



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**NÁVRH CYKLONOVÉHO ODLUČOVAČE PRO  
HORKÝ PLYN**

DESIGN OF CYCLONE SEPARATOR FOR HOT GAS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Bc. Libor Kadlík

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2022





## Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Bc. Libor Kadlík**  
Studijní program: Energetické a termofluidní inženýrství  
Studijní obor: Energetické inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.**  
Akademický rok: 2021/22

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:

### Návrh cyklonového odlučovače pro horký plyn

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Odprašování horkých plynů je problematické pro velké objemy a velké tepelné ztráty. V rámci diplomové práce bude provedena rešerše odprašovacích zařízení s důrazem na cyklóny a multicyklóny. Dále bude proveden návrh pro konkrétní aplikaci a to včetně výpočtu tepelných ztrát a návrhu jejich eliminace.

#### Cíle diplomové práce:

- rešerše metod odprašování horkých plynů,
- návrh variant cyklonového odlučovače,
- výpočet tepelných ztrát a návrh optimální izolace,
- technická dokumentace.

#### Seznam doporučené literatury:

VEJVODA, Josef, Pavel MACHAČ a Petr BURYAN. Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2003. ISBN 80-708-0517-X.

HEMERKA, Jiří, Pavel VYBÍRAL. Ochrana ovzduší. Praha: ČVUT v Praze, 2010. ISBN 978-80-01-04646-3.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá odlučováním tuhých znečišťujících látek. Práce je rozdělena do třech částí. V úvodní části je provedena rešerše metod odlučování tuhých látek. Druhá část se zabývá návrhem optimálního cyklónu s vysokou odlučivostí a tvorbou technické dokumentace dílů. Závěrečná část je zaměřena na výpočet tepelných ztrát daného odlučovače a návrh vhodné izolace.

### **Klíčová slova**

Odlučování tuhých částic, cyklonový odlučovač, vysoká odlučivost, tepelné ztráty

## **ABSTRACT**

This master's thesis deals with separating of solid particles. The thesis is divided into three parts. In first part are described principles of separating solid particles from gas. In second part is designed optimal cyclone gas separator with high efficiency and are made technical drawings of components. Final part is focused on heat loss of designed cyclone gas separator and design of optimal insulation.

### **Key words**

Separating solid particles, cyclone separator, high efficiency, heat loss

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KADLÍK, Libor. *Návrh cyklonového odlučovače pro horký plyn* [online]. Brno, 2022 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139574>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Marek Baláš.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Návrh cyklonového odlučovače pro horký plyn vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

*Libor Kadlík*

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto doc. Ing. Marku Balášovi, PhD. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

## OBSAH

ÚVOD.....	13
1 Charakteristika tuhých částic.....	14
1.1 Velikost a tvar.....	14
1.1.1 Mikroskopická velikost – Feretův a Martinův průměr.....	14
1.1.2 Ekvivalentní velikost částic.....	15
1.1.3 Zrnitost.....	15
1.2 Charakteristické vlastnosti.....	15
1.2.1 Adheze částic a lepidlost.....	16
1.2.2 Abraze materiálu.....	16
1.2.3 Smáčivost částic.....	17
1.2.4 Sypný úhel a sypná hmotnost.....	18
1.2.5 Úhel vnitřního tření, úhel skluzu.....	18
1.2.6 Přirozený náboj částic.....	18
1.2.7 Výbušnost.....	18
2 Obecné vlastnosti odlučovačů.....	20
2.1 Celková a frakční odlučivost.....	20
2.1.1 Přibližná mez odlučivosti.....	21
2.2 Tlaková ztráta.....	21
2.3 Ukazatel jakosti.....	22
3 Suché mechanické odlučovače.....	23
3.1 Gravitační – usazovací komory a prašníky.....	23
3.1.1 Základní provedení usazovací komory.....	23
3.1.2 Wiestova usazovací komora.....	23
3.1.3 Prašník.....	24
3.2 Setrvačné.....	24
3.2.1 Lamelové.....	24
3.2.2 Žaluziové.....	24
3.3 Odstředivé – vírové odlučovače (cyklóny).....	25
3.3.1 Cyklón s kolmým tečným vstupem.....	28
3.3.2 Cyklón se šroubovitým vstupem.....	28
3.3.3 Davidsonův cyklón.....	28
3.3.4 Cyklóny LIOT.....	29
3.3.5 Batakův cyklón.....	30
3.3.6 Hartmannův cyklón.....	31
3.3.7 Van Tongerenův odlučovač.....	31
3.3.8 Feifelův cyklón.....	33
3.3.9 Cyklón Korsá.....	34
3.4 Odstředivé – bateriové.....	34
3.4.1 Bateriový odlučovač CG-1.....	35

3.4.2	Bateriový odlučovač Prat-Daniel.....	36
3.4.3	Bateriový odlučovač Feifel.....	37
3.4.4	Bateriový odlučovač VTI.....	38
3.4.5	Bateriový odlučovač Schicht.....	38
3.4.6	Bateriový odlučovač Sirocco.....	38
3.4.7	Howdenův bateriový odlučovač.....	39
3.4.8	Bateriový odlučovač Dunlab II ES-2.....	39
3.5	Současné trendy.....	40
3.6	Rotační – rotoklony.....	44
4	Mokrý mechanický odlučovač.....	45
4.1	Sprchové.....	45
4.2	Setrvačné.....	45
4.3	Vírové.....	46
4.4	Pěnové.....	46
4.5	Proudové.....	47
5	Elektrický odlučovač.....	49
6	Filtry.....	51
7	Návrhy variant základního cyklónu.....	55
7.1	Charakteristické parametry suspenze.....	55
7.1.1	Hustota nosného plynu.....	55
7.1.2	Dynamická viskozita plynu.....	56
7.2	Teoretická frakční odlučivost.....	56
7.2.1	Barthův model.....	57
7.2.2	Lappleho model.....	58
7.3	Teoretická celková odlučivost.....	59
7.4	Závislost odlučivosti na počtu sériově zapojených cyklónů Swift.....	59
7.5	Tlaková ztráta.....	60
7.6	Návrh cyklónu dle simplexu Lapple.....	61
7.7	Návrh cyklónu dle simplexu Stairmand.....	62
7.8	Návrh cyklónu dle simplexu Swift.....	62
7.9	Zhodnocení základních variant cyklónů.....	63
8	Sériově zapojený cyklonový odlučovač Swift.....	65
9	Paralelně zapojený cyklonový odlučovač Swift.....	69
10	Shrnutí jednotlivých řešení.....	72
11	Technické provedení paralelního odlučovače.....	74
11.1	Volba materiálu.....	74
11.2	Upravený cyklón Swift.....	74
11.3	Rozváděcí hlava pro rovnoměrné rozdělení vstupního plynu.....	75
11.4	Odvod vyčištěného plynu.....	76
11.5	Výsypka.....	76
12	Přenos tepla.....	77
12.1	Přenos tepla vedením.....	77
12.2	Přenos tepla prouděním.....	78
12.3	Přenos tepla zářením.....	80



