výpočet je proveden především s užitím lit. [2].

8.1 Výpočet tlakových ztrát jednotlivých výhřevných ploch

Tlaková ztráta svazku hladkých trubek se vypočítá ze vzorce:

$$\Delta p_z = \Delta p_1 \cdot x_3 \cdot x_4, \text{ kde} \quad (8-1)$$

- Δp_1 [Pa] je tlaková diference závislá na rychlosti průtoku spalín,
- x_3 [-] je opravný koeficient závislý na roztečích mezi trubkami,
- x_4 [-] je opravný koeficient závislý na teplotě stěny a proudu spalín.

Tlaková ztráta svazku žebrovaných trubek se vypočítá ze vzorce:

$$\Delta p_z = \zeta \cdot \frac{(w_{SP})^2}{2} \cdot \rho_{SP}, \text{ kde} \quad (8-2)$$

- ζ [-] je součinitel tlakové ztráty pro svazek žebrovaných trubek při kolmém proudění,
- $\rho_{SP} = 1,269 kg \cdot m^{-3}$ je hustota spalín, viz kap. 2.2.2.

Součinitel tlakové ztráty pro svazek žebrovaných trubek se vypočítá ze vzorce:

$$\zeta = k_4 \cdot n_R \cdot \left(\frac{h_z}{d}\right)^{k_1} \cdot \left(\frac{s_z}{d}\right)^{-k_2} \cdot (Re_s)^{-k_3}, \text{ kde} \quad (8-3)$$

- k_1 [-], k_2 [-], k_3 [-], k_4 [-] jsou konstanty, které závisí na uspořádání trubek, pro vystřídání uspořádání trubek se volí hodnoty $k_1 = 0$, $k_2 = 0,72$, $k_3 = 0,24$ a $k_4 = 2$,
- Re_s [-] je Reynoldsovo číslo vztažené na střední teplotu zanešeného povrchu stěny.

Reynoldsovo číslo lze vypočítat ze vztahu:

$$Re_s = \frac{w_{SP} \cdot d_e}{\nu_s}, \text{ kde} \quad (8-4)$$

- ν_s [$m^2 \cdot s^{-1}$] je součinitel dynamické viskozity spalín vztažený na střední teplotu stěny,
- d_e [m] je ekvivalentní průměr.

Ekvivalentní průměr lze vypočítat ze vztahu:

$$d_e = \frac{4 \cdot S_{pr}}{o}, \text{ kde} \quad (8-5)$$

- S_{pr} [m^2] je průtočná plocha kotle,
- o [m] je obvod průtočné plochy kotle.

Pro ekvivalentní průměr spalínového kanálu platí:

$$d_e^{kan} = \frac{4 \cdot \check{s} \cdot l}{2 \cdot (\check{s} + l)} = \frac{2 \cdot \check{s} \cdot l}{\check{s} + l} = \frac{2 \cdot 4,58 \cdot 11,88}{4,58 + 11,88} = 6,611 m$$

Při spalování plynu se pro všechny výhřevné plochy volí $\Delta t = 25^\circ\text{C}$ a **střední teplota zanešeného povrchu stěny** se potom určí ze vztahu:

$$t_z = t_p + \Delta t, \text{ kde} \quad (8-6)$$

- t_p [$^\circ\text{C}$] je střední teplota vody nebo páry pro danou teplosměnnou plochu.

Hodnoty vypočtených Reynoldsových čísel včetně veličin potřebných pro jejich výpočet a ostatní hodnoty potřebné pro výpočet tlakových ztrát jsou uvedeny v tab. 8.1.

