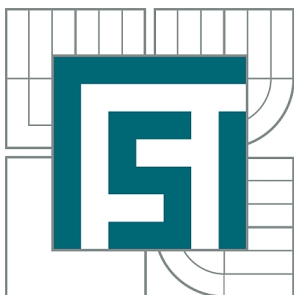


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

ANALÝZA PŘEDČIŠTĚNÍ PRACOVNÍ LÁTKY PRO ÚČELY VÝMĚNY TEPLA

ANALYSIS OF PROCES FLUID PRETREATMENT FOR HEAT EXCHANGE PURPOSE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ONDŘEJ NAVRÁTIL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ZDENĚK JEGLA, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Ondřej Navrátil

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

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

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:

Analýza předčištění pracovní látky pro účely výměny tepla

v anglickém jazyce:

Analysis of proces fluid pretreatment for heat exchange purpose

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Předmětem práce je analýza možností a způsobů řešení předčištění plynné pracovní látky obsahující kapalné podíly pro účely výměny tepla.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je provést analýzu možností předřazení vhodného separačního zařízení pro záchyt kapalných nebo pevných podílů z proudu plynné směsi před vstupem do provozovaného výměníku tepla za účelem eliminace zanášení jeho teplosměnných ploch.

Seznam odborné literatury:

- 1) Hewitt, C.H., Shires, G. L., and Bott, T. R., Process Heat Transfer, Begell House, New York, 1994.
- 2) VDI, Wärmeatlas, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf., 1984.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 21.11.2011



prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá problematikou čištění plynného proudu, v němž se vyskytují částice kapalného a pevného charakteru. Na konkrétním průmyslovém případě předčištění procesního odplynu ve spalovně plynných odpadů je řešen návrh předřazení vhodného separačního zařízení pro záchyt kapalných nebo pevných podílů z proudu směsi před vstupem do provozovaného výměníku tepla za účelem eliminace zanášení teplosměnných ploch.

ANNOTATION

This thesis is devoted purification of a gas stream with solid and liquid particles. The problem described in the thesis is connected with a real industrial case – problem of operated waste gas incineration plant. Waste gas going to thermal incineration to flame of natural gas combustion contains solid and liquid particles. Presence of particles causes fouling of waste gas preheater. The main objective of thesis is analysis of situation and operating and space limitations and design of a suitable type of particle collector to reliable elimination of particles from waste gas before entering the gas preheater and thus to mitigation of fouling of preheater heat transfer area.

KLÍČOVÁ SLOVA

Výměník tepla, cyklon, přenos tepla, spalovna, zanášení.

KEY WORDS

Heat exchanger, cyclone, heat transfer, incinerator, fouling.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE PRÁCE:

NAVRÁTIL, O. *Analýza předčištění pracovní látky pro účely výměny tepla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 53 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že předložená diplomová práce na téma „*Analýza předčištění pracovní látky pro účely výměny tepla*“ je původní a zpracoval jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil autorská práva (ve smyslu Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

V Brně, dne 24. května 2012

.....
Ondřej Navrátil

PODĚKOVÁNÍ

Za podporu a obětavou pomoc, cenné připomínky a metodické vedení tímto děkuji svému vedoucímu diplomové práce, panu doc. Ing. Zdeňku Jeglovi, Ph.D. Velké poděkování patří také panu Ing. Tomáši Pačískovi za cenné rady a konzultace v oblasti analýzy dat a také panu Prof. Dr. Ing. Marcusi Reppichovi za jeho rady a mnoho cenných postřehů. Rovněž děkuji celé své rodině za podporu během studia.

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	9
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	10
1. ÚVOD	11
2. ŘEŠENÉ ZAŘÍZENÍ	12
2.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY A POPIS PROCESU	12
2.2 GEOMETRICKÉ CHARAKTERISTIKY.....	14
2.3 VSTUPNÍ DATA	16
2.4 POPIS PROBLÉMU	17
2.5 STÁVAJÍCÍ ŘEŠENÍ.....	18
2.6 ANALÝZA VSTUPNÍCH DAT	19
3. OBECNÉ MOŽNOSTI PŘEDČIŠTĚNÍ PRACOVNÍ LÁTKY	21
3.1 NÁPLŇOVÉ KOLONY	22
3.2 ŠTĚRBINOVÉ ODLUČOVAČE.....	23
3.3 USAZOVÁKY	24
3.3.1. <i>Gravitační usazovávky</i>	24
3.3.2. <i>Odstředivé usazovávky - cyklony</i>	25
3.4 VENTURIHO PRAČKY	27
3.5 DALŠÍ MOŽNOSTI ČIŠTĚNÍ.....	28
4. OMEZENÍ ŘEŠENÉHO PŘÍPADU A VOLBA VHODNÉHO ZPŮSOBU PŘEDČIŠTĚNÍ PRACOVNÍ LÁTKY	29
5. PŘEDEHŘEV PROUDU	30
5.1 VOLBA ZPŮSOBU PŘEDEHŘEVU PROCESNÍHO ODPLYNU	30
5.2 SIMULAČNÍ VÝPOČET	32
6. NÁVRH CYKLONU	34
6.1 VSTUPNÍ DATA PRO NÁVRH CYKLONU	34
6.2 ODVOZENÍ VÝPOČTOVÝCH VZTAHŮ	35
6.3 ANALYTICKÉ ŘEŠENÍ.....	40
6. ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	42
7. ZÁVĚR	43
8. CITOVANÁ LITERATURA	44
9. PŘÍLOHY	45

Seznam použitých symbolů

Značka	Význam	Jednotka
A	šířka vstupního otvoru	m
A'	poměrný parametr šířky vstupního otvoru	-
B	výška vstupního otvoru	m
B'	poměrný parametr výšky vstupního otvoru	-
D	průměr válcové části	m
D_e	průměr vstupního otvoru	m
D_k	průměr výstupu z kuželové části	m
D'_k	poměrný parametr průměru výstupu z kuželové části	-
D_p	průměr přepadové trubky	m
D'_p	poměrný parametr průměru přepadové trubky	-
d_p	průměr částice	m
H_c	celková výška cyklonu	m
H_k	výška kuželové části	m
H'_k	poměrný parametr výšky kuželové části	-
H_p	hloubka zapuštění výstupní přepadové trubky	m
H'_p	poměrný parametr zapuštění výstupní přepadové trubky	m
H_v	výška válcové části cyklonu	m
H'_v	poměrný parametr výšky válcové části cyklonu	-
n	počet efektivních otáček ve válcové části	-
p	tlak	kPa
r_1	průměr přepadové trubky	m
r'_1	poměrný parametr poloměru přepadové trubky	-
r_2	poloměr válcové části	m
r'_2	poměrný parametr poloměru válcové části	-
t	teplota	$^{\circ}C$
\dot{V}	objemový průtok tekutiny válcovou částí cyklonu	m^3/s
v	vstupní rychlost	m/s
v_s	rychlost usazování částice ve Stokesově oblasti	m/s
v_t	tangenciální rychlost	m/s
η	dynamická viskozita	$Pa \cdot s$
ρ_p	hustota částic	kg/m^3
ρ	hustota směsi	kg/m^3

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
K1	kotel
MP	mezitrubkový prostor
OP	odpadní plyn
OV	odpadní voda
O1	odlučovač kapek
PO	procesní odplyn
SP	proud spalin
ST	striper
SV	spalovací vzduch
S1	spalovací komora
TP	trubkový prostor
V1	výměník 1
V2	výměník 2
ZP	zemní plyn

1. Úvod

V procesních výrobách je zařízením na výrobu tepla věnována mimořádná pozornost. Efektivita výměny tepla je významným faktorem ovlivňujícím účinnost a ekonomii celé procesní jednotky. Bohužel funkčnost celého zařízení je často snižována různými vlivy. Mezi časté komplikace, ke kterým během provozu technologického celku dochází, patří zanášení.

Ulpívání nečistot na teplosměnných plochách způsobuje selhávání přenosu tepla a může také způsobit kompletní destrukci celého zařízení. V zařízeních pracujících s odpadními produkty dochází k intenzivnímu usazování nečistot velmi často. Odpadní plynné proudy jsou obvykle silně znečištěné a není na ně zaměřena taková pozornost jako na produkty. Proces zanášení je závislý na mnoha faktorech. Je ovlivňován nejen druhem média, které v zařízení proudí, ale i provozní teplotou, tvarem a konstrukčním řešením aparátu atd.

Účelem řešení této diplomové práce je analyzovat možnosti předřazení vhodného separačního zařízení pro záchyt kapalných nebo pevných podílů z proudu směsi před vstupem do provozovaného výměníku tepla za účelem eliminace zanášení teplosměnných ploch a navrhnout vhodnou metodu k vyřešení daného problému. Předložená práce je řešením reálného problému z technické praxe.

2. Řešené zařízení

2.1 Úvod do problematiky a popis procesu

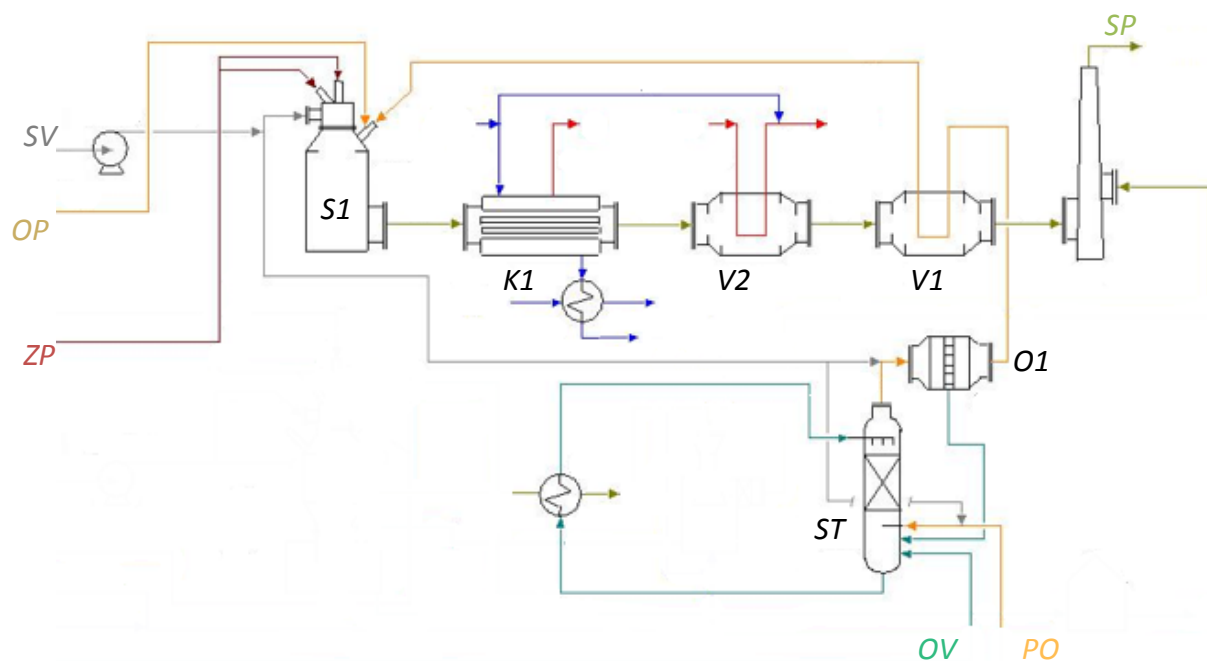
Jak již bylo zmíněno v úvodu, cílem práce je navrhnout řešení problému se zanášením výměníku tepla V1. Výměník je součástí spalovny pro likvidaci plyných odpadů. Uspořádání provozu je patrné z Obr. 1. Zcela vpravo na Obr. 1 je spalovací pec, následuje sekce výroby páry, která je napojená na výměník využívající zbytkové teplo k předehřevu spalínového proudu. Zcela vlevo na Obr. 1 je pata komína.



Obr. 1 Provozní úsek spalovny

Ze schématu na Obr. 2 je patrné, že jednotka spalovny se skládá z pece S1 (pro termickou likvidaci plyných odpadů v plamenu zemního plynu ZP) a ze systému výměny tepla. Termicky zneškodňovaný proud plyného odpadu nazývaný dále proudem procesního odplynu (PO) je po výstupu ze striperu ST nejprve čištěn v odlučovači kapek O1. Následně je naveden k předehřevu do výměníku V1. Z výměníku V1 je potrubí proudu PO přivedeno do pece S1. Odpadní teplo z pece S1 se v kotli K1 využívá k výrobě nízkotlaké páry. Ve výměníku V2 se přehřívá

středotlaká pára na páru přehřátou. Zbývající odpadní teplo spalin předešřívá ve výměníku V1 zneškodňovaný proud PO. Prostorové možnosti v okolí výměníku V1 přibližují Obr. 3 a Obr. 4.