13	Tepelné ztráty odlučovače .....	81
13.1	Měrná tepelná kapacita suspenze .....	81
13.2	Tepelná vodivost suspenze .....	81
13.3	Výpočet tepelných ztrát rozváděcí hlavy .....	82
13.4	Výpočet tepelných ztrát nátrubků .....	85
13.5	Výpočet tepelných ztrát cyklónu .....	86
13.6	Výpočet tepelných ztrát v odvodních troubách .....	87
13.7	Volba izolačního materiálu .....	87
14	Korekce teoretické odlučivosti odlučovače .....	90
	ZÁVĚR .....	91
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	93
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	96
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	99
	SEZNAM TABULEK .....	101
	SEZNAM PŘÍLOH .....	102



## **ÚVOD**

S rozvojem moderní společnosti jsou spjaty mj. rostoucí emise tuhých znečišťujících látek, které mají nepříznivý vliv na zdraví člověka a stav životního prostředí. Tuhé znečišťující látky vznikají přirozeně a také vlivem působení člověka, a to především jako vedlejší produkt energetických a průmyslových zařízení.

Z důvodu nekontrolovaného nárustu znečišťujících látek v ovzduší a jejich dopadu na životní prostředí byly, především ve vyvinutých zemích, podniknuty legislativní kroky za účelem zastropení emisních limitů nežádoucích látek, kde mezi základní polutanty patří tuhé znečišťující látky, oxidy dusíku, oxidy síry, oxidy uhlíku a uhlovodíky. Dále byly definován systém kontroly jejich dodržování a sankce za porušení.

V posledních letech dochází v Evropské unii ke zpřísňování emisních limitů, čímž je neustále vyvíjen tlak na producenty působící v mnoha odvětvích lidské činnosti, kteří jsou nuceni hledat stále účinnější metody eliminace znečištění nejen výše uvedenými polutanty.

Cílem práce je provést rešerši technologií odprašování horkých plynů s důrazem na využití cyklónů a multicyklónů, navrhnout optimální provedení pro daný problém, včetně výpočtu tepelných ztrát, návrhu izolace a vypracování technické dokumentace.

## 1 Charakteristika tuhých částic

Tuhé částice vznikají buď přírodní cestou nebo jako produkt lidské činnosti. Částice vzniklé přírodní cestou lze dále rozdělit na kosmický prach a částice pozemského původu, tedy anorganický (vzniká vulkanickou činností, vlivem požárů, písečnými bouřemi, erozí hornin apod.) a organický prach (pyl, výtrus z hub, viry, semena rostlin, aj.). Lidskou činností vznikají částice primární (vznikají přímo lidskou činností) a sekundární (vznikají přeměnou plyných polutantů v atmosféře na drobný prach). Mezi hlavní producenty primárních částic patří energetický průmysl (spalování tuhých paliv), průmysl stavebních hmot (výroba a užívání sypkých materiálů), chemický průmysl (výroba a aplikace hnojiv), těžba a zpracování nerostných surovin, hutní průmysl, automobilová doprava, aj. [1]

Tuhé částice lze rozdělit dle způsobu vzniku a jejich velikosti na: [2]

- Aerosol – obecné označení pevných nebo kapalných částic rozptýlených v plynu
- Kouř (saze) – vzniká nedokonalým spalováním, částice uhlíku o velikosti 0,01-0,5  $\mu\text{m}$
- Dým – vzniká při oxidačních procesech kondenzací látek nebo konverzí z plyné fáze, částice dosahují velikosti 0,1-1  $\mu\text{m}$
- Popílek – jedná se o úlet během spalovacího procesu, částice o velikosti 1-100  $\mu\text{m}$
- Prach – vzniká převážně mechanicky (otěr, drcení, mletí, aj.)

### 1.1 Velikost a tvar

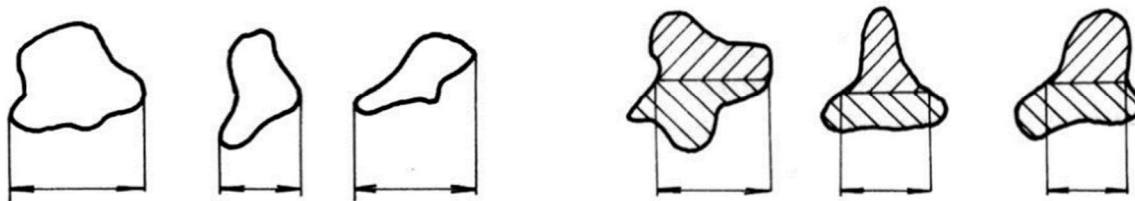
Velikost a tvar tuhých částic patří mezi základní veličiny, dle kterých je zvolena optimální metoda jejich odlučování, a závisí na způsobu jejich vzniku. Dále jsou na nich zásadním způsobem závislé pohybové vlastnosti, které jsou rozhodující pro stanovení odlučovací rychlosti a celkové účinnosti odloučení u mechanických i elektrických odlučovačů. Velikost částice rozhoduje o velikosti elektrického náboje, jenž je schopna nést, což je důležitý parametr pro optimální návrh elektrického odlučovače. Velikost je dále zásadní pro účinnost difuze, tedy jinak řečeno je klíčovým parametrem pro využití filtrů. Částice můžeme dle tvaru rozdělit do dvou základních kategorií:

- Izometrické (kruhové) – všechny 3 rozměry jsou obdobné, vznikají zejména kondenzací během spalovacího procesu – jemná frakce elektrárenského popílku
- Neizometrické – vznikají mechanicky (mletí, drcení, otěr, aj.)
  - Laminární (ploché) – dva rozměry jsou řádově větší než třetí
  - Fibrilární (vláknité) – dva rozměry jsou řádově menší než třetí

Částice mohou dále koagulovat a vytvářet složité izometrické tvary nebo řetězce. Velikost částic lze určit pestrou škálou charakteristických rozměrů dle užití měřicí metody. [1]