Tab. 8.1. Parametry výhřevných ploch pro výpočet tlakových ztrát

	střední teplota povrchu u stěny t_z^i [$^\circ\text{C}$]	součinitel dynamické viskozity spalín ν_s^i [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]	rychlost spalín w_{SP}^i [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	Reynoldsovo číslo vztahené na stř. teplotu povrchu stěny Re_s^i [-]	výška žebra h_z^i [mm]	vnější průměr D^i [mm]	rozeč žeber s_z^i [mm]	počet řad n_R^i [-]
VPII	455,58	$6,924 \cdot 10^{-5}$	14,988	$1,431 \cdot 10^6$	14	44,5	5,26	2
VPI	381,82	$5,775 \cdot 10^{-5}$	14,425	$1,652 \cdot 10^6$	14	38	5,26	3
VV	295,88	$4,526 \cdot 10^{-5}$	12,318	$1,799 \cdot 10^6$	17	57	5	17
VE3	238,19	$3,776 \cdot 10^{-5}$	8,501	$1,488 \cdot 10^6$	13	31,8	5	12
NP	190,5	-	5,773	-	-	54	-	1
NV	182	$3,077 \cdot 10^{-5}$	8,928	$1,918 \cdot 10^6$	18	57	5	10
VE2	174	$2,986 \cdot 10^{-5}$	7,393	$1,637 \cdot 10^6$	15	38	5	4
NE	133,5	$2,529 \cdot 10^{-5}$	5,414	$1,415 \cdot 10^6$	15	22	5,88	2
VE1	127,5	$2,461 \cdot 10^{-5}$	6,41	$1,722 \cdot 10^6$	15	38	5	10

8.1.1 Tlaková ztráta na VPII

Součinitel tlakové ztráty pro svazek žebrovaných trubek se vypočítá ze vzorce (8-3):

$$\zeta^{VPII} = k_4 \cdot n_R^{VPII} \cdot \left(\frac{h_z^{VPII}}{D^{VPII}} \right)^{k_1} \cdot \left(\frac{s_z^{VPII}}{D^{VPII}} \right)^{-k_2} \cdot (\text{Re}_s^{VPII})^{-k_3} = 2 \cdot 2 \cdot \left(\frac{14}{44,5} \right)^0 \cdot \left(\frac{5,26}{44,5} \right)^{-0,72} \cdot (1,431 \cdot 10^6)^{-0,24} = 0,62$$

Tlaková ztráta svazku žebrovaných trubek se vypočítá ze vzorce (8-2):

$$\Delta p_Z^{VPII} = \zeta^{VPII} \cdot \frac{(w_{SP}^{VPII})^2}{2} \cdot \rho_{SP} = 0,62 \cdot \frac{14,988^2}{2} \cdot 1,269 = 88,345 \text{ Pa}$$

8.1.2 Tlaková ztráta na VPI

Součinitel tlakové ztráty pro svazek žebrovaných trubek se vypočítá ze vzorce (8-3):

$$\zeta^{VPI} = k_4 \cdot n_R^{VPI} \cdot \left(\frac{h_z^{VPI}}{D^{VPI}} \right)^{k_1} \cdot \left(\frac{s_z^{VPI}}{D^{VPI}} \right)^{-k_2} \cdot (\text{Re}_s^{VPI})^{-k_3} = 2 \cdot 3 \cdot \left(\frac{14}{38} \right)^0 \cdot \left(\frac{5,26}{38} \right)^{-0,72} \cdot (1,652 \cdot 10^6)^{-0,24} = 0,802$$

Tlaková ztráta svazku žebrovaných trubek se vypočítá ze vzorce (8-2):

$$\Delta p_Z^{VPI} = \zeta^{VPI} \cdot \frac{(w_{SP}^{VPI})^2}{2} \cdot \rho_{SP} = 0,802 \cdot \frac{14,425^2}{2} \cdot 1,269 = 105,857 \text{ Pa}$$

8.1.3 Tlaková ztráta na VV

Součinitel tlakové ztráty pro svazek žebrovaných trubek se vypočítá ze vzorce (8-3):

$$\zeta^{VV} = k_4 \cdot n_R^{VV} \cdot \left(\frac{h_{\dot{z}}^{VV}}{D^{VV}} \right)^{k_1} \cdot \left(\frac{s_{\dot{z}}^{VV}}{D^{VV}} \right)^{-k_2} \cdot (\text{Re}_s^{VV})^{-k_3} = 2 \cdot 17 \cdot \left(\frac{17}{57} \right)^0 \cdot \left(\frac{5}{57} \right)^{-0,72} \cdot (1,799 \cdot 10^6)^{-0,24} = 6,184$$