Obr. 2 Proudové schéma spalovny s označenými hlavními proudy



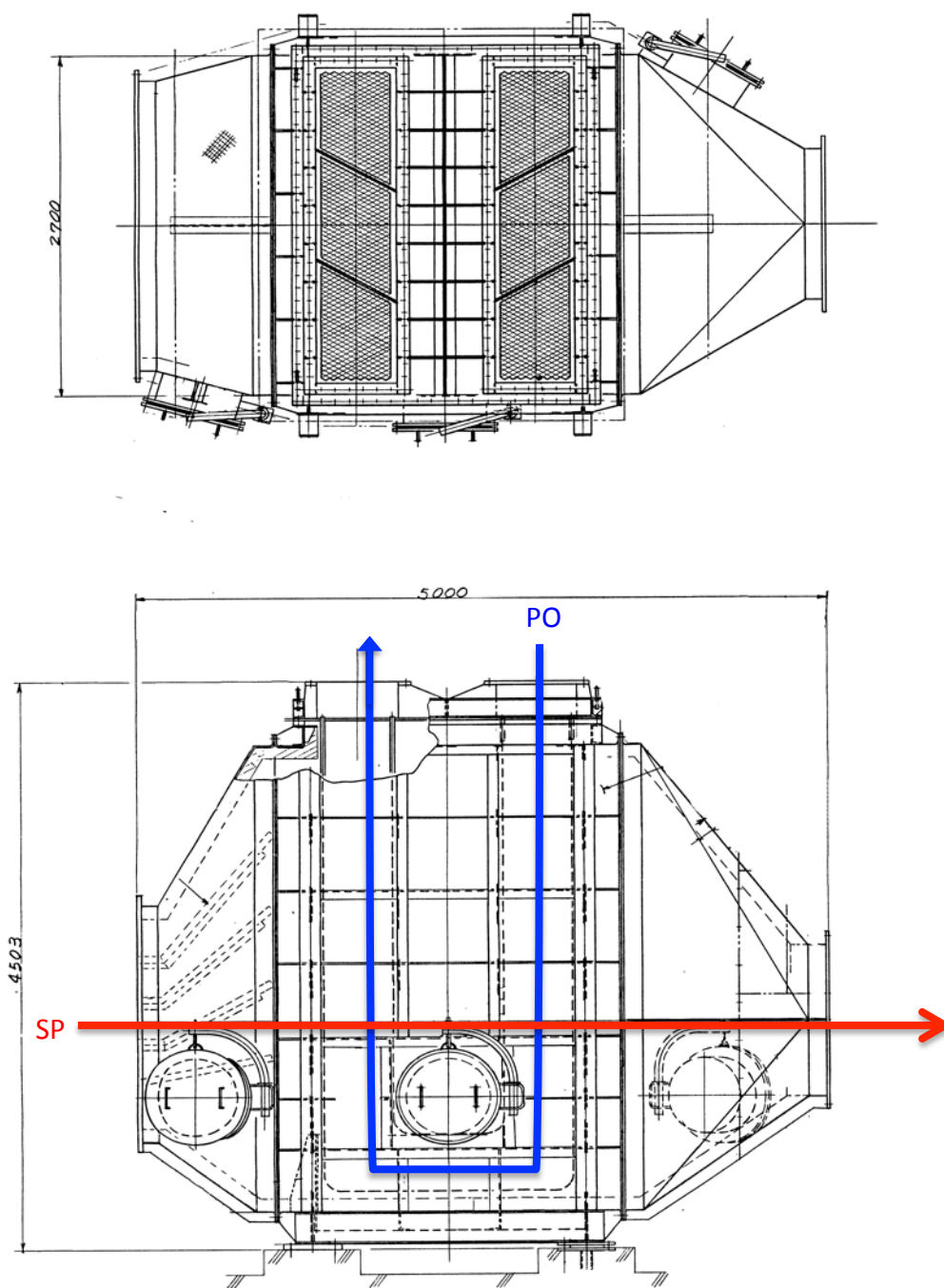
Obr. 3 Prostorová omezení v okolí výměníku – přívod spalin z pece do V1



Obr. 4 Výměník V1 – levá strana

2.2 Geometrické charakteristiky

Řešený zanášen výměník tepla V1 je trubkový výměník se dvěma chody v trubkovém prostoru a s jedním chodem v mezitrubkovém prostoru. Výměník má křížové uspořádání toku pracovních látek. Konstrukční řešení zanášeného výměníku je patrné z Obr. 5. Na obrázku je studený proud procesního odplynu PO zobrazen modře. Teplý proud spalin SP je zobrazen červeně.



Obr. 5 Sestavný výkres výměníku s naznačenými průchody procesních látek

Proud procesního odplynu vstupuje do svazku trubek shora v pravé polovině výměníku, výstup je pak veden vrchem v levé polovině výměníku. Spaliny ze spalovací komory vstupují do výměníku obdélníkovým otvorem z levé strany, kde jsou pro lepší distribuci plynu uvnitř zařízení instalovány naváděcí vestavby v podobě sady tvarovaných naváděcích plechových profilů. Ochlazené spaliny vystupují kruhovým otvorem v pravém boku. Základní rozměry výměníku V1 jsou seřazeny v Tab. 1.

Parametr	Rozměr
Výška výměníku	4503 mm
Šířka výměníku	5000 mm
Hloubka (délka MP)	3018 mm
Rozměry vstupního hrdla PO	600 x 2600 mm
Rozměr výstupního hrdla PO	600 x 2600 mm
Rozměr vstupního hrdla SP	1655 x 2055 mm
Rozměr výstupního hrdla SP	Ø 500 mm

Tab. 1 Základní rozměry výměníku

Výměník je opatřen dvěma inspekčními průřezy na levé straně a jedním inspekčním průřezem na pravé straně (viz Obr. 5). Sekce spalovny tvoří kompaktní blok a z hlediska umístění je integrovanou součástí jednotky. Prostorové možnosti v okolí výměníku jsou velmi omezené. Z levé strany výměníku je jednotka prostorově značně limitovaná (viz Obr. 4). Kolem pravé strany výměníku V1 vede obslužná komunikace.

2.3 Vstupní data

Provozovatelem výměníku byla poskytnuta provozní data výměníku V1, která jsou zobrazena v následujících dvou tabulkách. Údaje byly poskytnuty ve dvou verzích: pro provoz zaneseného výměníku a pro provoz čistého výměníku.

V první tabulce (Tab. 2) jsou parametry PO procházejícího trubkovým prostorem pro čisté i zanesené trubky. V druhé tabulce (Tab. 3) jsou parametry spalin procházejících mezitrubkovým prostorem.

TRUBKOVÝ PROSTOR	Čistý výměník				Zanesený výměník			
	Vstup odplynu		Výstup odplynu		Vstup odplynu		Výstup odplynu	
Provozní parametr	1		1		1		1	
Podíl parní fáze, -	1		1		1		1	
Teplota, °C	70,2		340		70		290	
Tlak, kPa (absolutně)	110		106		110		106	
Molekulová hmotnost, -	25,69		25,69		25,69		25,69	
Hustota, kg/m ³	0,992		0,534		0,992		0,582	
Tepelná kapacita, kJ/(kg · K)	1,22		1,289		1,22		1,273	
Tepelná vodivost, w/(m · K)	0,0269		0,046		0,0269		0,0425	
Dyn. viskozita, Pa · s	0,0000162		0,0000267		0,0000162		0,0000251	
Hmotnostní průtok, kg/h	17127,523		17127,523		17127,523		17127,523	
Molární průtok, kmol/h	666,7		666,7		666,7		666,7	
Objemový průtok, m ³ /h	17265,65		32074,01		17265,65		29428,73	
Hm./mol. zlomek	Hm.	Mol.	Hm.	Mol.	Hm.	Mol.	Hm.	Mol.
Kyslík O	0,0482	0,0387	0,0482	0,0387	0,0482	0,0387	0,0482	0,0387
Dusík N	0,7226	0,6628	0,7226	0,6628	0,7226	0,6627	0,7226	0,6627
Voda H ₂ O	0,1942	0,2770	0,1942	0,2770	0,1942	0,2770	0,1942	0,2770
Kyselina akrylová CH ₄ O ₂	0,0033	0,0012	0,0033	0,0012	0,0033	0,0012	0,0033	0,0012
Oxid uhelnatý CO	0,0046	0,0042	0,0046	0,0042	0,0046	0,0042	0,0046	0,0042
Oxid uhličitý CO ₂	0,0155	0,0090	0,0155	0,0090	0,0155	0,0090	0,0155	0,0090
Kyselina octová C ₂ H ₄ O ₂	0,0031	0,0013	0,0031	0,0013	0,0031	0,0013	0,0031	0,0013
Propylen C ₃ H ₆	0,0055	0,0033	0,0055	0,0033	0,0055	0,0033	0,0055	0,0033
Propan C ₃ H ₈	0,0006	0,0003	0,0006	0,0003	0,0006	0,0003	0,0006	0,0003
Formaldehyd CH ₂ O	0,0025	0,0022	0,0025	0,0022	0,0025	0,0022	0,0025	0,0022
Celkem	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Tab. 2 Provozní parametry PO v trubkovém prostoru výměníku

MEZITRUBKOVÝ PROSTOR	Čistý výměník				Zanešený výměník			
	Vstup spalin		Výstup spalin		Vstup spalin		Výstup spalin	
Provozní parametr	1		1		1		1	
Podíl parní fáze, -	1		1		1		1	
Teplota, °C	431		229		470		309	
Tlak, kPa (absolutně)	103		102		103		102	
Molekulová hmotnost, -	26,26		26,26		26,25		26,25	
Hustota, kg/m ³	0,462		0,642		0,438		0,553	
Tepelná kapacita, kJ/(kg · K)	1,277		1,219		1,29		1,244	
Tepelná vodivost, w/(m · K)	0,052		0,0381		0,0545		0,0436	
Dyn. viskozita, Pa · s	0,0000299		0,0000235		0,000031		0,0000261	
Hmotnostní průtok, kg/h	22906,598		22906,598		22937,25		22937,25	
Molární průtok, kmol/h	872,3		872,3		873,8		873,8	
Objemový průtok, m ³ /h	49581,38		35680,06		52368,15		41477,85	
Hm./mol. zlomek	Hm.	Mol.	Hm.	Mol.	Hm.	Mol.	Hm.	Mol.
Kyslík O	0,0393	0,0322	0,0393	0,0322	0,0352	0,0289	0,0352	0,0289
Dusík N	0,7274	0,6820	0,7274	0,6820	0,7267	0,6808	0,7267	0,6808
Voda H ₂ O	0,1702	0,2482	0,1702	0,2482	0,1723	0,2511	0,1723	0,2511
Kyselina akrylová CH ₂ O ₂	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Oxid uhelnatý CO	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Oxid uhličitý CO ₂	0,0631	0,0376	0,0631	0,0376	0,0658	0,0393	0,0658	0,0393
Kyselina octová C ₂ H ₄ O ₂	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Propylen C ₃ H ₆	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Propan C ₃ H ₈	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Formaldehyd CH ₂ O	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Celkem	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Tab. 3 Provozní parametry SP v mezitrubkovém prostoru

2.4 Popis problému

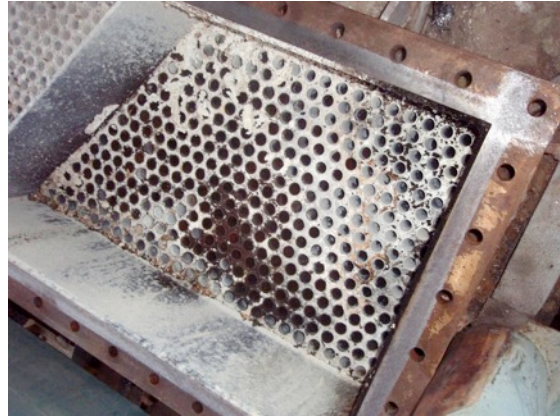
Vlivem nečistot, které jsou v proudu PO obsažené, dochází k zanášení a ke vzniku následujících problémů:

- ulpívající nánosy z PO snižují přenos tepla (projektovaný ohřev plynu byl z 70°C na 400°C, dosahované hodnoty ohřevu u zaneseného výměníku jsou ze 70°C pouze na 290°C). Úsady rovněž zalepují vstupy do TP (Obr. 6)
- na výstupu z TP se mění charakter úsad na tuhé bílé nánosy (Obr. 7)
- po spálení přehřátého PO dochází k záchytu pevných útletů v mezitrubkovém prostoru (Obr. 8, Obr. 9, Obr. 10).

- následkem ucpávání trubek a nánosů na trubkovnici dochází vlivem nerovnoměrných teplotních dilatací k praskání trubek. V současnosti je ve výměníku již 13 trubek zaslepeno (Obr. 11).



Obr. 6 Vstup PO do TP



Obr. 7 Výstup PO z TP



Obr. 8 Strana vstup SP do MP



Obr. 9 Strana výstupu SP z MP



Obr. 10 Úsady na výstupu SP z MP



Obr. 11 Zaslepené trubky na vstupu PO do TP po vyčištění.

2.5 Stávající řešení

V současné době je pro účely spalování plyn čištěn pomocí odlučovače kapek O1 (viz schéma na Obr. 2). Odlučovač je umístěn před řešeným výměníkem V1. V dřívější době byla provedena úprava odlučovače, kdy byla původní vestavba nahrazena novou. Konstrukční řešení nového odlučovače je patrné z Obr. 12. Odlučovač je tvořen sadou plechových lamel, které jsou nastaven ke směru plynného proudu pod úhlem 45°. Při stávajícím provozu je odlučovač čištěn ručně přes instalované trysky 1x týdně vodou (Obr. 13). Hrubý odhad zachyceného kapalného podílu provozovatel odhaduje na 20-30 litrů za hodinu. Z důvodu nedávné rekonstrukce si zadavatel nepřeje provádět další technické úpravy na tomto odlučovači.