#### 1.1.1 Mikroskopická velikost – Feretův a Martinův průměr

Feretův průměr lze definovat jako vzdálenost dvou rovnoběžných tečen k obrysu částice. Martinův průměr je definován jako délka tětivy, která tne průmět částice na dvě poloviny. Stanovuje se vyhodnocením snímku z mikroskopu. Musí být zachován směr tečen (tětív) pro všechny proměřované částice. [1]



Obrázek 1 – Feretův a Martinův průměr [1]

### 1.1.2 Ekvivalentní velikost částic

Slouží ke zjednodušení stanovení velikosti částic a lze ji určit jak metodami přímými, tak nepřímými. Mezi nejpodstatnější přímé metody patří měření velikosti částice dle průmětu, povrchu a dle objemu, zatímco mezi metody nepřímé lze zařadit např. měření velikosti dle pádové rychlosti. [1]

- Ekvivalentní velikost částice dle průmětu
  - Skutečná částice je nahrazena kulovou
  - Shodný obsah průmětů částic
  - Využití u mikroskopické analýzy – metoda gratikulárních kruhů
  - Fotometrické přístroje pro měření koncentrace
- Ekvivalentní velikost částice dle povrchu
  - Skutečná částice je nahrazena kulovou o stejném povrchu
  - Využití u měřicích metod založených na adsorpci plynů
- Ekvivalentní velikost částice dle objemu
  - Skutečná částice je nahrazena kulovou
  - Shodný objem částic
  - Využití u plamenné fotometrie
- Ekvivalentní velikost částice dle pádové rychlosti
  - Skutečná částice je nahrazena kulovou
  - Shodná hustota a sedimentační rychlost částic
  - Sedimentační metoda

### 1.1.3 Zrnitost

Tuhé částice mohou být vylučovány jako monodisperzní, tedy vzorek obsahuje jen částice o přibližně stejné velikosti, nebo polydisperzní, kde se nacházejí částice v širokém rozsahu velikostí. Za monodisperzní lze označit např. částice vzniklé kondenzací za určitých podmínek nebo výtrusy rostlin. Jejich výskyt je v oboru odlučování tuhých látek spíše vzácný a je nutno počítat výhradně se souborem polydisperzním, jenž je charakterizován zrnitostí. [1]

## 1.2 Charakteristické vlastnosti

Mezi základní vlastnosti tuhých částic řadíme jejich měrný povrch, který má zásadní vliv na absorpci vlhkosti, plynů a par, a výbušnost prachu. Lze jej vztáhnout buď k jednotce hmotnosti či objemu. Nejsnáze se měrný povrch reálného souboru částic určuje měřením hydraulického odporu vrstvy částic při laminárním průtoku vzduchu. Dále sem patří lepivost, schopnost abraze materiálu, smáčivost, sypané vlastnosti, úhel skluzu a vnitřního tření,

výbušnost prachu a elektrický náboj částic, které mají zásadní vliv na provoz a konstrukci mechanických odlučovačů a o nichž si povíme v následujících podkapitolách.

### 1.2.1 Adheze částic a lepivost

Jeden z důležitých pojmů pro návrh a správnou funkci odlučovače či filtru je lepivost (adheze) prachu, která má zásadní vliv na jeho provoz. Jedná se o souhrn jevů způsobených vlivem vlhkosti nosného plynu, elektrického náboje a adhezních sil, které lze rozdělit dle jejich původu viz níže:

- Síly molekulární (Van der Waalsovy)
  - Uplatňují se při vzájemné interakci částic mezi sebou či se stěnou
  - Vyplývají ze stavby atomů a dosahují velmi malých velikostí
  - Mají elektrostatický charakter
- Síly kapilární
  - Uplatňují se při vzájemné interakci částic mezi sebou či se stěnou
  - Vlivem povrchové vlhkosti se mezi částicemi vytvoří vodní můstek
  - Je dominantní u plynů s relativní vlhkostí vyšší než 65 %
- Síly elektrostatické
  - Uplatňují se při vzájemné interakci nabitých částic a nenabitě stěny

Na lepivost částic může mít vliv i drsnost povrchu, a to jak částic, tak stěn odlučovače, kdy hovoříme o adhezi mechanické.

Přestože mají výše uvedené adhezní síly určitý vliv, v praxi se zjistilo, že na lepivost mají zásadní vliv převážně vlhkost plynu, měrný povrch částic, kdy lepivost prachu značně vzrůstá s rostoucím měrným povrchem částic<sup>1</sup>, a případně elektrický náboj. V případě většiny odlučovačů je lepivost nežádoucím jevem, nicméně existují případy, kdy přispívá k dosažení vysoké odlučivosti. [1]

### 1.2.2 Abraze materiálu

Abraze je veličina vyjadřující míru opotřebení stěn odlučovacích zařízení otěrem tuhých částic. Rozlišujeme dva mechanismy abraze, a to rázový otěr a smykový otěr. Pro rázový otěr je typické, když částice dopadá na stěnu pod velkým úhlem, přičemž v materiálu vyvolá podpovrchový lom. Smykový otěr je charakterizován dopadem částice pod malým úhlem, takže je materiál postupně vymílán.

K abrazi jsou náchylné zejména vírové odlučovače. Úspěšně čelit abrazi lze v zásadě dvěma způsoby, a to buď zesílením stěn v kritických místech nebo využitím speciálních „abrazivzdorných“ materiálů v závislosti na úhlu dopadu.

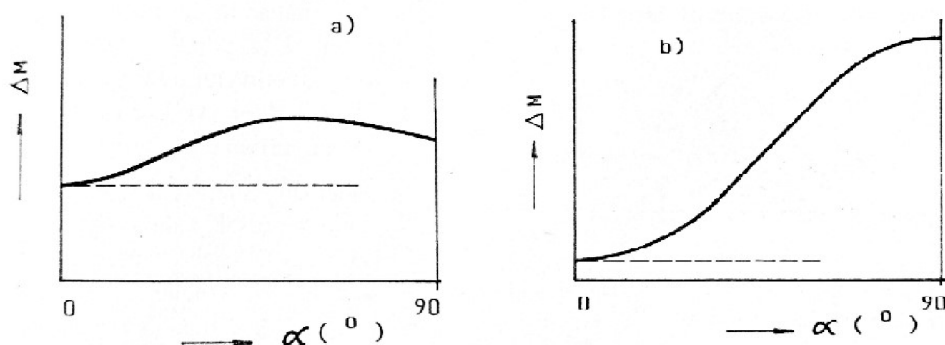
Abraze je závislá na následujících faktorech:

- Doba expozice a koncentrace částic
- Úhel dopadu a rychlost dopadu částic
- Materiálová charakteristika částic a stěny
  - Tvrdost a měrný povrch částic
- Normálová síla při posuvu částice po stěně

---

<sup>1</sup> Částice o charakteristickém rozměru <10 μm jsou vždy značně lepivé

Z grafu na obrázku číslo je patrné, že měkký materiál je náchylnější na smykový otěr, zatímco tvrdý a křehký materiál více trpí rázovým otěrem. U oceli je nejvyšší míra abraze při úhlech dopadu 45-60°, viz obrázek č. 2. [1]



Obrázek 2 – Úbytek materiálu vlivem abraze v závislosti na úhlu dopadu:

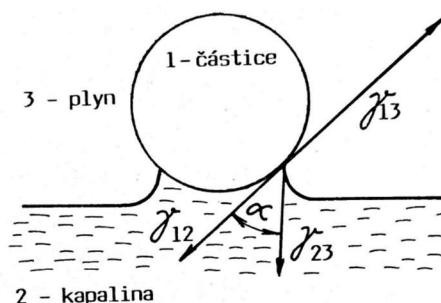
a) měkký materiál b) tvrdý a křehký materiál [1]

### 1.2.3 Smáčivost částic

Je charakteristika, která definuje chování částice při kontaktu s kapalinou, přesněji zda bude částice proudem kapaliny pohlcena či ne. Jedná se tedy o důležitou vlastnost částic pro návrh mokrých odlučovačů. Mezi hůře smáčivé látky patří např. saze nebo textilní vlákna, nicméně ke zvýšení smáčivosti lze přidat aditiva do kapaliny ke snížení povrchového napětí mezi kapalinou a nosným plynem. Smáčivost částic je závislá především na následujících vlastnostech: [1]

- Velikost a měrný povrch částic
- Materiálová charakteristika

Existuje vícero metod stanovení smáčivosti rozličných látek. Lze ji stanovit pomocí tzv. krajního úhlu  $\alpha$ , který je závislý na velikostech adhezních napětí mezi částicí, nosným plynem a kapalinou. S rostoucí velikostí krajního úhlu klesá smáčivost částic, kdy mezní bod mezi dobře a špatně smáčivou částicí představuje hodnota úhlu  $90^\circ$ . Tato přímá metoda stanovení smáčivosti je v praxi jen velmi obtížně měřitelná, tudíž se zpravidla nepoužívá. K měření smáčivosti se používají nepřímé metody, založené na měření rychlosti prosakování kapaliny do vrstvy odlučovaných částic, na měření výšky smáčení částic nasypných v ponořené skleněné trubici nebo na měření záchytu částic, přivedených tryškou, na povrchu kapaliny. [1]



Obrázek 3 – Adhezní napětí na rozhraní fází a krajní úhel  $\alpha$  [1]

#### 1.2.4 Sypný úhel a sypná hmotnost

Jsou podstatné pro konstrukci sběrných prostor odloučeného prachu. Sypný úhel lze charakterizovat jako úhel, který svírá povrchová přímka vzorku volně sypaného prachu do tvaru kužele se základnou. Měření sypného úhlu se provádí laboratorně, kdy je materiál sypaný na kruhovou desku o průměru 50 mm. U naprosté většiny prachů se jeho hodnota pohybuje v rozmezí 40 - 65°, nicméně u jemnějších či lepivých vzorků lze dosáhnout i vyšších hodnot.

Při konstrukci zásobníku separovaného prachu je třeba vycházet z jeho sypné hmotnosti, která se stanovuje experimentálně. Sypná hmotnost je u běžných prachů zpravidla třikrát nižší než hustota daných částic, přičemž závisí především na zrnitosti a jejich tvaru. [1]

#### 1.2.5 Úhel vnitřního tření, úhel skluzu

Úhel vnitřního tření materiálu a úhel skluzu je třeba znát pro optimální návrh stěn zásobníků a výpustních otvorů. Úhel skluzu je dosažen právě tehdy, kdy se prach na nakloněné rovině neudrží v klidu a začne se sesypávat. Lze jej stanovit jednoduchým experimentem, přičemž běžně dosahuje hodnot v rozmezí 40 až 65°, a závisí zejména na následujících parametrech: [1]

- Tření mezi částicemi a stěnou
- Jemnost a lepivost prachu

#### 1.2.6 Přirozený náboj částic.

Tuhé částice při svém vzniku získávají přirozený náboj, který je násobkem náboje elementárního. Tuhé částice mohou být také neúmyslně nabity vlivem proudění kanálem při styku se stěnami, což může vést ke vzniku nánosů a jiskrových výbojů, které mohou způsobit výbuch prachu. Přirozený náboj částic nabývá přibližně o 2 řády nižších hodnot než náboj uměle vytvářený u elektrických odlučovačů. Kromě výše uvedených problémů má přirozený náboj vliv na lepivost částic, nicméně v případě těsného styku částic s obtékanou plochou (např. filtry) je ku prospěchu odlučování. [1]

#### 1.2.7 Výbušnost

Výbušnost lze definovat jako promptní shoření látky při rychlém růstu tlaku. Jedná se o důležitou vlastnost látek z hlediska návrhu a následné bezpečnosti provozu nejen odlučovacích zařízení a skladování či manipulace s palivy nebo odloučenými látkami. Zatímco u plynů a kapalin je tato problematika detailně rozebrána, u prachů je situace odlišná a zpravidla je třeba experimentálně stanovit meze výbušnosti<sup>2</sup> a další výbuchové parametry: [1] [3]

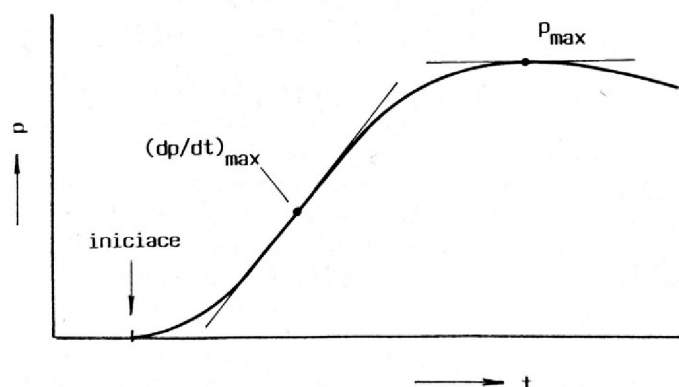
- Spodní mez výbušnosti
  - U prachů se pohybuje kolem 10 g/m<sup>3</sup>
  - Horní mez výbušnosti je řádově vyšší
- Maximální výbuchový tlak –  $p_{MAX}$
- Maximální rychlost nárůstu tlaku po iniciaci –  $(dp/dt)_{MAX}$
- Konstanta výbušnosti KSt
- Minimální iniciační energie