Tlaková ztráta svazku žebrovaných trubek se vypočítá ze vzorce (8-2):

$$\Delta p_Z^{VV} = \zeta^{VV} \cdot \frac{(w_{SP}^{VV})^2}{2} \cdot \rho_{SP} = 6,184 \cdot \frac{12,318^2}{2} \cdot 1,269 = 595,349 Pa$$

8.1.4 Tlaková ztráta na VE3

Součinitel tlakové ztráty pro svazek žebrovaných trubek se vypočítá ze vzorce (8-3):

$$\zeta^{VE3} = k_4 \cdot n_R^{VE3} \cdot \left(\frac{h_{\dot{z}}^{VE3}}{D^{VE3}} \right)^{k_1} \cdot \left(\frac{s_{\dot{z}}^{VE3}}{D^{VE3}} \right)^{-k_2} \cdot (\text{Re}_s^{VE3})^{-k_3} = 2 \cdot 12 \cdot \left(\frac{13}{31,8} \right)^0 \cdot \left(\frac{5}{31,8} \right)^{-0,72} \cdot (1,488 \cdot 10^6)^{-0,24} = 3,001$$

Tlaková ztráta svazku žebrovaných trubek se vypočítá ze vzorce (8-2):

$$\Delta p_Z^{VE3} = \zeta^{VE3} \cdot \frac{(w_{SP}^{VE3})^2}{2} \cdot \rho_{SP} = 3,001 \cdot \frac{8,501^2}{2} \cdot 1,269 = 137,62 Pa$$

8.1.5 Tlaková ztráta na NP

Opravný koeficient roztečí mezi trubkami se určí z příčné rozteče $s_1^{NP} = 141 mm$ a podélné rozteče $s_2^{NP} = 117 mm$ vztažených k vnějšímu průměru trubky D^{NP} .

$$\frac{s_1^{NP}}{D^{NP}} = \frac{141}{54} = 2,167$$

$$\frac{s_2^{NP}}{D^{NP}} = \frac{117}{54} = 2,611$$

Pro tyto hodnoty lze z grafu odečíst hodnotu koeficientu:

$$x_3^{NP} = 0,89$$

Opravný součinitel pro střední teplotu stěny a teplotu proudu spalín se určí z grafu pro danou teplotu stěny t_Z^{NP} a proudu spalín $t_{SP}^{NP} = 220,337^\circ C$:

$$x_4^{NP} = 1,55$$

Pro danou rychlost spalín w_{SP}^{NP} lze z grafu odečíst hodnotu tlakové difference:

$$\Delta p_1^{NP} = 1,75 Pa$$

Tlaková ztráta svazku hladkých trubek se vypočítá ze vzorce (8-1):

$$\Delta p_Z^{NP} = \Delta p_1^{NP} \cdot x_3^{NP} \cdot x_4^{NP} = 1,75 \cdot 0,89 \cdot 1,55 = 4,828$$

8.1.6 Tlaková ztráta na NV

Součinitel tlakové ztráty pro svazek žebrovaných trubek se vypočítá ze vzorce (8-3):

$$\zeta^{NV} = k_4 \cdot n_R^{NV} \cdot \left(\frac{h_{\dot{z}}^{NV}}{D^{NV}} \right)^{k_1} \cdot \left(\frac{s_{\dot{z}}^{NV}}{D^{NV}} \right)^{-k_2} \cdot (\text{Re}_s^{NV})^{-k_3} = 2 \cdot 10 \cdot \left(\frac{18}{57} \right)^0 \cdot \left(\frac{5}{57} \right)^{-0,72} \cdot (1,918 \cdot 10^6)^{-0,24} = 3,582$$

Tlaková ztráta svazku žebrovaných trubek se vypočítá ze vzorce (8-2):

$$\Delta p_Z^{NV} = \zeta^{NV} \cdot \frac{(w_{SP}^{NV})^2}{2} \cdot \rho_{SP} = 3,582 \cdot \frac{8,928^2}{2} \cdot 1,269 = 181,147 Pa$$