Obr.12 Odlučovač kapek



Obr.13 Test trysky pro čištění odlučovače

2.6 Analýza vstupních dat

Ze vstupních dat a z přiložené fotodokumentace vyplývá, že odlučovač kapek nedokáže zachytit veškeré úlety. Z fotodokumentace je zřejmé, že prostor výměníku je na straně vstupu procesního odplynu zanášen úlety kapalného, i pevného charakteru. Na fotografii výstupu procesního odplynu z trubkového prostoru výměníku je patrné, že po zahřátí odplynu při průchodu výměníkem se charakter nečistot mění na tuhé bílé úsady (viz Obr. 7).

Zadavatel uvádí v dodaných vstupních datech, že podíl parní fáze je v PO roven 1, to znamená, že 100% látky by mělo být v plynném stavu. Pokud by tomu tak skutečně bylo, tak by nedocházelo k záchytu 20 – 30 litrů kapaliny na odlučovači O1. Tato skutečnost byla ověřena simulačním výpočtem.

V simulačním programu CHEMCAD byla řešena úloha, za účelem ověření parametrů plynného proudu a obsahu nečistot. Z výpočtu vyplývají rozdílné parametry plynného proudu než data, která dodal zadavatel. Parametry dodané zadavatelem byly již zmíněny v Tab. 2 a 3. Výsledky simulace a porovnání s daty od zadavatele je zobrazeno v Tab. 4

PO na vstupu do výměníku	Jednotka	Zadavatel	Výpočet
Podíl parní fáze	-	1	0,9968
Podíl kapalně fáze	-	0	0,0032
Teplota	°C	70	70
Absolutní tlak	kPa	110	112
Zachycené množství kapalného podílu v odlučovači	dm ³ /h	20-30	-
Teoretické množství kapalného podílu v PO dle simulace	dm ³ /h	0	57

Tab. 4 Data dodaná zadavatelem a data získaná simulačním výpočtem

Ze simulace vyplývá, že plyn obsahuje i kapalnou část (0,32%). Teoretický objem, který je potřeba odseparovat odpovídá přibližně 57 litrům za hodinu. Jestliže se tedy (jak uvádí zadavatel) 20-30 litrů zachytí na odlučovači kapek, zbývá odseparovat ještě dalších 27 – 37 litrů za hodinu, které nyní pronikají do TP výměníku V1. Úlety by neměly být tvořeny kapalnou fází, ale přesto je kapalná fáze v podílu nečistot obsažena. Ze zjištěných dat tak vyvozují závěr, že plyn je na hranici rosného bodu.

Proto se zde nabízí řešení, odseparovat nečistoty a předejít tak problémům se zanášením. Vzhledem k situaci s odlučovačem O1, komentované v předchozí kapitole je požadavkem zadavatele řešit odloučení nežádoucích podílů z PO zařízením jiného typu než je stávající odlučovač. Výstupem této práce by tedy měl být předběžný rozměrový návrh zařízení vhodného k předčištění plynu.

3. Obecné možnosti předčištění pracovní látky

Míchání dvou komponent je přirozený a spontánní proces. Opačný proces – oddělování dvou fází probíhá v určitých případech také přirozeně, ale efektivita je ekonomicky nepřijatelná. Proto se k urychlení používají separační procesy. Separace neboli oddělování dvou a více fází, obvykle vyžaduje vynaložení určitého množství energie [1]. Tato práce se bude zbývat separací dvou rozdílných fází. Od fáze plynné oddělujeme fázi kapalnou nebo pevnou. Nosné (dispergované) prostředí tedy tvoří plyn a rozptýlená (dispergovaná) fáze je kapalina, či pevná látka.

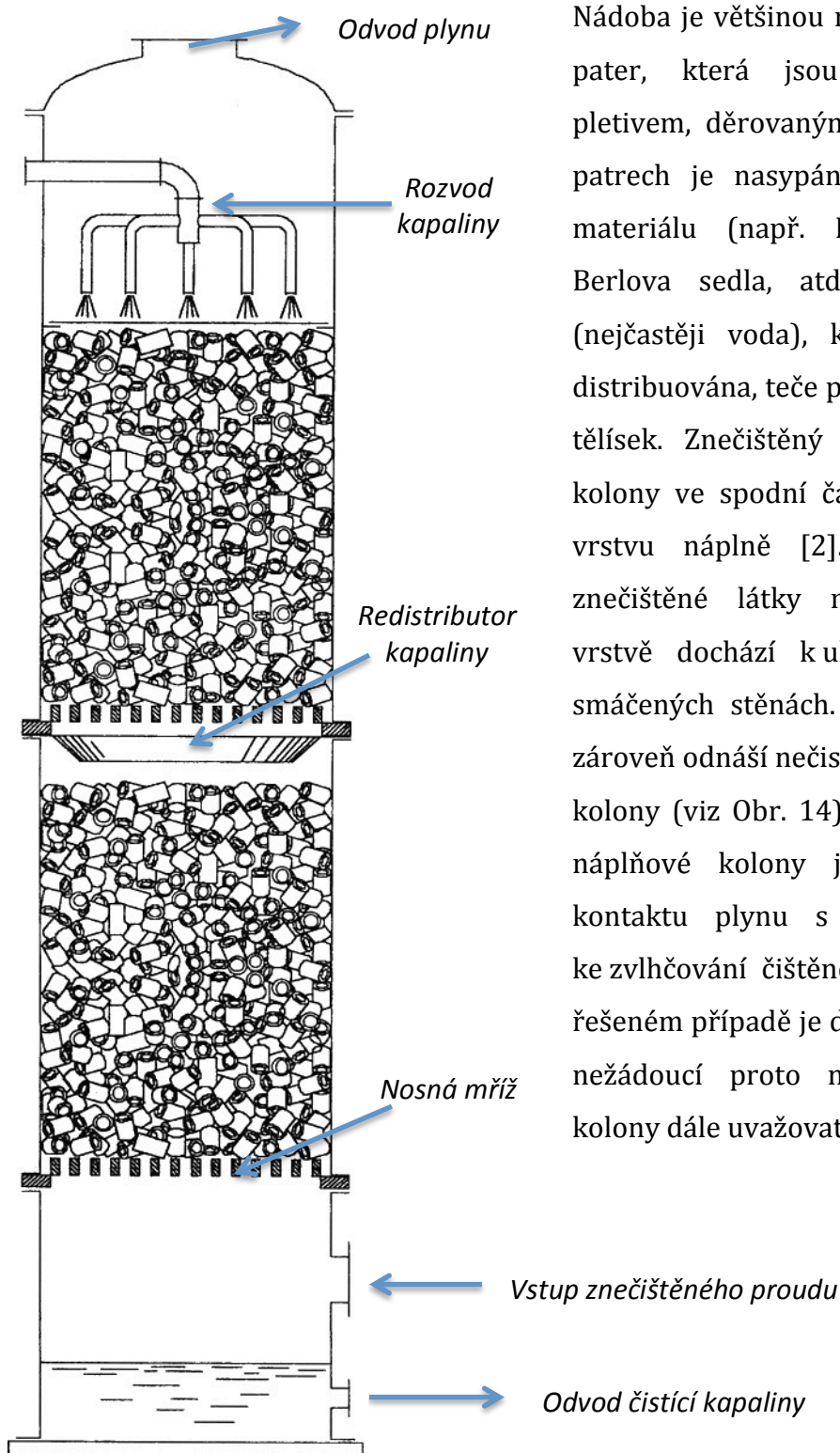
Aby bylo možné dvě heterogenní fáze oddělit, je potřeba nejprve specifikovat mechanismy, na kterých je separace založená. Vzhledem k tomu, že se jedná o oddělování heterogenní směsi, tedy dvou rozdílných fází, používají se k separaci převážně mechanická zařízení. Nejjednodušší je využití gravitačních sil. Směs je přivedena do nádoby, ve které se dispergované částice usadí. Vyšší efektivitu dosáhneme při použití podobného procesu, ale s využitím odstředivých sil. Třetí metodou je filtrace, kdy plyn prochází přes membránu. Obdobou tohoto procesu jsou prací kolony.

V práci je tedy dispergované prostředí – plyn (gas), dispergovaná látka – kapalina (liquid) a pevné částice (solid). V této kapitole je proveden přehled zařízení vhodných k separaci pevných a kapalných úletů. Jsou zde popsány následující aparáty:

- štěrbínové odlučovače kapek
- náplňová kolona
- usazováky
 - gravitační usazování
 - cyklony
- venturiho pračka
- další možnosti čištění
 - elektrostatické odlučovače
 - filtrace

3.1 Náplňové kolony

Náplňové kolony jsou zařízení pro kontakt plynů a kapalin. Obvykle se používají jako zařízení pro reakce plynů s kapalinami. V našem případě je můžeme použít i k čištění plynů. Kolony jsou svislé nádoby s podlouhlým, obvykle válcovým tvarem.



Nádoba je většinou rozdělena na několik pater, která jsou obvykle tvořena pletivem, děrovaným plechem apod. Na patrech je nasypána vrstva porézního materiálu (např. Rashigovy kroužky, Berlova sedla, atd.). Proud kapaliny (nejčastěji voda), která je nad náplň distribuována, teče po povrchu porézních tělísek. Znečištěný proud vstupuje do kolony ve spodní části a prochází přes vrstvu náplně [2]. Vlivem proudění znečištěné látky mezerami v porézní vrstvě dochází kulpívání nečistot na smáčených stěnách. Přitékající kapalina zároveň odnáší nečistoty do odtoku u dna kolony (viz Obr. 14). Jednou z vlastností náplňové kolony je fakt, že vlivem kontaktu plynu s kapalinou dochází ke zvlhčování čištěného média. V našem řešeném případě je dodatečné zvlhčování nežádoucí proto nebudeme náplňové kolony dále uvažovat.

Obr. 14 Náplňová kolona [2]

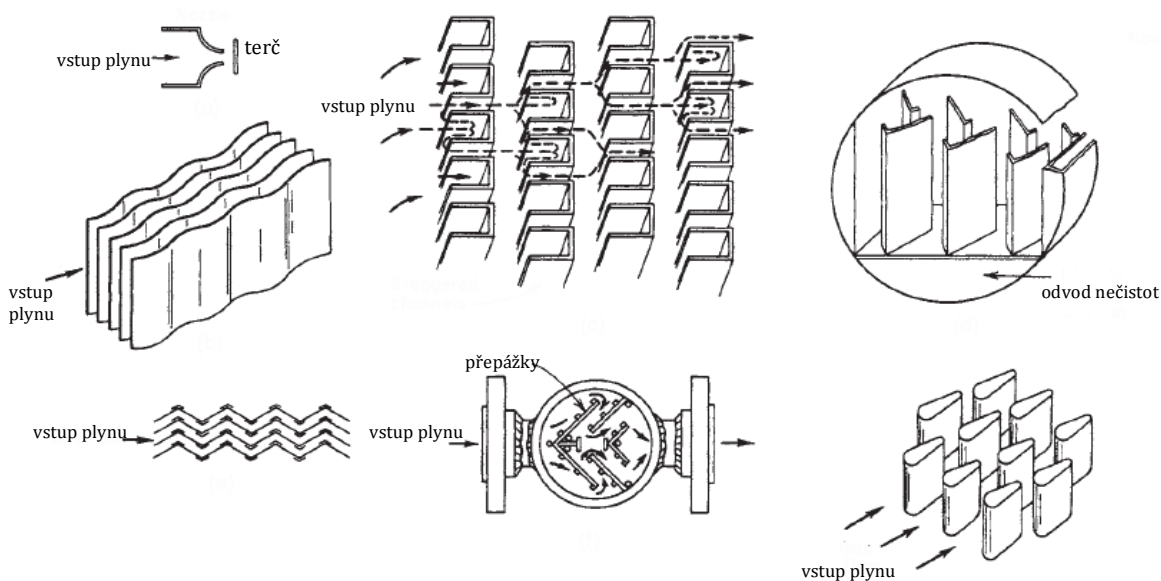
K vlastnostem náplňových kolon řadíme:

- vysoká efektivita
- možnost využít zařízení i k dodatečným chemickým reakcím plynu s kapalinou
- zvlhčování plynu
- velká tlaková ztráta.

3.2 Štěrbínové odlučovače

Štěrbínové odlučovače jsou jednoduchá mechanická zařízení, která slouží převážně pro hrubší čištění nebo se používají jako první stupeň filtrace [3]. Jsou vhodnější převážně k oddělování kapalných podílů, a to z důvodu, že kapalina má tendenci ulpívat na povrchu snáze, než prachové částice, které se od povrchu mohou snadno odrazit. Pro záchyt pevných částic se využívají odlučovače se smáčeným povrchem. Odlučovač je tvořen vestavbou, která je postavena do cesty plynnému proudu (viz Obr. 15). Může se jednat např. o terč, který je uprostřed potrubí [4]. Bariéra je obvykle tvořena vertikálními lamelami tvaru žaluzií nebo různých profilů. Částice, které narazí do žaluzií, ulpívají na povrchu odlučovače a následně stékají dolů do odtokového kanálu nebo sběrné nádoby [2]. K hlavním vlastnostem štěrbinových odlučovačů patří snadná instalace i provoz.