---

<sup>2</sup> U prachů je podstatná pouze spodní mez výbušnosti, značená LEL (z anglického Lower explosion limit)



- Nejmenší možná tepelná energie schopná zapálit „prachovzdušnou“ směs
- Teplota vznícení rozvířeného a usazeného prachu
  - Nejnižší teplota prostředí, při níž dochází k samovolnému vznícení směsi
- Teplota vzplanutí a žhnutí usazeného prachu
- Limitní obsah kyslíku
  - Značí nejvyšší přípustnou koncentraci, kdy je směs ještě neexplozivní



Obrázek 4 – Závislost vzrůstu tlaku v čase při výbuchu [1]

Výbuch může být iniciován např. jiskrou, žhnoucí částičkou, elektrickým výbojem, horkým plynem či sáláním horké stěny, samovznícením, aj. Platí, že na rychlost výbuchu a dosažený tlak má vliv především koncentrace prachových částic a jejich zrnitost, kdy jemnější frakce je výbušnější.

K eliminaci nebezpečí výbuchu prachu či ke zmírnění následků se zavádí rozličná opatření, která lze rozdělit na aktivní a pasivní. [4]

- Aktivní opatření:
  - Přidání inertního aditiva (plyn nebo prach)
  - Sledování koncentrace prachu
  - Absence tepelného iniciačního zdroje
- Pasivní opatření:
  - Konstrukce odolné výbuchovému tlaku a rázu
  - Automatické potlačení výbuchu (samozhašecí zařízení)
  - „Uvolnění výbuchu“ do volného prostoru (ventily, klapky, membrány)
  - Protiprůšleková opatření (ventily, šoupátka, klapky)

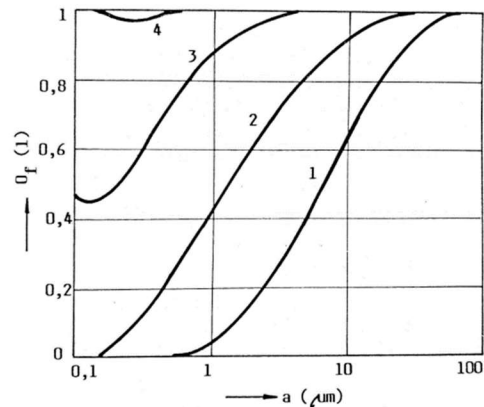
## 2 Obecné vlastnosti odlučovačů

Ačkoliv existuje značné množství odlučovacích zařízení využívajících odlišných principů, existují společné vlastnosti, díky kterým jsme schopni porovnat vícero typů. Mezi základní srovnávací hlediska patří celková a frakční odlučivost zařízení, velikost tlakové ztráty a v neposlední řadě investiční a provozní náklady.

### 2.1 Celková a frakční odlučivost

Základní veličinou charakterizující účinnost zachytu tuhých částic je celková odlučivost. Nelze ji ovšem chápat jako klíčový parametr pro porovnání různých typů odlučovačů, neboť je silně závislá na zrnitosti prachu. Srovnávacím parametrem je až závislost celkové odlučivosti na velikosti částic – křivka frakční odlučivosti, viz obrázek č. 5, kterou lze spočítat z kriteriálních rovnic či stanovit experimentálně. [1] [5]

- č. 1 – suché mechanické odlučovače
- č. 2 – mokré mechanické odlučovače
- č. 3 – elektrostatické odlučovače
- č. 4 – filtry



Obrázek 5 – Závislost frakční odlučivosti odlučovačů na velikosti částic [1]

Celkovou odlučivost lze bilancovat následovně:

$$O_c = \frac{\dot{M}_P - \dot{M}_v}{\dot{M}_P} = \frac{V_{P,N} \cdot C_{P,N} - V_{v,N} \cdot C_{v,N}}{V_{P,N} \cdot C_{P,N}} \quad (2.1)$$

V případě, že nedochází při průtoku plynu ke změně jeho teploty, lze vyjádřit celkovou odlučivost zjednodušeně jako poměr změřených koncentrací:

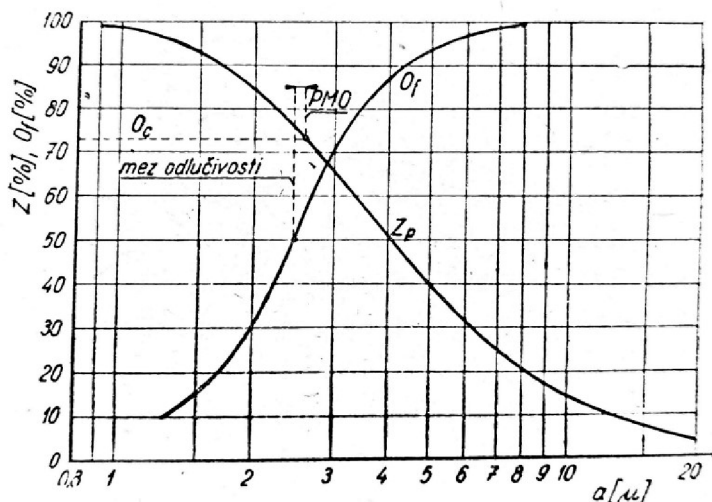
$$O_c = \frac{C_p - C_v}{C_p} \quad (2.2)$$

Kde:

- $O_c$  - Celková odlučivost [-]
- $\dot{M}_P$  - přiváděný hmotnostní tok prachu do odlučovače [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
- $\dot{M}_v$  - vypouštěný hmotnostní tok prachu do ovzduší [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
- $C_p, C_v$  - hmotnostní koncentrace částic [ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $C_{P,N}, C_{v,N}$  - hmotnostní koncentrace částic za normálních podmínek [ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $V_{P,N}, V_{v,N}$  - objemové průtoky za normálních podmínek [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}$ ]