8.1.7 Tlaková ztráta na VE2

Součinitel tlakové ztráty pro svazek žebrovaných trubek se vypočítá ze vzorce (8-3):

$$\zeta^{VE2} = k_4 \cdot n_R^{VE2} \cdot \left(\frac{h_Z^{VE2}}{D^{VE2}} \right)^{k_1} \cdot \left(\frac{s_Z^{VE2}}{D^{VE2}} \right)^{-k_2} \cdot (\text{Re}_s^{VE2})^{-k_3} = 2 \cdot 4 \cdot \left(\frac{15}{38} \right)^0 \cdot \left(\frac{5}{38} \right)^{-0,72} \cdot (1,637 \cdot 10^6)^{-0,24} = 1,112$$

Tlaková ztráta svazku žebrovaných trubek se vypočítá ze vzorce (8-2):

$$\Delta p_Z^{VE2} = \zeta^{VE2} \cdot \frac{(w_{SP}^{VE2})^2}{2} \cdot \rho_{SP} = 1,112 \cdot \frac{7,393^2}{2} \cdot 1,269 = 38,549 Pa$$

8.1.8 Tlaková ztráta na NE

Součinitel tlakové ztráty pro svazek žebrovaných trubek se vypočítá ze vzorce (8-3):

$$\zeta^{NE} = k_4 \cdot n_R^{NE} \cdot \left(\frac{h_Z^{NE}}{D^{NE}} \right)^{k_1} \cdot \left(\frac{s_Z^{NE}}{D^{NE}} \right)^{-k_2} \cdot (\text{Re}_s^{NE})^{-k_3} = 2 \cdot 2 \cdot \left(\frac{15}{22} \right)^0 \cdot \left(\frac{5,88}{22} \right)^{-0,72} \cdot (1,415 \cdot 10^6)^{-0,24} = 0,345$$

Tlaková ztráta svazku žebrovaných trubek se vypočítá ze vzorce (8-2):

$$\Delta p_Z^{NE} = \zeta^{NE} \cdot \frac{(w_{SP}^{NE})^2}{2} \cdot \rho_{SP} = 0,345 \cdot \frac{5,414^2}{2} \cdot 1,269 = 6,423 Pa$$

8.1.9 Tlaková ztráta na VE1

Součinitel tlakové ztráty pro svazek žebrovaných trubek se vypočítá ze vzorce (8-3):

$$\zeta^{VE1} = k_4 \cdot n_R^{VE1} \cdot \left(\frac{h_Z^{VE1}}{D^{VE1}} \right)^{k_1} \cdot \left(\frac{s_Z^{VE1}}{D^{VE1}} \right)^{-k_2} \cdot (\text{Re}_s^{VE1})^{-k_3} = 2 \cdot 10 \cdot \left(\frac{15}{38} \right)^0 \cdot \left(\frac{5}{38} \right)^{-0,72} \cdot (1,722 \cdot 10^6)^{-0,24} = 2,745$$

Tlaková ztráta svazku žebrovaných trubek se vypočítá ze vzorce (8-2):

$$\Delta p_Z^{VE1} = \zeta^{VE1} \cdot \frac{(w_{SP}^{VE1})^2}{2} \cdot \rho_{SP} = 2,745 \cdot \frac{6,41^2}{2} \cdot 1,269 = 71,573 Pa$$

8.2 Tlaková ztráta v komíně**8.2.1 Tlaková ztráta třením v komíně**

Tlaková ztráta třením v komíně se vypočítá ze vzorce:

$$\Delta p_{ZT}^{kom} = \lambda^{kom} \cdot \frac{H^{kom}}{d^{kom}} \cdot \frac{(w_{SP})^2}{2} \cdot \rho_{SP} = 0,04 \cdot \frac{20}{5} \cdot \frac{7,813^2}{2} \cdot 1,269 = 6,197 Pa, \text{ kde} \quad (8-7)$$

- H^{kom} [m] je výška komína od místa vstupu spalín,
- d^{kom} [m] je vnitřní průměr komína,
- λ^{kom} [-] je součinitel tření v komíně.