Vzhledem k tomu, že v procesním zařízení spalovny už jeden štěrbinový odlučovač existuje a kvůli dříve zmiňovanému požadavku zadavatele, nebudu se dále touto možností separace zabývat.



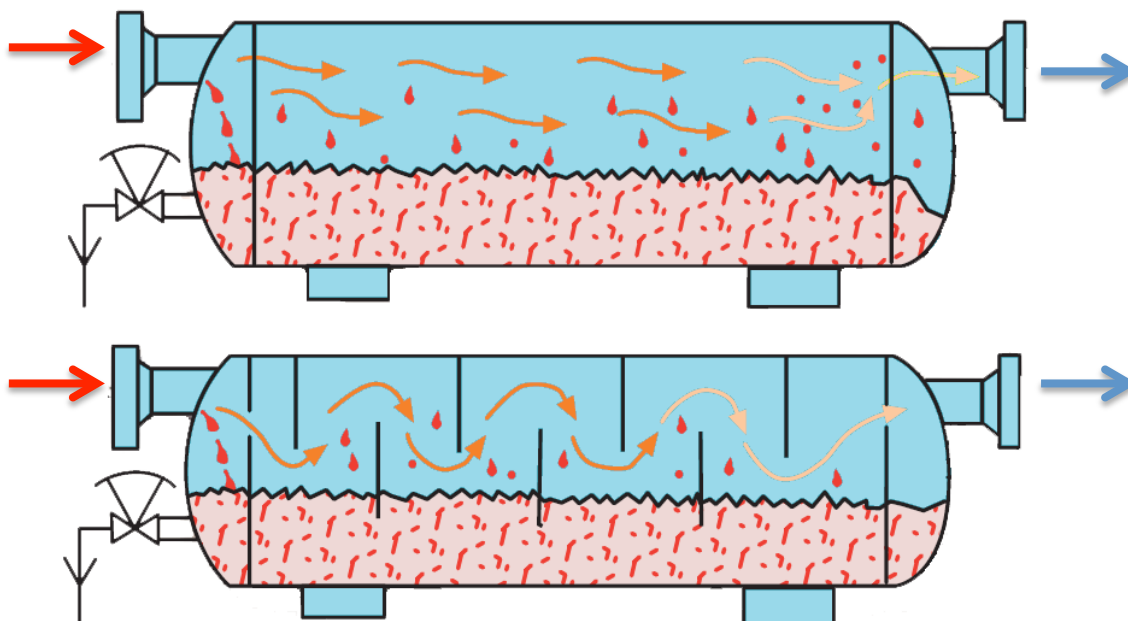
Obr. 15 Různá provedení štěrbinových odlučovačů [4]

3.3 Usazováký

Usazováký jsou zařizování využívající k separaci působení objemové síly na disperzní prostředí. Následkem působení této síly dochází k sedimentaci dispergovaných částic. Nejčastěji je objemová síla vyvolána gravitačním nebo odstředivým zrychlením.

3.3.1. Gravitační usazováký

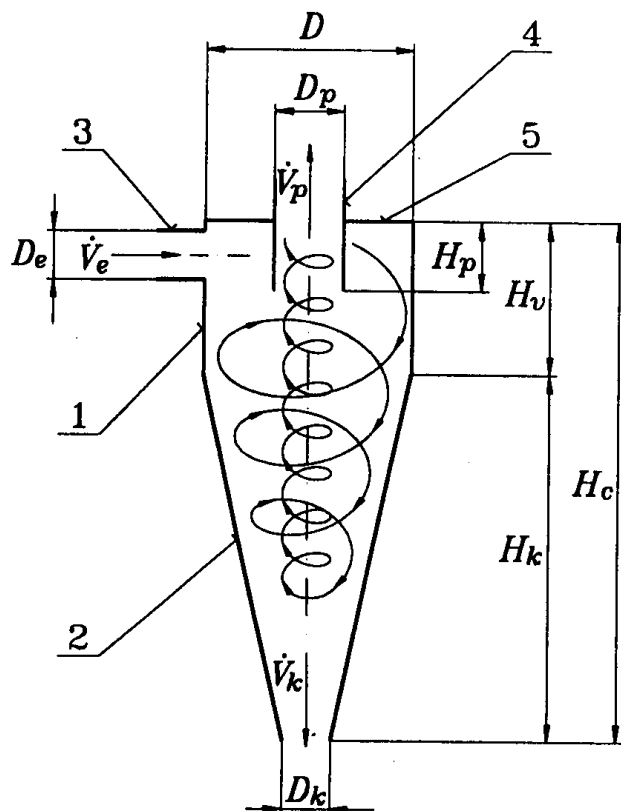
Gravitační usazováký jsou též nazývané prašné komory. Potrubí je navedeno do velké komory, kde následkem skokové změny průměru dojde ke snížení rychlosti proudění až na téměř nulovou hodnotu. Působením gravitačního zrychlení začnou prachové a kapalnó částice klesat ke dnu nádoby a zůstávají zachyceny ve spodní části usazováký. Čistý plyn je odváděn v horní části. Efektivitu usazování můžeme zvýšit použitím vestaveb. Přepážky usměrňují proudění a zabráňují nečistotám v dalším postupu (viz Obr. 16) [1].



Obr. 16 Typická provedení gravitačních usazováký (jednoduchý, s vestavbami) [5]

3.3.2. Odstředivé usazováký - cyklony

Gravitační usazování je obvykle pomalé, proto je tento proces zefektivněn nahrazením gravitační síly silou odstředivou. Odstředivé usazováký se nazývají cyklony. Tento název je odvozen od charakteristického proudění uvnitř zařízení. Zařízení využívající odstředivých sil ke zpracování plynů jsou též nazývané aerocyklony. Z konstrukčního hlediska patří cyklony k nejjednodušším separačním zařízením. Proud vstupuje do horní válcové části obvykle tangenciálně. Při pohybu kolem stran válce se původně laminární proudění mění na rotační [6]. Rotací média se vytvoří tzv. „virové“ proudění, které je ještě umocněno přechodem do kuželové části. Nečistoty se separují ve spodní části, kde je výtokový otvor nebo zásobník pro odchycené podíly. Nosný proud plynu ve spodní části mění směr a vystupuje středem cyklonu přepadovou trúbkou, jak je znázorněno na Obr. 17 [7].



Hlavní části cyklonu:

- 1 - válcová část,
- 2 - kuželová část,
- 3 - vstupní otvor,
- 4 - výstupní otvor,
- 5 - víko,

H_c - celková výška cyklonu,

H_k - výška kuželové části,

H_v - výška válcové části,

H_p - hloubka zapaštění výstupní přepadové trúbky,

D - průměr válcové části,

D_k - průměr výstupu z kuželové části,

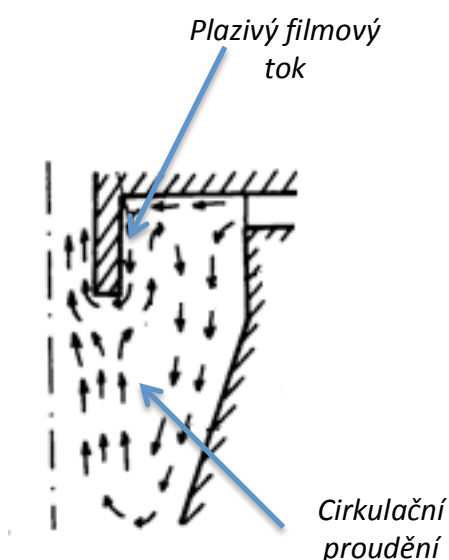
D_e - průměr vstupního otvoru,

D_p - průměr přepadové trúbky.

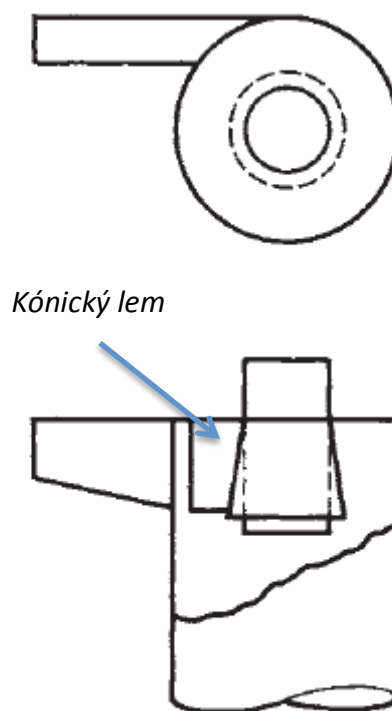
Obr. 17 Hlavní části cyklonu [7]

V cyklonu vznikají také dvě podružná proudění. První je tzv. cirkulační proud. Vstupující proud rotuje kolem stěny a ve spodní části cyklonu, kde dochází ke zvýšení radiální složky rychlosti, se část vyčištěného proudu při ústí do přepadové roury odděluje a znovu cirkuluje se vstupním proudem. Druhým nežádoucím prouděním je tzv. „plazivý filmový tok“ kolem víka cyklonu (viz Obr. 18). Tento proud se projevuje sníženou účinností cyklonu [7].

Při separaci kapalných podílů dochází často k záchytu částic kapalných podílů na výstupním hrdle u víka cyklonu. Následným tečením po výstupním hrdle mohou být kapalně úlety zachyceny a strhávány vyčištěným proudem stoupajícím středem cyklonu do přepadové trubky. Tomuto nežádoucímu jevu může být zabráněno instalací kónického „lemu“¹. Tento konstrukční prvek vytvoří hranu, ze které může stékající tekutina kapat, aniž by byla zachycena vyčištěným stoupajícím proudem (viz Obr. 19). Kuželová vestavba by měla být kratší než přepadový kanál a zároveň delší než vstupní otvor. Pro zvýšení účinnosti může být okraj lemu vroubkovaný nebo zubatý [4].



Obr. 18 Podružná proudění [7]



Obr.19 Kónický lem [4]

¹ Kónický lem – překlad z anglického *conical skirt* [4]

Zvýšení účinnosti při čištění kapalných složek může být dosaženo i nástřikem malého množství kapaliny do vstupního otvoru. Na velkých kapkách snáze ulpí drobné úlety a velké kapky se i snáze odseparují. Nejlepšího účinku při nástřiku kapaliny dosáhneme při plynulém protiproudém nástřiku do vstupního otvoru. Optimální množství kapaliny je 0,7 až 2 l/m³ [4]. Cyklon může být také provozován se skrápěnými stěnami jako vlhký.

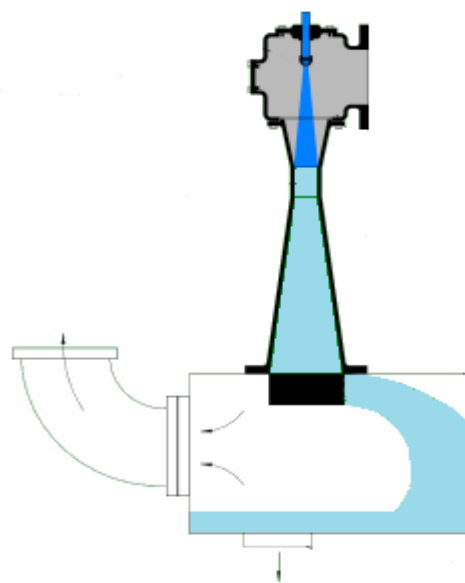
Vstup do cyklonu může být i shora, rovnoběžně s osou. Na vstupu je proud usměrňován pomocí přepážek, jež uvedou vstupující plyn do rotace. Odtah vyčištěného plynu je opět středem cyklonu přepadovým kanálem.

K hlavním vlastnostem cyklonu patří:

- velký výkon vztažený na objem cyklonového aparátu
- nízké nároky na údržbu
- špatná implementace při separaci nerovnoměrných průtoků
- erozivní účinky při čištění směsí obsahujících pevné částice [7].

3.4 Venturiho pračky

V průmyslové praxi se Venturiho pračka často používá k odstraňování škodlivých plynů, prachu a parních příměsí z plynného proudu. Skládá se z Venturiho dýzy, ve které se mísí proud plynu a čistící kapaliny (obvykle voda). Nečistoty jsou z plynu odejmuty při kontaktu s proudem nastříknuté kapaliny. Znečištěný plyn je přiveden do zúženého prostoru dýzy, ve kterém dojde k vytvoření podtlaku. V místě zúžení se do plynu nastříkne kapalina. V rozšíření dojde k tlakovým změnám a intenzivním turbulencím. Průchodem tímto zařízením se zachytávané podíly spojí s vstříkovanou kapalinou. Větší množství kapaliny se poté snáze zachytí v odlučovači kapek. Vyčištěný plyn je bočním výstupem odveden k dalšímu procesu [8]. Schématický náčrt principu Venturiho pračky je na Obr. 20.