### 2.1.1 Přibližná mez odlučivosti

Jak již bylo řečeno výše, základním srovnávacím parametrem odlučovačů není celková odlučivost ale křivka frakční odlučivosti, která je charakteristickou veličinou každého odlučovače. Stanovení této křivky je ale značně náročné, a proto byl zaveden pojem přibližná mez odlučivosti – PMO (nazývá se též kritická velikost částic), který slouží jako srovnávací kritérium různých typů odlučovačů. Princip spočívá ve stanovení velikosti částice, pro kterou je odlučivost rovna 50 %. PMO lze zjednodušeně stanovit z celkové odlučivosti, viz obrázek č. 6, známe-li křivku zbytků<sup>3</sup>. [1] [5]



Obrázek 6 – Přibližná mez odlučivosti PMO [5]

### 2.2 Tlaková ztráta

Jedná se v zásadě o druhou nejsledovanější vlastnost odlučovače, neboť má zásadní podíl na celkové spotřebě energie, a tedy provozních nákladech zařízení. Velikost tlakové ztráty je dána rozdílem celkových tlaků na vstupu a výstupu. Na základě Bernoulliho rovnice lze tedy psát následující:

$$\Delta p_z = (v_{in}^2 - v_{out}^2) \cdot \frac{\rho}{2} + (p_{IN} - p_{OUT}) \quad (2.3)$$

Kde:

- $\Delta p_z$  - tlaková ztráta [Pa]
- $v_{in}$  - střední rychlost ve vstupním průřezu [ $m \cdot s^{-1}$ ]
- $v_{out}$  - střední rychlost ve výstupním průřezu [ $m \cdot s^{-1}$ ]
- $\rho$  - hustota plynu [ $kg \cdot m^{-3}$ ]
- $p_{in}$  - Tlak na vstupu [Pa]
- $p_{out}$  - Tlak na výstupu [Pa]

<sup>3</sup> Předpokládejme prach různých velikostí zrn. Zbytkem tedy rozumíme to, co po prosetí sítím s danou šířkou ok (a), zůstane ležet na síti. Tento váhový zbytek v poměru k celkové hmotnosti proséváního prachu značíme Z. To, co propadne, nazýváme propadem (P). Křivku zbytků pak dostaneme proséváním téhož prachu síty o různých velikostech ok.

Tlakovou ztrátu lze vyjádřit také za pomoci ztrátového součinitele, který je funkcí Reynoldsova kritéria, viz následující rovnice:

$$\Delta p_z = \xi \cdot \frac{v_{char}^2}{2} \cdot \rho \quad (2.4)$$

$$Re = \frac{v_{char} \cdot l \cdot \rho}{\mu} \quad (2.5)$$

Kde:

- $v_{char}$  - střední rychlost v charakter. průřezu (závisí na typu odlučovače) [ $m \cdot s^{-1}$ ]
- $\xi$  - ztrátový součinitel odlučovače [-]
- $l$  - charakteristický rozměr určující charakteristický průřez [m]
- $\mu$  - dynamická viskozita [ $Pa \cdot s$ ]

Výše uvedené neplatí u proudových odlučovačů, kde je způsobena dodatečná tlaková ztráta plynu vlivem vstříkované vody. Ztrátový součinitel závisí tedy nejen na Re ale i na její měrné spotřebě.

Naprosto odlišně je třeba pohlížet na profil tlakové ztráty u odlučování pomocí filtrů. Tlaková ztráta u filtrační vláknité vrstvy vychází z aerodynamického odporu při obtékání vláknů a proudění je při nižších filtračních rychlostech laminární. Velikost tlakové ztráty je proměnná v závislosti na úrovni zanesení filtrační vrstvy a její následné regeneraci. V případě zanedbání změny tlakové ztráty vlivem zanášení je tlaková ztráta závislá na charakteristické rychlosti plynu ve filtrační vrstvě a lze ji tedy vyjádřit následovně: [1] [5]

$$\Delta p_z \sim v^n \quad (2.6)$$

Kde exponent  $n$  je blízký 1,  $n > 1$ .

### 2.3 Ukazatel jakosti

Při volbě vhodných typů je kladen zásadní důraz na splnění emisních limitů. Nežádá se stává, že je splňuje vícero zařízení a je nutné zvolit to nejlepší technické řešení, k čemuž slouží primárně ukazatel jakosti, viz rovnice:

$$K = \frac{-\ln(1 - O_c) \cdot \dot{V}}{P} \quad (2.7)$$

Lze si povšimnout, že čím vyšší hodnoty ukazatel nabývá, tím hospodárnější je provoz odlučovače. U některých typů odlučovačů lze prohlásit, že příkon zařízení v podstatě jen kompenzuje tlakovou ztrátu zařízení, což je patrné např. u filtrů, tedy platí  $P \sim \dot{V} \cdot \Delta p_z$ . Pro takové případy lze ukazatel jakosti zjednodušit následovně:

$$K = \frac{-\ln(1 - O_c)}{\Delta p_z} \quad (2.8)$$

Kde:

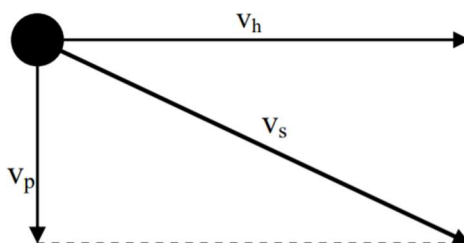
- $K$  - Ukazatel jakosti [ $m^3 \cdot kJ^{-1}; 1 \cdot Pa^{-1}$ ]
- $O_c$  - Celková odlučivost [-]
- $\dot{V}$  - Objemový průtok [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]
- $P$  - Příkon [kW]
- $\Delta p_z$  - Tlaková ztráta [Pa]

### 3 Suché mechanické odlučovače

#### 3.1 Gravitační – usazovací komory a prašníky

Jedná se o nejstarší odlučovací princip, který je spolehlivý a technicky nenáročný, nicméně vhodný pouze pro čištění hrubé frakce. Odlučování je docíleno sedimentací prachových částic vlivem působení tíhové síly. Znečištěný plyn je přiveden do usazovací komory (prašníku), kde je v přechodovém potrubí zpomalen na požadovanou rychlost pro optimální odloučení tuhých částic, které při průchodu klesají na usazovací plochy. Jak si lze všimnout na obrázku níže, výsledná sedimentační rychlost ( $V_s$ ) vzniká vektorovým součtem rychlosti proudění plynu ( $V_h$ ) a pádové rychlosti ( $V_p$ ).