Výška komína od místa vstupu spalín se volí $H^{kom} = 25m$, vnitřní průměr komína se volí $d^{kom} = 5m$. Součinitel tření v komíně se pro cihlové i železné komíny volí $\lambda^{kom} = 0,04$.

Průtočná plocha spalín:

$$S_{SP-PR}^{kom} = \frac{\pi \cdot (d^{kom})^2}{2} = \frac{\pi \cdot 5^2}{2} = 19,635 m^2$$

Skutečný objemový průtok spalín se vypočítá ze vzorce (3-4):

$$M_{SPOsk}^{kom} = M_{SPO} \cdot \frac{t_I + 273,15}{273,15} = 108,264 \cdot \frac{113,88 + 273,15}{273,15} = 153,401 m^3 \cdot s^{-1}$$

Rychlost spalin se vypočítá ze vzorce (3-7):

$$w_{SP}^{kom} = \frac{M_{SPOsk}^{kom}}{S_{SP-PR}^{kom}} = \frac{153,401}{19,635} = 7,813 m \cdot s^{-1}$$

Tlakovou ztrátu potom lze vypočítat dosazením do vzorce (8-7):

$$\Delta p_{ZT}^{kom} = \lambda^{kom} \cdot \frac{H^{kom}}{d^{kom}} \cdot \frac{(w_{SP}^{kom})^2}{2} \cdot \rho_{SP} = 0,04 \cdot \frac{25}{5} \cdot \frac{7,813^2}{2} \cdot 1,269 = 7,746 Pa$$

8.2.2 Tlaková ztráta na vstupu a výstupu z komína

Tlaková ztráta se určí ze vzorce (8-2), kde ζ je součinitel tlakové ztráty pro vstup spalin do komína, resp. výstupem z komína, který se volí:

$$\zeta_{vs}^{kom} = \zeta_{vý}^{kom} = 1$$

Tlaková ztráta na vstupu a výstupu z kotle dosazením do vzorce (8-2):

$$\Delta p_{ZVV}^{kom} = (\zeta_{vs}^{kom} + \zeta_{vý}^{kom}) \cdot \frac{(w_{SP}^{kom})^2}{2} \cdot \rho_{SP} = (1+1) \cdot \frac{7,813^2}{2} \cdot 1,269 = 77,464 Pa$$

8.3 Celková tahová ztráta

Celková ztráta Δp_{ZC} je součtem všech vypočtených ztrát, ke kterým je potřeba ještě připočítat ztrátu v tlumiči hluku v komíně $\Delta p_{ZTH}^{kom} = 200 Pa$. Tato ztráta musí vyjít nižší než maximální dovolená tahová ztráta kotle a komína $\Delta p_{ZD} = 2000 Pa$.

$$\begin{aligned} \Delta p_{ZC} &= \Delta p_Z^{VPII} + \Delta p_Z^{VPI} + \Delta p_Z^{VV} + \Delta p_Z^{VE3} + \Delta p_Z^{NP} + \Delta p_Z^{NV} + \Delta p_Z^{VE2} + \Delta p_Z^{NE} + \Delta p_Z^{VE1} + \Delta p_{ZT}^{kom} + \Delta p_{ZVV}^{kom} + \Delta p_{ZTH}^{kom} = \\ &= 88,345 + 105,857 + 595,349 + 137,62 + 4,828 + 181,147 + 38,549 + 6,423 + 71,573 + 7,746 + 77,464 + 200 = \\ &\doteq 1515 Pa \end{aligned}$$