Obr. 20 Venturiho pračka [8]

K hlavním vlastnostem Venturiho pračky patří:

- vysoká efektivita (přes 98%) [8]
- žádné pohyblivé části
- možnost vstříkovat i kapalinu, se kterou má plyn chemicky reagovat
- vlivem kavitace dohází k poškozování dýzy
- zvyšování vlhkosti plynu.

3.5 Další možnosti čištění

V literatuře se vyskytují i další dvě možnosti čištění proudu od směsi pevných částic – rukávová filtrace a elektrostatické čištění [9]. V omezených případech se dají použít i k čištění plynného proudu s kapalnými úlety, ale vzhledem k tomu, že zadavatel si nepřeje zařízení se zvýšenou náročností údržby a také další zvýšení provozních nákladů (v podobě výměny filtračních materiálů či elektřiny), nebudu tyto zařízení dále uvažovat.

4. Omezení řešeného případu a volba vhodného způsobu předčištění pracovní látky

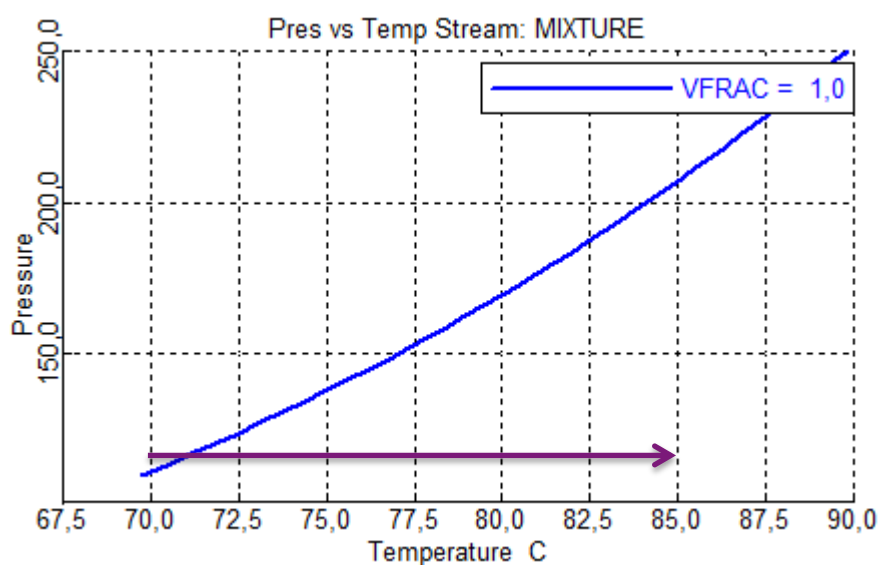
V předchozím textu jsou shrnuty základní způsoby čištění plynného proudu s obsahem kapalných a pevných příměsí. Venturiho pračka i náplňová kolona jsou nevhodná zařízení pro naši aplikaci, protože plyn nesmí být z důvodu následného spalování dále zvlhčován. Vzhledem k tomu, že jeden odlučovač kapek už v systému před výměníkem tepla je nainstalovaný, je zadavatelem považováno použití dalšího odlučovače také za nežádoucí. Pro použití v řešené spalovně se jako nejvhodnější jeví použití cyklonu, který je vhodný pro separaci kapalných i pevných částic.

Z analýzy dat provedené v kapitole 2.6 vyplývá, že úlety kapalného charakteru se zahřátím při průchodu výměníkem mění na pevné částice. Proto se zde nabízí možnost upravit znečištěný proud tak, aby obsahoval pouze pevné částice. Toto je možné i s ohledem na to, že na straně výstupu procesního odplynu z výměníku jsou úsady pouze pevného charakteru. Vzhledem k tomu, že návrh zařízení, které dokáže zachytit pevné i kapalné úlety je komplikovanější než návrh cyklonu pouze pro záchyt pevných částic je tedy vhodné předeřt znečištěný proud PO již před samotnou separací.

5. Předehřev proudu

5.1 Volba způsobu předehřevu procesního odplynu

Na základě omezení řešeného případu z předchozí kapitoly bude proveden návrh cyklonového aparátu s využitím předehřevu procesního odplynu. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.6, je procesní odplyn při stávající teplotě na vstupu do výměníku (70° C) na hranici rosného bodu. To se projevuje usazováním kapalných úletů na vstupu do výměníku. Jeví se tedy vhodné odplyn ohřát nad hranici, kdy se přestane vytvářet kapalná fáze. Z výsledku provedené simulace chování PO (diskutované dříve v kap. 2.6), byl obdržén graf závislosti rosného bodu na teplotě (viz Obr. 21). Osa x



Obr. 21 Závislost rosného bodu na teplotě a tlaku pro proud PO

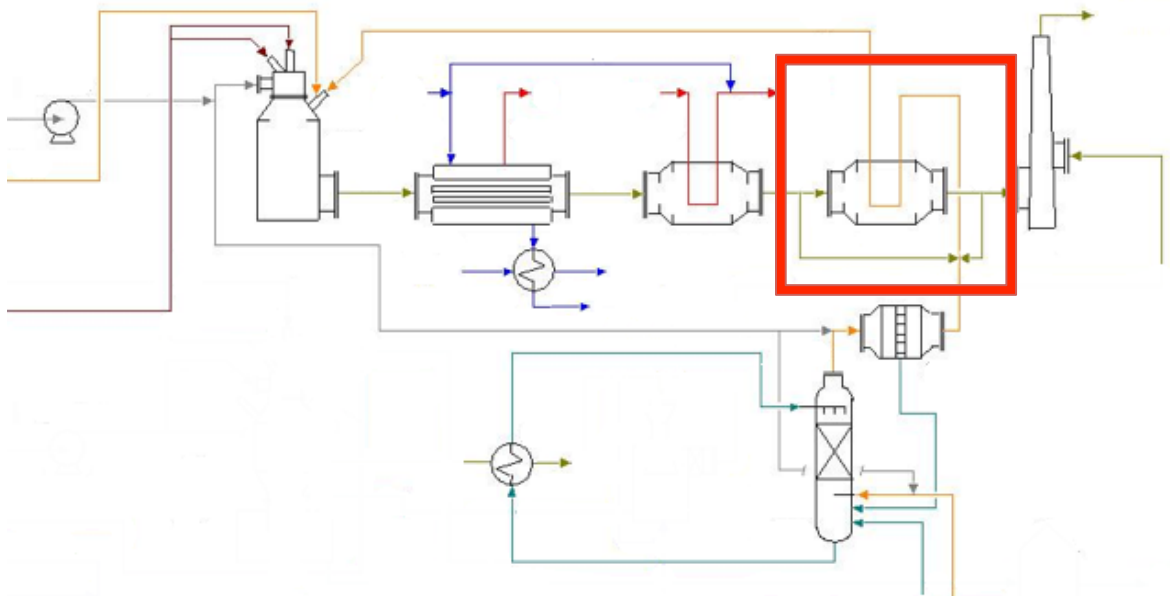
představuje teplotu a na ose y je vyneseny tlak. Modrá křivka představuje spojnici rosných bodů pro daný tlak a teplotu. Z tohoto grafu vyplývá, že při stávajícím tlaku 103 kPa a teplotě 70°C bude dostatečné ohřát plyn na cca 85° C (na Obr. 21 je tato skutečnost naznačena fialovou šipkou). Teplota 85° C by měla zaručit dostatečnou rezervu a odstup od křivky rosného bodu, a to i vzhledem k pravděpodobnému zvýšení objemu a následně i tlaku plynu po zahřátí. Rezerva je dostatečná i pro stav, kdy se vlivem změny provozních podmínek zvýší celkový tlak v soustavě.

Pro ohřev PO je možné použít více variant. Nabízí se zde možnost využít k ohřevu externí zařízení. Můžeme nainstalovat např. ohřev pomocí hořáků na zemní plyn. Zemní plyn je v podniku již zaveden. Je využíván ve spalovací komoře, proto by jeho

využití bylo snadné. Ovšem instalace a provoz tohoto druhu ohřevu by vzhledem k požadavku zvýšení teploty o pouhých 15 stupňů nebyl ekonomicky rentabilní.

Další varianta jak PO ohřát je využitím zbytkového tepla obsaženého v proudu spalin ze spalovací komory. Tepelnou energii předáme nástřikem spalin z pece přímo do potrubí PO. Vzhledem k tomu, že PO je veden z výměníku přímo do spalovny, nebude vadit, že je do něj přidáno malé množství spalin. Vytvořením propojení dosáhneme zvýšení teploty proudu PO. Nabízí se zde dvě možnosti, kde odebírat teplo pro ohřev PO, buď před, nebo za výměníkem. Upravené proudové schéma je na Obr. 22. Na schématu jsou naznačeny obě možnosti odběru, tedy před i za výměníkem.

Na vstupu spalin do výměníku je teplota proudu 431°C . Na výstupu má proud spalin teplotu 229°C . Pro určení množství spalin potřebných pro ohřev je proto nutné provést bilanční výpočet v simulačním programu, blíže rozebraný v následující kapitole.

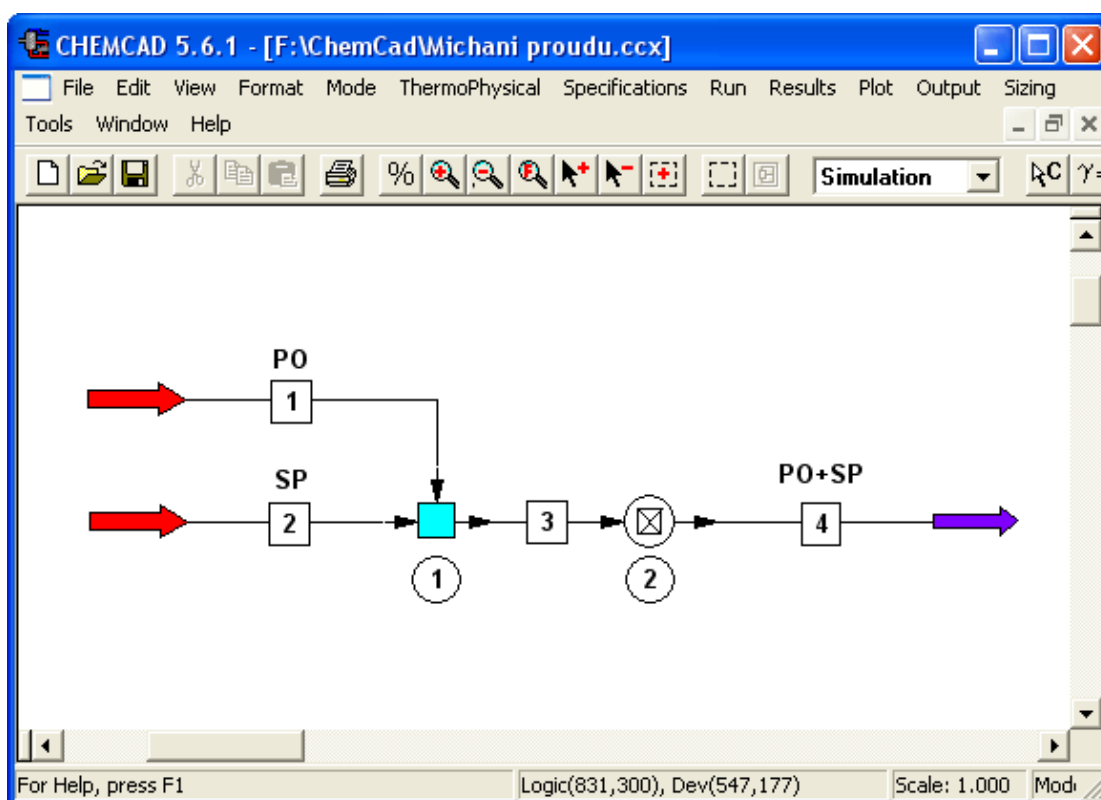


Obr. 22 Upravené proudové schéma s naznačenými možnostmi propojení SP pro ohřev PO

5.2 Simulační výpočet

Pro účel stanovení tepelné bilance byla provedena simulační úloha v programu CHEMCAD. Úkolem bylo zjistit množství odebíraných spalin nutné k ohřevu PO na požadovanou teplotu (ze 70 na 85° C). Simulace byla provedena pro dvě varianty odběru spalin, pro spaliny odebírané před a za výměníkem tepla.

Ze vstupních dat známe množství PO a musíme zjistit množství SP. Simulační schéma je znázorněno na Obr. 23. K vyřešení dané úlohy ve výpočtovém programu je použit směšovač ① řízený regulátorem ②. V simulaci je počítáno s vstupními daty pro čistý výměník (viz Tab. 3).



Obr. 23 Procesní schéma - "flowsheet" řešené simulační úlohy

Ze simulace provedené v programu CHEMCAD byly zjištěny hodnoty množství spalin, které je potřeba do proudu vstříkovat tak, aby bylo dosaženo požadované teploty proudu PO 85°C. Výsledky simulace pro obě posuzované varianty odběru spalin jsou zobrazeny v Tab. 5.