Přestože lze gravitační odlučovače použít k čištění plynů o vysokých teplotách a abrazivních prachů, přičemž mají nízkou tlakovou ztrátu, všeobecně dosahují maximální meze odlučivosti nanejvýš 30  $\mu\text{m}$ . Jejich užití je nevhodné u vláknitých a lepivých prachů. Zpravidla se užívají k předčištění plynu od hrubé frakce jako „předodlučovače“. [1] [5]



Obrázek 7 – Výsledná sedimentační rychlost částice  $V_s$  [6]

##### 3.1.1 Základní provedení usazovací komory

Technologicky nejjednodušší gravitační odlučovač si lze představit jako tunel kvádrotvaru bez vnitřních vestaveb s rozšiřujícím se vstupním a výstupním otvorem, kde jsou umístěny půlkulovité nebo kuželovité plochy pro docílení rovnoměrného proudění nosného plynu. Pro rychlejší sedimentaci částic se dovnitř umísťují horizontální desky, které slouží k rozdělení plynu do menších proudů a zkracují sedimentační vzdálenost, a jsou od sebe vzdáleny v rozmezí od 40 do 100 mm. Kvůli nutnosti pravidelného mechanického čištění zanešených desek škrabáky je nutné prašník odstavit, a z toho důvodu se využívá dvou samostatných jednotek, kdy je vždy jedna v provozu a druhá čištěna.

Do usazovacích komor lze umístit svislé tenké kruhové tyče o průměrech 5-8 mm, které jsou od sebe vzdáleny 20-25 mm. Jejich přínos spočívá v tvorbě vírů, díky kterým prach sedimentuje rychleji nebo je zachycen na tyči. Dále se zde mohou instalovat vertikální přepážky, do kterých částice naráží a jenž mají za cíl jejich zdržení v odlučovacím prostoru. Tohle řešení se ale takřka nevyskytuje, neboť přepážky způsobují urychlení plynu a víření usazeného prachu. Výsypky na dně usazovacích komor bývají zpravidla osazeny mříží, která zabraňuje zpětnému unášení prachu.

Mezi jeho výhody patří jednoduchá konstrukce, poměrně slušná odlučivost a i přes nutnost dvou paralelních jednotek kompaktnost ve srovnání s jinými typy prašníků. [1]

##### 3.1.2 Wiestova usazovací komora

Jedná se o vylepšenou verzi předchozího typu usazovací komory. Oproti základnímu provedení jsou zde umístěny z obou stran komory šikmé desky, mezi nimiž jsou úzké štěrbiny, po kterých sklouzává usazený prach do středové části, kde padá na dno komory, které je také

zkosené. Aby nedocházelo ke strhávání volně padajícího prachu proudem plynu, jsou ve středovém prostoru umístěny příčné sloupky. Hlavní výhodou Wiestova typu je kontinuální provoz prašníku bez nutnosti čištění styčných ploch. [5]

### 3.1.3 Prašník

Prašník si lze představit jako válcovou nádobu s kuželovitým dnem, na které se nachází nátrubek pro odvod prachu. Existuje mnoho různých provedení, která se liší především umístěním vstupu a výstupu plynu. Obecně je lze rozdělit na:

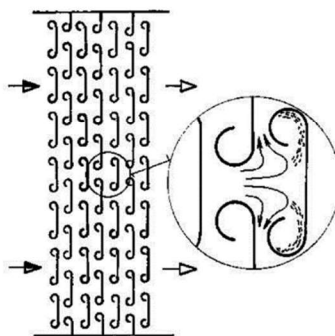
- Prašníky s radiálním vstupem
  - Nižší tlaková ztráta
- Prašníky s tečným vstupem a osovým výstupem
  - Vyšší celková odlučivost díky usměrňovacímu kuželu ve spodní části

## 3.2 Setrvačné

Setrvačné odlučovače lze rozdělit do dvou základních kategorií. Jejich princip spočívá v průtoku znečištěného plynu skrz vhodně profilované překážky, kde jsou buď přímo odlučovány prachové částice – lamelové, případně je zde rozdělen plyn do dvou proudů, a to vyčištěného a znečištěného – žaluziové. Setrvačné odlučovače jsou v zásadě založeny na stejném odlučovacím principu jako odstředivé, nicméně u obou typů je podstatný rozdíl. Zatímco u odstředivých jsou částice odlučovány po celé trajektorii proudu plynu, který odpovídá úhlu obratu běžně přes  $360^\circ$ , u setrvačných zařízení proud plynu nedosáhne vyšších úhlů obratu než  $150^\circ$ . [1] [5]

### 3.2.1 Lamelové

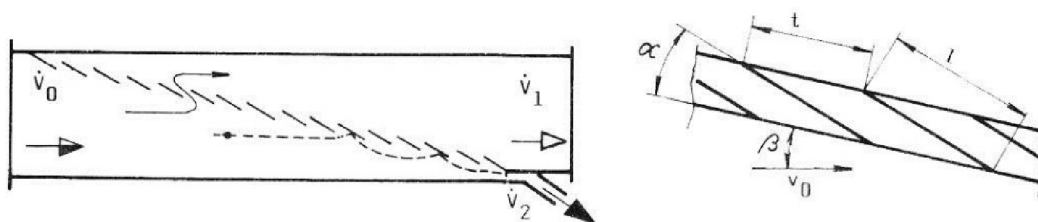
Nosný plyn proudí skrz vhodně profilované lamely, kde jsou prachové částice zpomaleny a sedimentují do výsypky. Přestože lze lamelové odlučovače použít i pro suché mechanické čištění, daleko častěji se využívají u mokrého odlučování. Na obrázcích níže je znázorněn princip lamelového odlučovače. [1]



Obrázek 8 – Schéma lamelového odlučovače [1]

### 3.2.2 Žaluziové

Princip je znázorněn na obrázku č. 9. Žaluziové odlučovače mají za cíl rozdělit nosný plyn na vyčištěnou a znečištěnou část, kde znečištěná složka zaujímá cca 5-10 % z celkového množství plynu před odlučovačem. Znečištěný plyn je následně odlučován v sekundárním odlučovači jiného typu, primárně se využívá cyklon.