Vypočtená hodnota celkové ztráty tahu tedy vychází nižší než dovolená hodnota:

$$\Delta p_{ZC} = 1515 Pa \leq \Delta p_{ZD} = 2000 Pa$$

Závěr

Cílem této diplomové práce byl tepelný výpočet a návrh výhřevných ploch spalínového dvoutlakého horizontálního kotle na odpadní teplo podle zadaných parametrů spalin a požadovaných parametrů výstupní páry. Nejprve bylo navrženo rozmístění výhřevných ploch a odpovídající pilový diagram a proveden tepelný výpočet. Podle zvolených rozměrů jedné z výhřevných ploch byly poté navrženy výška a šířka spalínového kanálu. Protože šířka kanálu přesahuje 4m, byl kanál uprostřed po své výšce rozdělen z důvodu převozu na dvě části. Pro navržené rozměry spalínového kanálu byly poté dimenzovány všechny ostatní výhřevné plochy. Podle teplot spalin byl poté pro každou teplosměnnou plochu zvolen vhodný materiál trubek a podle návrhových rychlostí média byly zvoleny rozměry vstupních a výstupních potrubí pro ekonomizéry a přehříváky. Poté byly zvoleny rozměry bubnů a pro tyto rozměry byla provedena kontrola zatížení bubnu. Podle tlaku v bubnu a volené předběžné výšky umístění bubnů byly z empirických vzorců vypočteny rozměry a počet zavodňovacích a převáděcích trubek. Nakonec byl proveden výpočet ztráty v tahu a vypočtená hodnota byla porovnána s dovolenou hodnotou. Provedený návrh kotle i s rozmístěním jednotlivých výhřevných ploch a rozdělením kotle na moduly je zpracován ve výkrese (viz příloha č.1).

Použité zdroje a literatura

- [1] Budaj, F.: Parní kotle – podklady pro tepelný výpočet, Nakladatelství VUT Brno, 1992
- [2] Černý, V. – Janeba, B. – Teyssler, J.: Parní kotle, SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1983
- [3] WWW stránky oze.stuba.sk [online]. [cit.2013-05-19]. Dostupné z WWW: <http://www.oze.stuba.sk/wp-content/themes/ObnovitelneZdrojeEnergie/elearning/EENERGETIKA/ELEN-3_2.htm>
- [4] Magnus Holmgren: X-Steam tables Excel v2.6, IF-97 Steam tables. Dostupné z WWW: <<http://xsteam.sourceforge.net/>>

Seznam použitých symbolů a zkratk

Symbol	Jednotka	Popis
a_{ST}	-	Stupeň černosti povrchu stěn
a	-	stupeň černosti zaprášeného i nezaprášeného proudu spalin pro střední teplotu proudu spalin
C	-	Konstanta pro výpočet ztrát sáláním a konvekcí
c_t	-	Opravný koeficient závislý na teplotě proudu a stěny
c_l	-	Opravný koeficient na poměrnou délku
c_m	-	Opravný koeficient mezikruží
c_s	-	Součinitel opravy na uspořádání svazku
c_z	-	Součinitel opravy na počet podélných řad
k_1, k_2, k_3, k_4	-	Konstanty uspořádání trubek
n_R	-	Počet podélných řad
n_{ir}	-	Počet trubek v jedné podélné řadě
n_{irP}	-	Počet převáděcích trubek
n_{irZ}	-	Počet zavodňovacích trubek
Pr_{SP}	-	Prandtlovo číslo spalin
Pr_P	-	Prandtlovo číslo vody/páry
Re_s	-	Reynoldsovo číslo vztažené na střední teplotu zanešeného povrchu stěny
$S_{\dot{z}}/S$	-	Podíl výhřevných ploch žeber a celkové plochy ze strany spalin
S_h/S	-	Podíl plochy částí trubky bez žeber a celkové plochy ze strany spalin
x	-	Objemový podíl prvku ve spalinách
x_3	-	Opravný koeficient závislý na roztečích mezi trubkami
x_4	-	Opravný koeficient závislý na teplotě stěny a proudu spalin
x_{SP}	-	Objemová část tříatomových plynů ve spalinách
ψ	-	Součinitel tepelné efektivity při spalování
$\psi_{\dot{z}}$	-	Koeficient charakterizující nerovnoměrnost rozložení α_K po povrchu žebra
μ	-	Součinitel rozšíření žebra
ξ	-	Součinitel využití
λ^{kom}	-	Součinitel tření v komíně
ζ	-	Součinitel tlakové ztráty pro svazek žebrovaných trubek
ζ_{vy}^{kom}	-	Součinitel tlakové ztráty pro výstup spalin z komína
ζ_{vs}^{kom}	-	Součinitel tlakové ztráty pro vstup spalin do komína
σ	-	Poměrná rozteč
φ_σ	-	Součinitel poměrných roztečí
x_Q	%	Procentuální rozdíl mezi navrženým a přepočteným skutečným předaným teplem ve výhřevné ploše
z_s	%	Poměrná ztráta sáláním a konvekcí