	Jednotka	Před výměňíkem	Za výměňíkem
tlak proudu po smíchání s proudem spalin	kPa	112	
teplota na kterou je potřeba proud ohřát	°C	85	
množství spalin potřebné k dosažení požadované teploty	kg/h	945	2323
celkový průtok proudu+spalin	kg/h	18075	19453
celkový objemový průtok na vstupu	m ³ /s	5,2	5,6
hustota proudu na vstupu do výměňíku	kg/m ³	0,9674	0,9689

Tab. 5 Výsledky simulace v CHEMCAD pro jednotlivé varianty odběru spalin

Jak je z Tab. 5 zřejmé, vyžaduje varianta odběru spalin za výměňíkem přibližně dvojnásobné množství odebraných spalin, než varianta odběru spalin před výměňíkem. Celkový objem proudu PO po smíchání se spalinami se v případě odběru před výměňíkem zvýší o 5%. V případě odběru za výměňíkem je nárůst objemu 11%.

6. Návrh cyklonu

6.1 Vstupní data pro návrh cyklonu

V následující tabulce (Tab. 6) jsou zobrazeny vstupní data, která byla použita pro návrhu cyklonu. Data byla postupně shromážděna z údajů poskytnutých zadavatelem a z analýzy vstupních dat. I když, je střední průměr částic, které mají být odloučeny, 50 μm , musíme pro návrh cyklonu počítat s nejmenší velikostí částic, které chceme v cyklonu zachytit. Proto pro vyšší bezpečnost a záchyt většího počtu částic volím pro výpočet cyklonu nejmenší průměr částic 20 μm .

	jednotka	Předpoklad nástřiku proudu	
		Před výměníkem	Za výměníkem
množství částic v proudu směsi	dm^3/h	57	
množství částic zachycených v odlučovači	dm^3/h	20-30	
množství částic, které je potřeba zachytit	dm^3/h	37	
tlak proudu po smíchání s proudem spalin	kPa	112	
teplota proudu	$^{\circ}\text{C}$	85	
množství spalin potřebné k dosažení požadované teploty	kg/h	945	2323
celkový průtok proudu+spalin	kg/h	18075	19453
střední průměr částic	μm	50	
volený nejmenší průměr částic	μm	20	
celkový objemový průtok na vstupu	m^3/s	5,2	5,6
dynamická viskozita proudu plynu	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	0,0195	
hustota proudu na vstupu	kg/m^3	0,9674	0,9689
hustota částic	kg/m^3	2640	
rychlost proudu na vstupu	m/s	17	18

Tab. 6 Vstupní parametry pro návrh cyklonu

6.2 Odvození výpočtových vztahů

Existuje řada metod řešení a analýzy návrhu cyklonového aparátu. V této práci byla zvolena metoda návrhu pomocí analytického výpočtu. Jako hlavní omezující parametr pro návrh cyklonu je považováno prostorové omezení, zejména výška cyklonu. Jako hlavní hledaný parametr ovlivňující výsledný návrh cyklonu byla (s ohledem na dříve diskutované prostorové možnosti) zvolena celková výška. Požadujeme tedy co nejnižší výšku výsledného zařízení.

Vztahy uvedené dále pro výpočet cyklonu, jsou odvozené ze vztahů uvedených v literatuře [10].

Pro výpočet cyklonu se vychází ze vztahu pro objemový průtok \dot{V} tekutiny válcovou částí cyklonu:

$$\dot{V} = 2\pi r H_v v_s \quad (1)$$

kde

- r_2 = poloměr válcové části, m
- H_v = výška válcové části, m
- v_s = rychlost usazování částice ve Stokesově oblasti, m/s

Vyjádřením rychlosti usazování v_s z rovnice (1) dostaneme:

$$v_s = \frac{\dot{V}}{2\pi r H_v} \quad (2)$$

Pro rychlost usazování vycházíme také z předpokladu, že částice se pohybují ve Stokesově oblasti. Proto použijeme následující vztah:

$$v_s = \frac{v_t^2}{r} \cdot \frac{d_p^2}{18\eta} (\rho_p - \rho) \quad (3)$$

kde

- v_t = tangenciální rychlost m/s
- d_p = průměr částice, m
- η = dynamická viskozita, $Pa \cdot s$
- ρ_p = hustota částic, kg/m^3
- ρ = hustota směsi, kg/m^3 .

Porovnáním rovnice 2 a 3 dostáváme:

$$v_t^2 = \frac{\dot{V}}{\pi H_v} \cdot \frac{9\eta}{d_p^2(\rho_p - \rho)} \quad (4)$$

Ze vztahu pro výpočet minimálního průměru usazené částice odvodíme vztah:

$$v_t = \frac{9\eta(r_2 - r_1)}{\pi(\rho_p - \rho)nd_p^2} \quad (5)$$

kde

- n = počet efektivních otáček ve válcové části, -
- r_1 = průměr přepadové trubky, m .

Obě předchozí rovnice (4 a 5) vyjadřují vztah pro výpočet v_t . Jejich porovnáním a následnou úpravou dostaneme vztah:

$$\dot{V} = \frac{9\eta(r_2 - r_1)^2 H_v}{n^2 \pi (\rho_p - \rho) d_p^2} \quad (6)$$

Počet otáček ve válcové části cyklonu se určí ze vztahu:

$$n = \frac{H_v}{B} \quad (7)$$

kde

- H_v = výška válcové části cyklonu, m
- B = výška vstupního otvoru, m .

Jako charakteristický rozměr cyklonu je považován jeho celkový průměr D . Ostatní rozměry jsou odvozeny na základě poměru hledaného rozměru ku hlavnímu průměru.

Pro výpočet průměru cyklonu jsou hodnoty jednotlivých dílčích rozměrů nahrazeny následujícími rovnicemi vyjadřujícími vztah pro přepočet na hlavní rozměr cyklonu D .

$$H_v = H'_v D \quad (8)$$

kde

- H'_v = poměrný parametr výšky válcové části cyklonu, -
- D = hledaný průměr cyklonu, m .

Dále:

$$r_1 = r'_1 D \quad (9)$$

$$r_2 = r'_2 D \quad (10)$$

$$B = B' D \quad (11)$$

kde

- r'_1 = poměrný parametr poloměru přepadové trubky, -
- r'_2 = poměrný parametr poloměru válcové části cyklonu, -
- B' = poměrný parametr výšky vstupního otvoru, -

z čehož dosazením rovnic (7), (8), (9), (10) a (11) do rovnice (6) dostáváme:

$$\dot{V} = \frac{9\eta (r'_2 D - r'_1 D)^2 (B' D)^2}{x_1 D \pi (\rho_p - \rho) d_p^2} \quad (12)$$

Následným vyjádřením hledaného charakteristického průměru D z rovnice (12) dostáváme konečný vztah pro **výpočet průměru cyklonu**, kde za proměnné s čárkou snadno dosadíme poměry ku hlavnímu rozměru:

$$D = \sqrt[3]{\frac{H'_v \pi (\rho_p - \rho) d_p^2 \dot{V}}{9\eta (r'_2 - r'_1)^2 B'^2}} \quad (13)$$

Obdržená rovnice (13) je použita pro výpočet průměru cyklonu. Zbývající rozměry cyklonu budou odvozeny zpětným dosazením vypočteného průměru a poměrných parametrů do rovnic (8), (9), (10) a (11).

Rychlost v na vstupu do cyklonu byla spočtena dle vztahu:

$$v = \frac{\dot{V}}{A \cdot B} \quad (14)$$

Pro účely návrhu cyklonového aparátu byla sestavena databáze doporučených rozměrů. Parametry cyklonů uvedených v tabulce (Tab. 7) byly testovány v laboratorních podmínkách a jsou v odborné literatuře doporučovány jako optimální rozměrová řešení. I když je část navrhovaných cyklonů známa již přes půl století, tak od té doby nebylo publikováno příliš mnoho novějších studií a většina dostupné literatury vychází z cyklonů navržených podle níže vybraných typů [11]. Tvarové charakteristiky jednotlivých cyklonů jsou zobrazeny na Obr. 24.

Z dostupných zdrojů byly vybrány následující typy cyklonů:

Stairmand (1951), Swift High Efficiency (1969) – jsou cyklony, které jsou řazeny mezi aparáty s vysokou účinností.

Lapple (1951), Swift General Purpose (1969) – zařízení pro obecné použití

Dirgo and Leith – experimentální model štíhlého a dlouhého cyklonu [11]

Standardní cyklon Taggartov – je cyklon starší koncepce s nižší účinností, používá se v provozech kde není nutné dosáhnout velkého stupně odprášení.

Cyklon podle Vorošilova – konstrukčně jednoduchý cyklon s klasickou konstrukcí. Vstupní rychlost má být taková aby nedocházelo k usazování částic na vstupu do cyklonu. Doporučená maximální vstupní rychlost je do 25 m/s se zvyšující se rychlostí účinnost roste pouze nepatrně.

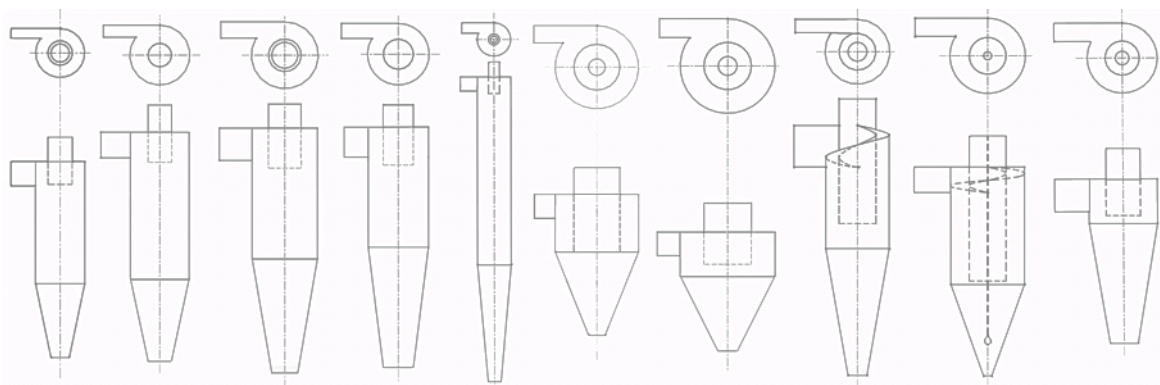
Cyklon Niogaz – je cyklon s úzkým a vysokým uspořádáním a se šroubovitým tvarem víka. Odstraňování usazenin bývá prováděno periodicky turniketovým uzávěrem nebo nepřetržitě. Je to cyklon s dobrou účinností využívaný v průmyslové praxi i pro zdravotnické účely.

Cyklon LIOT typ H – představuje typ konstrukce cyklonu se šroubovitou vestavbou ve víku usměrňující proud plynu a zabraňující usazování ve vstupní části. Dále je cyklon opatřen kuželovou vložkou ve výstupní části cyklonu, která zabraňuje strhávání prachu od stěn a usměrňuje výstupní proud [3].

Pačíska – rozměrové charakteristiky tohoto cyklonu jsou odvozeny od cyklonu navrženého Ing. Tomášem Pačískou, který řešil návrh cyklonového aparátu pro tuto spalovnu pomocí počítačového software s vlastní výpočtovou metodou. V této práci jsou rozměrové charakteristiky tohoto cyklonu zobrazeny pro kontrolu a porovnání se zbývajícími parametry cyklonů od ostatních autorů.

Název	D	r'_2	D'_p	H'_v	H'_k	B'	A'	D'_k	H'_p
Stairmand	1	0,5	0,5	2,5	1,5	0,5	0,2	0,375	0,5
Swift HE	1	0,5	0,4	2,5	1,4	0,44	0,21	0,4	0,5
Swift GP	1	0,5	0,5	2,0	1,75	0,5	0,25	0,4	0,6
Lapple	1	0,5	0,5	2,0	2,0	0,5	0,25	0,25	0,625
Dirgo and Leith	1	0,5	0,33	5,625	3,5	0,5	0,3	0,375	0,558
Taggartov	1	0,5	0,55	0,69	1	0,21	0,13	200 mm	0,68
Vorošilov	1	0,5	0,50	0,46	0,80	0,50	0,25	0,20	0,33
Niogaz	1	0,5	0,58	1,95	2,0	0,66	0,21	0,30	1,60
Liot	1	0,5	0,50	1,60	1,25	0,35	0,25	0,11	1,58
Pačíska	1	0,5	0,41	0,65	1,75	0,48	0,275	0,41	0,48

Tab. 7 Poměrné parametry vybraných cyklonů [3, 11]



Obr. 24 Schématické znázornění jednotlivých cyklonů; zleva: Stairmand, Swift HE, Swift GP, Lapple, Dirgo and Leith, Taggartov, Vorošilov, Niogaz, Liot, Pačíska

6.3 Analytické řešení

Dle vstupních parametrů v kapitole 5.1 a dle vztahů uvedených v kapitole 5.2. byly vypočteny jednotlivé rozměry pro cyklony zadané dle parametrů v tabulce 6. Kompletní výsledky výpočtů dle jednotlivých autorů jsou uvedeny v příloze diplomové práce. Výsledné rozměry jsou zobrazeny v následujících dvou tabulkách (Tab. 8, Tab. 9). První tabulka je pro odběr spalin před výměníkem V1, druhá tabulka je pro odběr za výměníkem. Všechny rozměry uvedené v obou tabulkách jsou v metrech.