Symbol	Jednotka	Popis
a	mm	Volný prostor mezi žebry žebrovaných trubek
d	mm	Vnitřní průměr trubky
d_e	mm	Ekvivalentní průměr
d_p	mm	Vnitřní průměr převáděcí trubky
d_z	mm	Vnitřní průměr zavodňovací trubky
d_{Bu}	mm	Vnitřní průměr bubnu
d^{kom}	mm	Vnitřní průměr komína
d_{vs}	mm	Vnitřní průměr vstupního potrubí
d_{vy}	mm	Vnitřní průměr výstupního potrubí
D	mm	Vnější průměr trubky
D_z	mm	Průměr žebrování trubky
D_p	mm	Vnější průměr převáděcí trubky
D_z	mm	Vnější průměr zavodňovací trubky
D_{Bu}	mm	Vnější průměr bubnu
D_{vs}	mm	Vnější průměr vstupního potrubí
D_{vy}	mm	Vnější průměr výstupního potrubí
h_z	mm	Výška žeber
h_p	mm	Přibližná výška umístění bubnu
H^{kom}	mm	Výška komína od místa vstupu spalín
l_n	mm	Návrhová výška spalínového kanálu
l	mm	Skutečná výška spalínového kanálu
l_{Bu}	mm	Délka bubnu
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}_n	mm	Návrhová šířka spalínového kanálu
\check{s}	mm	Skutečná šířka spalínového kanálu
s_z	mm	Rozteč mezi žebry
t_{tr}	mm	Tloušťka trubky
t_z	mm	Tloušťka žeber
t_p	mm	Tloušťka stěny převáděcí trubky
t_z	mm	Tloušťka stěny zavodňovací trubky
t_{vy}	mm	Tloušťka stěny výstupního potrubí
t_{vs}	mm	Tloušťka stěny vstupního potrubí
t_{Bu}	mm	Tloušťka stěny bubnu

Symbol	Jednotka	Popis
f	m^2	Teplosměnná plocha ze strany páry
$S_{SP-PR-n}$	m^2	Návrhová průtočná plocha spalin
S_{SP-PR}	m^2	Skutečná průtočná plocha 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}	m^2	Celková teplosměnná plocha ze strany spalin
S_{SPsk}	m^2	Skutečná teplosměnná plocha ze strany spalin
S_{0V}	m^2	Součet průtočných průřezů všech varných trubek
S_{0Z}	m^2	Součet průtočných průřezů všech zavodňovacích trubek
S_{0P}	m^2	Součet průtočných průřezů všech převáděcích trubek
S_{1P}	m^2	Průtočný průřez jedné převáděcí trubky
S_{1Z}	m^2	Průtočný průřez jedné zavodňovací trubky
S_{pr}	m^2	Průtočná plocha kotle
V_{Bu}	m^3	Polovina objemu bubnu
w_{SP}	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost spalin
w_P	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost páry
ν_P	$m^2 \cdot s^{-1}$	Součinitel dynamické viskozity vody/páry
ν_s	$m^2 \cdot s^{-1}$	Součinitel dynamické viskozity spalin vztažený na střední teplotu stěny
ν_{SP}	$m^2 \cdot s^{-1}$	Součinitel dynamické viskozity spalin
M_{SPO}	$m^3 \cdot s^{-1}$	Objemový tok spalin
M_{SPOsk}	$m^3 \cdot s^{-1}$	Skutečný objemový průtok spalin pro danou střední teplotu
$n_{\dot{z}}$	m^{-1}	Počet žeber na 1m délky trubky
k	$m^{-1} \cdot MPa^{-1}$	Opravený součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny
k_{SP}	$m^{-1} \cdot MPa^{-1}$	Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny
\mathbf{v}	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Měrný objem
ν_{SP}	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Střední měrný objem spalin
ν_P	$m^3 \cdot kg^{-1}$	Střední měrný objem páry
T_Z	K	Teplota zaprášeného povrchu stěny
T_{SP}	K	Střední teplota spalin
Δt_{ln}	K	Střední logaritmický teplotní spád
t	$^{\circ}C$	Teplota
t_P	$^{\circ}C$	Střední teplota páry
t_{SP}	$^{\circ}C$	Střední teplota spalin
t_{mat}	$^{\circ}C$	Vztažná teplota pro návrh materiálu trubek
$\Delta t_{př}$	$^{\circ}C$	Teplotní přídavek
Δt_{Ned}	$^{\circ}C$	Teplota nedohřevu
Δt_P	$^{\circ}C$	Pinchpoint
Δt	$^{\circ}C$	Teplotní přídavek pro výpočet teploty zanešeného povrchu stěny

Symbol	Jednotka	Popis
M_{SP}	$kg \cdot s^{-1}$	Hmotnostní průtok spalin
M_{PV}	$kg \cdot s^{-1}$	Hmotnostní průtok páry vysokotlakým okruhem
M_{PN}	$kg \cdot s^{-1}$	Hmotnostní průtok páry nízkotlakým okruhem
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_{Bu-B}	$kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$	Běžné zatížení bubnu
i	$kJ \cdot kg^{-1}$	Entalpie páry
Δi	$kJ \cdot kg^{-1}$	Entalpický spád
I_{SP}	$kJ \cdot m^{-3}$	Entalpie spalin
Q	MW	Předané teplo
Q_{sk}	MW	Skutečné předané teplo
Q_{RC}	MW	Ztráty sáláním a konvekcí
Q_A	MW	Maximální využitelný tepelný výkon
K	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Součinitel prostupu tepla
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/páry
α_K	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Součinitel přestupu tepla konvekcí
α_S	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Součinitel přestupu tepla sáláním
λ_Z	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Součinitel tepelné vodivosti žeber
λ_{SP}	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Součinitel tepelné vodivosti spalin
λ_P	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Součinitel tepelné vodivosti vody/páry
ε	$W^{-1} \cdot m^2 \cdot K$	Poměrná zářivost
p	MPa	Tlak
p_{Bu}	MPa	Tlak v bubnu
Δp	MPa	Tlaková diference
p_P	MPa	Střední tlak páry
p_{SP}	MPa	Střední tlak spalin
p_{parc}	MPa	Parciální tlak tříatomových plynů spalin
Δp_{ZC}	Pa	Celková tahová ztráta
Δp_{ZD}	Pa	Dovolená hodnota tahové ztráty
Δp_1	Pa	Tlaková diference závislá na rychlosti průtoku spalin
Δp_Z	Pa	Tlaková ztráta svazku trubek
Δp_{ZT}^{kom}	Pa	Tlaková ztráta třením v komíně
Δp_{ZVV}^{kom}	Pa	Tlaková ztráta na vstupu a výstupu z komína
Δp_{ZTH}^{kom}	Pa	Ztráta v tlumiči hluku v komíně

Zkratka:	Význam:
N	Nízkotlaký
NE	Nízkotlaký ekonomizér
NP	Nízkotlaký přehřívák
NV	Nízkotlaký výparník
V	Vysokotlaký
VE1	První stupeň vysokotlakého ekonomizéru
VE2	Druhý stupeň vysokotlakého ekonomizéru
VE3	Třetí stupeň vysokotlakého ekonomizéru
VPI	První stupeň vysokotlakého přehříváku
VPII	Druhý stupeň vysokotlakého přehříváku
VV	Vysokotlaký výparník

Seznam příloh

Příloha č.1

Výkres kotle na odpadní teplo (A2)