Název	D	D_p	H_v	H_k	H_c	B	A	D_k	H_p
Stairmand	2,51	1,25	6,26	3,76	10,02	1,25	0,50	0,94	1,25
Swift HE	2,42	0,97	6,04	3,38	9,42	1,06	0,51	0,97	1,21
Swift GP	2,33	1,16	4,65	4,07	8,72	1,16	0,58	0,93	1,40
Lapple	2,33	1,16	4,65	4,65	9,30	1,16	0,58	0,58	1,45
Dirgo and Leith	2,70	0,89	15,19	9,45	24,64	1,35	0,81	1,01	1,51
Taggartov	3,12	1,72	2,15	3,12	5,27	0,66	0,41	0,20	2,12
Vorošilov	1,42	0,71	0,66	1,14	1,80	0,71	0,36	0,20	0,47
Niogaz	2,74	1,37	4,38	3,42	7,80	0,96	0,68	0,30	4,33
Liot	2,15	1,25	4,20	4,31	8,50	1,42	0,45	0,65	3,44
Pačíška	1,58	0,64	1,03	2,66	3,69	0,77	0,42	0,64	0,90

Tab. 8 Výsledné rozměry cyklonů pro odběr spalin před výměníkem (rozměry jsou v metrech)

Název	D	D_p	H_v	H_k	H_c	B	A	D_k	H_p
Stairmand	2,57	1,28	6,42	3,85	10,27	1,28	0,51	0,96	1,28
Swift HE	2,48	0,99	6,19	3,47	9,66	1,09	0,52	0,99	1,24
Swift GP	2,38	1,19	4,77	4,17	8,94	1,19	0,60	0,95	1,43
Lapple	2,38	1,19	4,77	4,77	9,53	1,19	0,60	0,60	1,49
Dirgo and Leith	2,77	0,91	15,57	9,69	25,26	1,38	0,83	1,04	1,54
Taggartov	3,20	1,76	2,21	3,20	5,40	0,67	0,42	0,20	2,17
Vorošilov	1,46	0,73	0,67	1,17	1,84	0,73	0,37	0,20	0,48
Niogaz	2,81	1,40	4,49	3,51	8,00	0,98	0,70	0,31	4,43
Liot	2,21	1,28	4,30	4,41	8,72	1,46	0,46	0,66	3,53
Pačíška	1,64	0,66	1,06	2,77	3,83	0,80	0,44	0,66	0,93

Tab. 9 Výsledné rozměry cyklonů pro odběr spalin za výměníkem (v metrech)

Z uvedených výsledků vyplývá, že nejnižší stavební výšku má cyklon navržený podle parametrů Vorošilova. Celková výška takto navrženého cyklonu je 1,8 m pro odběr spalin před výměníkem a 1,84 m pro odběr za výměníkem.

Poměrné parametry cyklonů uvedené v Tab. 7 použité pro návrh cyklonů dle jednotlivých autorů byly kromě parametrů Ing. Pačísky převzaty z literatury [3, 11]. V případě metody Ing. Pačísky byly k dispozici výsledné parametry cyklonu (uvedené v Tab. 8 a Tab. 9) a do Tab. 7 tak byly uvedeny poměrné parametry zpětně zjištěné pomocí analytického výpočtu z kap. 6.2. Porovnáme-li pak parametry v Tab. 7 od všech autorů včetně metody Ing. Pačísky, vidíme, že jednotlivé poměrné parametry velmi dobře odpovídají rozsahu poměrných hodnot od ostatních autorů a tudíž lze na základě této úvahy konstatovat, že „black-box“ metoda výpočtu cyklonu Ing. Pačísky je správná.

Z vypočítaných dat (Tab. 8 a Tab. 9) je patrné, že menší rozměry má cyklon s odběrem spalin před výměníkem. Tato skutečnost je zřejmá z dříve uvedeného faktu, že při odběru před výměníkem je potřeba pro ohřev proudu PO menší množství spalin (viz Tab. 5).

6. Zhodnocení dosažených výsledků

Analytický výpočet je vhodný k orientačnímu posouzení rozměrových charakteristik. Výsledky výpočtů by měly být korigovány pomocí údajů získaných v praxi nebo během laboratorního měření [3]. Analytický výpočet nebere v potaz další provozní parametry (např. vlhkost plynu nebo lepkavost částic). Pro přesné stanovení rozměrů cyklonu je také nutné řádně zanalyzovat velikost částic, které se mají v zařízení zachytit.

Nicméně rozměry cyklonů podle Vorošilova navržené pro jednotlivé varianty odběru jsou téměř shodné, liší se pouze v centimetrech. Vzhledem k této skutečnosti doporučuji odběr spalin za výměníkem V1. Toto nebude ovlivňovat průchod spalin přes výměník a navíc bude využito i zbytkové teplo spalin, které je jinak bez užitku mařeno v komíně. Výsledné rozměry vybraného cyklonu jsou v Tab. 9 tučně zvýrazněny.

Navržený cyklon podle Vorošilova patří k jednoduchým, ale spolehlivým zařízením. Vstupní rychlost 21,01 m/s, spočítaná dle vztahu (14), je pod hranicí maximální doporučené vstupní rychlosti 25 m/s. S dalším zvětšováním vstupní rychlosti by účinnost rostla pouze minimálně, ale tlaková ztráta by přesáhla únosnou hodnotu [3]. V praxi se ukazuje, že v cyklonu se obvykle zachytí více částic o menším průměru a méně částic s větším průměrem [10].

7. Závěr

Práce se na konkrétním průmyslovém případě zabývala analýzou možností a způsobu řešení předčištění plynné pracovní látky obsahující pevné a kapalně podíly. Na základě rozboru vstupních dat bylo zvolena metoda předčištění plynného proudu v podobě úpravy procesního odplynu ohřevem a následnou separací zbylých úletů v cyklonu. Ohřev bude proveden smícháním procesního odplynu s proudem spalin. Provedením simulace v programu CHEMCAD bylo zjištěno množství spalin potřebných pro ohřev PO. Na základě analýzy dat, požadavků zadavatele a řešerše z odborné literatury byl jako vyhovující zařízení vybrán odstředivý odlučovač - cyklon. Jeho návrh byl proveden pomocí analytického výpočtu, který vycházel z předpokladu znalosti poměrných parametrů jednotlivých částí cyklonu. Je důležité zmínit, že pro účely výpočtu byla zvolena hodnota nejmenší velikosti částic, které se mají v cyklonu zachytit. Z výše provedeného výpočtu je vybrán a doporučen rozměr jednoho cyklonu.

Přesto, že se cyklony používají v mnoha průmyslových odvětvích, je třeba konstatovat, že komplexní popis mechanismu separace částic a následný návrh zařízení ještě stále není uceleně zdokumentovaný v obecně dostupné odborné literatuře. Důvodem této skutečnosti je fakt, že proudění v cyklonu je poměrně složité a návrh jednoduchého cyklonu zahrnuje určení mnoha rozměrů (průměr cyklonu, rozměry vstupního otvoru, rozměry výstupních otvorů, výšku válcové a kuželové části atd.). Simulace proudu v tak početné variabilitě rozměrů je složitá, proto návrh cyklonu vychází v technické praxi z předem stanovených modelů, které jsou při návrhu cyklonu modifikovány pro danou situaci.

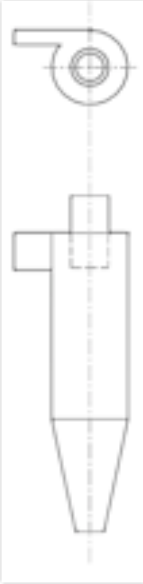
I přes požadavek zadavatele neměnit v nedávné době rekonstruovaný odlučovač kapek, lze jako alternativní možnost předčištění plynného proudu přesto silně doporučit provedení úpravy stávajícího odlučovače. Úprava stávajícího odlučovače by byla určitě méně nákladná a jednodušší než instalace cyklonového aparátu a propojení s tryskou pro ohřev spalin. Efektivní úpravou odlučovače by bylo možno docílit zachytu většího množství částic. Nyní se na odlučovači zachytí přibližně polovina z celkového množství, a proto by jeho zdokonalením (či zdvojením) mohla být zvýšena účinnost předčištění plynného proudu velmi výrazně.

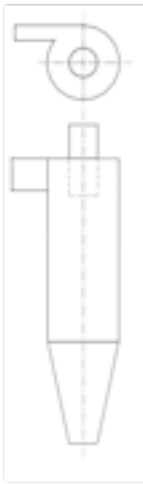
8. Citovaná literatura

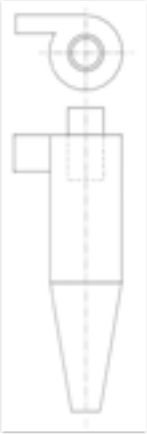
- [1] SEADER, J a Ernest J HENLEY. *Separation process principles*. New York: Wiley, 1998, 886 s. ISBN 04-715-8626-9.
- [2] DITL, Pavel. *Difúzně separační pochody*. Vyd. 3. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008, 231 s. ISBN 978-80-01-03972-4.
- [3] PILAŘ, Antonín. *Chemické inženýrství: Mechanické operace v plynné fázi*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1963.
- [4] PERRY, R. a D. W. GREEN. *Perry's chemical engineers' handbook*. 8th ed. New York: McGraw-Hill, 2008, 1 s. ISBN 00-714-2294-3.
- [5] *Fundamentals of Gas Solids/Liquids separation: Mist Elimination* [online]. Houston, Texas [cit. 2012-04-23]. Dostupné z: <http://www.muellerenvironmental.com/documents/Fundamentals%20of%20Gas%20Solids%20Liquids%20Separation.pdf>
- [6] MEDEK, Jaroslav. *Hydraulické pochody*. 2. vyd. Brno: VUT v Brně, 1994, 339 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0563-5.
- [7] VAVRO, K., a P. HODŮR. *Cyklónové aparáty pre výrobné technológie a ochranu životného prostredia*. Bratislava: STU, 1996, 263 s. ISBN 80-227-0896-8.
- [8] VENTURI JET PUMPS LTD. Venturi Gas Scrubbers [online]. [cit. 2012-04-24]. Dostupné z: <http://www.venturipumps.com/gasscrubber.htm>
- [9] PALL CORPORATION. *Recent Developments in Liquid/Gas Separation Technology* [online]. [cit. 2012-04-23]. Dostupné z: <http://www.pall.com/main/Fuels-and-Chemicals/Recent-Developments-in-Liquid-Gas-Separat-48601.page#46298>
- [10] MÍKA, Vladimír. *Základy chemického inženýrství*. 2., nezm. vyd. Praha: SNTL, 1981, 870 s.
- [11] ECONOMOPOULOU, Alexia A. a Alexander P. ECONOMOPOULOUS. Rapid Performance Evaluation and Optimal Sizing of Dry Cyclone Separators. *Journal of Environmental Engineering* [online]. 2002, s. 11 [cit. 2012-04-23]. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2002)128:3(275). Dostupné z: <http://alturl.com/45ig3>

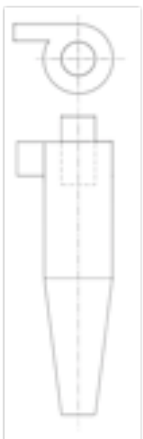
9. Přílohy


V příloze jsou zobrazeny výsledky výpočtu jednotlivých druhů cyklonů z vlastnoručně vypracovaného výpočtového programu. V každé tabulce je jeden typ cyklonu spočítaný pro oba dva způsoby odběru spalin.


Výpočet cyklonu STAIRMAND						
parametr	značka	před vým.	za vým.	jednotka		
dynamická viskozita	η	0,0195	0,0195	MPa		
hustota částic	ρ_p	2640	2640	kg/m ³		
hustota proud plynu	ρ	0,9674	0,9689	kg/m ³		
průměr částice	d_p	20	20	μm		
průtok na vstupu do cyklonu	V	5,2	5,6	m/s		
POMĚRNÉ PARAMETRY						
průměr cyklonu	D	1,00	1,00	-		
průměr přepadové trubky	D'_p	0,50	0,50	-		
výška válcové části	H'_v	2,50	2,50	-		
výška kuželové části	H'_k	1,50	1,50	-		
výška vstupního otvoru	B'	0,50	0,50	-		
šířka vstupního otvoru	A'	0,20	0,20	-		
prům. výstupu z kužel. části	D'_k	0,38	0,38	-		
zapuštění přepadové trubky	H'_p	0,50	0,50	-		
výpočet průměru cyklonu	D	2,50	2,57	m		
DOPOČET ROZMĚRŮ						
průměr přepadové trubky	D_p	1,25	1,28	m		
výška válcové části	H_v	6,26	6,42	m		
výška kuželové části	H_k	3,76	3,85	m		
výška vstupního otvoru	B	1,25	1,28	m		
šířka vstupního otvoru	A	0,50	0,51	m		
prům. výstupu z kužel. části	D_k	0,94	0,96	m		
zapuštění přepadové trubky	H_p	1,25	1,28	m		
celková výška	H_c	10,02	10,27	m		
vstupní rychlost	v	8,29	8,50	m/s		

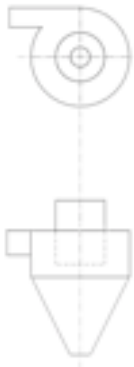
Výpočet cyklonu SWIFT High Efficiency						
parametr	značka	před vým.	za vým.	jednotka		
dynamická viskozita	η	0,0195	0,0195	MPa		
hustota částic	ρ_p	2640	2640	kg/m ³		
hustota proud plynu	ρ	0,9674	0,9689	kg/m ³		
průměr částice	d_p	20	20	μm		
průtok na vstupu do cyklonu	V	5,2	5,6	m/s		
POMĚRNÉ PARAMETRY						
průměr cyklonu	D	1,00	1,00	-		
průměr přepadové trubky	D'_p	0,40	0,40	-		
výška válcové části	H'_v	2,50	2,50	-		
výška kuželové části	H'_k	1,40	1,40	-		
výška vstupního otvoru	B'	0,44	0,44	-		
šířka vstupního otvoru	A'	0,21	0,21	-		
prům. výstupu z kužel. části	D'_k	0,40	0,40	-		
zapuštění přepadové trubky	H'_p	0,50	0,50	-		
výpočet průměru cyklonu	D	2,42	2,48	m		
DOPOČET ROZMĚRŮ						
průměr přepadové trubky	D_p	0,97	0,99	m		
výška válcové části	H_v	6,04	6,19	m		
výška kuželové části	H_k	3,38	3,47	m		
výška vstupního otvoru	B	1,06	1,09	m		
šířka vstupního otvoru	A	0,51	0,52	m		
prům. výstupu z kužel. části	D_k	0,97	0,99	m		
zapuštění přepadové trubky	H_p	1,21	1,24	m		
celková výška	H_c	9,42	9,66	m		
vstupní rychlost	v	9,65	9,89	m/s		

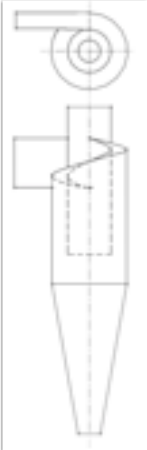
Výpočet cyklonu SWIFT General Purpose						
parametr	značka	před vým.	za vým.	jednotka		
dynamická viskozita	η	0,0195	0,0195	MPa		
hustota částic	ρ_p	2640	2640	kg/m ³		
hustota plynné směsi	ρ	0,9674	0,9689	kg/m ³		
průměr částice	d_p	20	20	μm		
průtok na vstupu do cyklonu	V	5,2	5,6	m/s		
POMĚRNÉ PARAMETRY						
průměr cyklonu	D	1,00	1,00	-		
průměr přepadové trubky	D'_p	0,50	0,50	-		
výška válcové části	H'_v	2,00	2,00	-		
výška kuželové části	H'_k	1,75	1,75	-		
výška vstupního otvoru	B'	0,50	0,50	-		
šířka vstupního otvoru	A'	0,25	0,25	-		
prům. výstupu z kužel. části	D'_k	0,40	0,40	-		
zapuštění přepadové trubky	H'_p	0,60	0,60	-		
výpočet průměru cyklonu	D	2,33	2,38	m		
DOPOČET ROZMĚRŮ						
průměr přepadové trubky	D_p	1,16	1,19	m		
výška válcové části	H_v	4,65	4,77	m		
výška kuželové části	H_k	4,07	4,17	m		
výška vstupního otvoru	B	1,16	1,19	m		
šířka vstupního otvoru	A	0,58	0,60	m		
prům. výstupu z kužel. části	D_k	0,93	0,95	m		
zapuštění přepadové trubky	H_p	1,40	1,43	m		
celková výška	H_c	8,72	8,94	m		
vstupní rychlost	v	7,69	7,89	m/s		


Výpočet cyklonu LAPPLE						
parametr	značka	před vým.	za vým.	jednotka		
dynamická viskozita	η	0,0195	0,0195	MPa		
hustota částic	ρ_p	2640	2640	kg/m ³		
hustota plynné směsi	ρ	0,9674	0,9689	kg/m ³		
průměr částice	d_p	20	20	μm		
průtok na vstupu do cyklonu	V	5,2	5,6	m/s		
POMĚRNÉ PARAMETRY						
průměr cyklonu	D	1,00	1,00	-		
průměr přepadové trubky	D'_p	0,50	0,50	-		
výška válcové části	H'_v	2,00	2,00	-		
výška kuželové části	H'_k	2,00	2,00	-		
výška vstupního otvoru	B'	0,50	0,50	-		
šířka vstupního otvoru	A'	0,25	0,25	-		
prům. výstupu z kužel. části	D'_k	0,25	0,25	-		
zapuštění přepadové trubky	H'_p	0,625	0,625	-		
výpočet průměru cyklonu	D	2,33	2,38	m		
DOPOČET ROZMĚRŮ						
průměr přepadové trubky	D_p	1,16	1,19	m		
výška válcové části	H_v	4,65	4,77	m		
výška kuželové části	H_k	4,65	4,77	m		
výška vstupního otvoru	B	1,16	1,19	m		
šířka vstupního otvoru	A	0,58	0,60	m		
prům. výstupu z kužel. části	D_k	0,58	0,60	m		
zapuštění přepadové trubky	H_p	1,45	1,49	m		
celková výška	H_c	9,30	9,53	m		
vstupní rychlost	v	7,69	7,89	m/s		

Výpočet cyklonu DIRGO AND LEITH						
parametr	značka	před vým.	za vým.	jednotka		
dynamická viskozita	η	0,0195	0,0195	MPa		
hustota částic	ρ_p	2640	2640	kg/m ³		
hustota plynné směsi	ρ	0,9674	0,9689	kg/m ³		
průměr částice	d_p	20	20	μm		
průtok na vstupu do cyklonu	V	5,2	5,6	m/s		
POMĚRNÉ PARAMETRY						
průměr cyklonu	D	1,00	1,00	-		
průměr přepadové trubky	D'_p	0,33	0,33	-		
výška válcové části	H'_v	5,625	5,625	-		
výška kuželové části	H'_k	3,50	3,50	-		
výška vstupního otvoru	B'	0,50	0,50	-		
šířka vstupního otvoru	A'	0,30	0,30	-		
prům. výstupu z kužel. části	D'_k	0,375	0,375	-		
zapuštění přepadové trubky	H'_p	0,558	0,558	-		
výpočet průměru cyklonu	D	2,70	2,77	m		
DOPOČET ROZMĚRŮ						
průměr přepadové trubky	D_p	0,89	0,91	m		
výška válcové části	H_v	15,19	15,57	m		
výška kuželové části	H_k	9,45	9,69	m		
výška vstupního otvoru	B	1,35	1,38	m		
šířka vstupního otvoru	A	0,81	0,83	m		
prům. výstupu z kužel. části	D_k	1,01	1,04	m		
zapuštění přepadové trubky	H_p	1,51	1,54	m		
celková výška	H_c	24,64	25,26	m		
vstupní rychlost	v	9,65	9,89	m/s		

Výpočet cyklonu TAGGARTOV						
parametr	značka	před vým.	za vým.	jednotka		
dynamická viskozita	η	0,0195	0,0195	MPa		
hustota částic	ρ_p	2640	2640	kg/m ³		
hustota plynné směsi	ρ	0,9674	0,9689	kg/m ³		
průměr částice	d_p	20	20	μm		
průtok na vstupu do cyklonu	V	5,2	5,6	m/s		
POMĚRNÉ PARAMETRY						
průměr cyklonu	D	1,00	1,00	-		
průměr přepadové trubky	D'_p	0,55	0,55	-		
výška válcové části	H'_v	0,69	0,69	-		
výška kuželové části	H'_k	1,00	1,00	-		
výška vstupního otvoru	B'	0,21	0,21	-		
šířka vstupního otvoru	A'	0,13	0,13	-		
prům. výstupu z kužel. části	D'_k	0,20	0,20	-		
zapuštění přepadové trubky	H'_p	0,68	0,68	-		
výpočet průměru cyklonu	D	3,12	3,20	m		
DOPOČET ROZMĚRŮ						
průměr přepadové trubky	D_p	1,72	1,76	m		
výška válcové části	H_v	2,15	2,21	m		
výška kuželové části	H_k	3,12	3,20	m		
výška vstupního otvoru	B	0,66	0,67	m		
šířka vstupního otvoru	A	0,41	0,42	m		
prům. výstupu z kužel. části	D_k	0,20	0,20	m		
zapuštění přepadové trubky	H_p	2,12	2,17	m		
celková výška	H_c	5,27	5,40	m		
vstupní rychlost	v	19,58	20,06	m/s		

Výpočet cyklonu VOROŠILOV						
parametr	značka	před vým.	za vým.	jednotka		
dynamická viskozita	η	0,0195	0,0195	MPa		
hustota částic	ρ_p	2640	2640	kg/m ³		
hustota plynné směsi	ρ	0,9674	0,9689	kg/m ³		
průměr částice	d_p	20	20	μm		
průtok na vstupu do cyklonu	V	5,2	5,6	m/s		
POMĚRNÉ PARAMETRY						
průměr cyklonu	D	1,00	1,00	-		
průměr přepadové trubky	D'_p	0,50	0,50	-		
výška válcové části	H'_v	0,46	0,46	-		
výška kuželové části	H'_k	0,80	0,80	-		
výška vstupního otvoru	B'	0,50	0,50	-		
šířka vstupního otvoru	A'	0,25	0,25	-		
prům. výstupu z kužel. části	D'_k	0,20	0,20	-		
zapuštění přepadové trubky	H'_p	0,33	0,33	-		
výpočet průměru cyklonu	D	1,42	1,46	m		
DOPOČET ROZMĚRŮ						
průměr přepadové trubky	D_p	0,71	0,73	m		
výška válcové části	H_v	0,66	0,67	m		
výška kuželové části	H_k	1,14	1,17	m		
výška vstupního otvoru	B	0,71	0,73	m		
šířka vstupního otvoru	A	0,36	0,37	m		
prům. výstupu z kužel. části	D_k	0,28	0,29	m		
zapuštění přepadové trubky	H_p	0,47	0,48	m		
celková výška	H_c	1,80	1,84	m		
vstupní rychlost	v	20,50	21,01	m/s		

Výpočet cyklonu NIOGAZ						
parametr	značka	před vým.	za vým.	jednotka		
dynamická viskozita	η	0,0195	0,0195	MPa		
hustota částic	ρ_p	2640	2640	kg/m ³		
hustota plynné směsi	ρ	0,9674	0,9689	kg/m ³		
průměr částice	d_p	20	20	μm		
průtok na vstupu do cyklonu	V	5,2	5,6	m/s		
POMĚRNÉ PARAMETRY						
průměr cyklonu	D	1,00	1,00	-		
průměr přepadové trubky	D'_p	0,58	0,58	-		
výška válcové části	H'_v	1,95	1,95	-		
výška kuželové části	H'_k	2,00	2,00	-		
výška vstupního otvoru	B'	0,66	0,66	-		
šířka vstupního otvoru	A'	0,21	0,21	-		
prům. výstupu z kužel. části	D'_k	0,30	0,30	-		
zapuštění přepadové trubky	H'_p	1,60	1,60	-		
výpočet průměru cyklonu	D	2,15	2,21	m		
DOPOČET ROZMĚRŮ						
průměr přepadové trubky	D_p	1,25	1,28	m		
výška válcové části	H_v	4,20	4,30	m		
výška kuželové části	H_k	4,30	4,41	m		
výška vstupního otvoru	B	1,42	1,46	m		
šířka vstupního otvoru	A	0,45	0,46	m		
prům. výstupu z kužel. části	D_k	0,65	0,66	m		
zapuštění přepadové trubky	H_p	3,44	3,53	m		
celková výška	H_c	8,50	8,71	m		
vstupní rychlost	v	8,10	8,30	m/s		

Výpočet cyklonu LIOT						
parametr	značka	před vým.	za vým.	jednotka		
dynamická viskozita	η	0,0195	0,0195	MPa		
hustota částic	ρ_p	2640	2640	kg/m ³		
hustota plynné směsi	ρ	0,9674	0,9689	kg/m ³		
průměr částice	d_p	20	20	μm		
průtok na vstupu do cyklonu	V	5,2	5,6	m/s		
POMĚRNÉ PARAMETRY						
průměr cyklonu	D	1,00	1,00	-		
průměr přepadové trubky	D'_p	0,50	0,50	-		
výška válcové části	H'_v	1,60	1,60	-		
výška kuželové části	H'_k	1,25	1,25	-		
výška vstupního otvoru	B'	0,35	0,35	-		
šířka vstupního otvoru	A'	0,25	0,25	-		
prům. výstupu z kužel. části	D'_k	0,11	0,11	-		
zapuštění přepadové trubky	H'_p	1,58	1,58	-		
výpočet průměru cyklonu	D	2,74	2,81	m		
DOPOČET ROZMĚRŮ						
průměr přepadové trubky	D_p	1,37	1,40	m		
výška válcové části	H_v	4,38	4,49	m		
výška kuželové části	H_k	3,42	3,51	m		
výška vstupního otvoru	B	0,96	0,98	m		
šířka vstupního otvoru	A	0,68	0,70	m		
prům. výstupu z kužel. části	D_k	0,30	0,31	m		
zapuštění přepadové trubky	H_p	4,33	4,43	m		
celková výška	H_c	7,80	8,00	m		
vstupní rychlost	v	7,93	8,13	m/s		