Obrázek 9 – Schéma žaluziového odlučovače s rovinnou mříží [1]

Odlučivost žaluziových odlučovačů je závislá na fyzikálních vlastnostech proudění a na konstrukčních faktorech. Vyšší odlučivosti je dosaženo s rostoucími pádovými rychlostmi částic, vyšší rychlostí částic před mříží a při vyšší koncentraci částic v nosném plynu. Neméně důležitým faktorem je dále poloměr křivosti a tvar proudnic při průchodu plynu mříží, na což má vliv právě konstrukční provedení mříže. Poloměr křivosti závisí na kolmé vzdálenosti mezi lopatkami mříže<sup>4</sup>, jejíž velikost se u velkých žaluziových odlučovačů pohybuje kolem 50 mm. Experimentálně bylo dokázáno, že nejlepší odlučivosti se dosahuje při velikosti úhlu  $\beta = 30^\circ$  pro široký rozsah rychlostí proudění plynu.

Odvod znečištěného plynu do sekundárního odlučovače může být samovolný nebo jej lze odsávat, nicméně bylo dokázáno, že s rostoucí rychlostí odvodu znečištěného plynu výrazně stoupá odlučivost zařízení. Optimální poměr rychlostí odsávaného plynu a přiváděného se pohybuje v rozmezí 1-1,25 (odlučivost dosahuje až 80 %). Při hodnotách  $<1$  odlučivost prudce klesá.

Ač se to může zdát zvláštní, velikost výstupního průřezu znečištěného plynu z žaluziového do sekundárního odlučovače nemá zásadní vliv na odlučivost zařízení. Jeho velikost může dosahovat až 5 % z celkové plochy průřezu odlučovače při zachování celkové odlučivosti, což je pozitivní z hlediska hospodárnosti a velikosti zařízení. Kromě klasického žaluziového odlučovače s rovinnou mříží případně speciální verze VTI, kde jsou lopatky ve tvaru klínu, se ještě využívají odlučovače ve tvaru komolého kužele, kde jsou lopatky nahrazeny kuželovitými prstenci různých průměrů, či mnohostranného jehlancového tvaru. Jednotlivé typy kuželových odlučovačů se vzájemně liší především překryvem prstenců a šířkou štěrbin mezi nimi.

Žaluziové odlučovače se hodí zejména k separaci hrubšího prachu, a tedy je lze výhodně užít jako předodlučovače. Mezi hlavní výhody patří kompaktnost, nízké tlakové ztráty, spolehlivost provozu, snadné čištění a opravy, neboť jsou dobře přístupné, a lze jimi čistit i horké plyny při teplotách přes  $400^\circ\text{C}$ . Vzhledem k nutnosti zachování konstantní velikosti štěrbin mezi lopatkami (disky) nejsou tyto odlučovače vhodné pro čištění vlhkého a vláknitého prachu, kde hrozí jejich zúžení až ucpaní. [1] [6]

### 3.3 Odstředivé – vírové odlučovače (cyklóny)

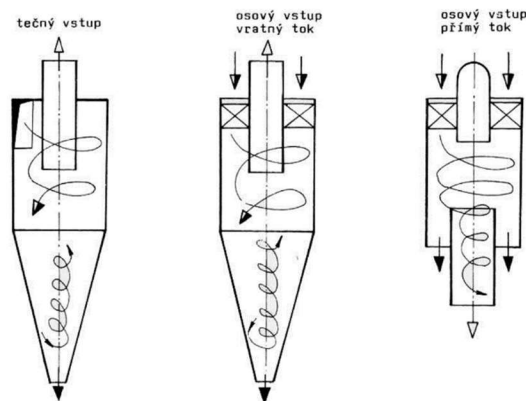
Patří mezi jedny z nejrozšířenějších odlučovacích zařízení vůbec. Základní princip spočívá ve využití odstředivé síly, která vzniká vlivem spirální trajektorie proudění nosného plynu cyklónem. Na prachové částice působí radiální zrychlení, díky čemuž mají mimo obvodové i radiální složku rychlosti, jejíž směr je kolmý k odlučovacími plochám a jejíž vlivem

<sup>4</sup> Na obrázku výše se jedná o vzdálenost  $t$ . S rostoucími počtem lopatek ve mříží se poloměr křivosti zmenšuje, což má vliv na vyšší odlučivost prachu, nicméně na druhou stranu dochází k nárůstu tlakové ztráty zařízení.

postupně ztrácí svou hybnost. Proud plynu se následně otočí o 180° (ne při přímém toku, viz obrázek níže) a vystupuje středem cyklónu k výstupní troubě.

Vírové odlučovače lze dle směru proudění rozdělit na následující základní typy: [1]

- S tečným vstupem
- S osovým vstupem a vratným tokem
- S osovým vstupem a přímým tokem

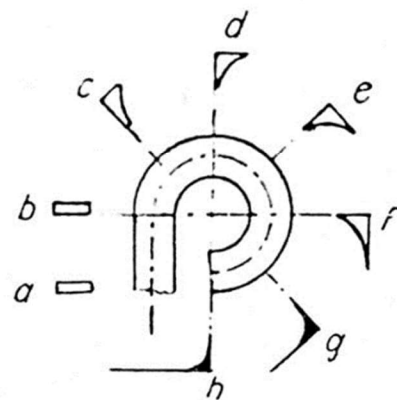


Obrázek 10 – Základní provedení vírových odlučovačů dle trajektorie proudění [1]

Při návrhu vírového odlučovače je třeba brát v úvahu vliv turbulencí. Na obrázku níže si lze všimnout průběh koncentrace prachu při kruhovém proudění plynu. Uvažujme rovnoměrnou koncentraci prachu na vstupu do potrubí (bod a), načež dochází k nárůstu koncentrace prachu u vnější stěny nádoby. Vlivem turbulencí nikdy nelze docílit, při jakkoliv dlouhém kruhovém proudění, nulové koncentrace prachu na vnitřní straně potrubí, neboť po určité době dochází k ustálení koncentrace v průřezu (bod h) a poté na ni již další pohyb plynu nemá žádný vliv. Na délku trajektorie, po které nastane zmíněný rovnovážný stav koncentrace prachu, má vliv následující: [5]

- Velikost a hmotnost částic
- Rychlost plynu a jeho vazkost
- Střední poloměr křivosti

Dalším nepříznivým jevem je tzv. sekundární proudění, kvůli němuž jsou částice prachu hned po vstupu do cyklónu zaneseny do jeho horní části, kde tvoří silnou kroužící vrstvu, což má za následek výrazné opotřebení materiálu. Prachový prstenec zde bobtná až je strhnutý hlavní proudem do kuželové části cyklónu a následně do výsypky. Část prachu prstence je však unesena vyčištěným plynem. Řešení spočívá ve vhodné konstrukci, respektive umístění, vstupního otvoru, tedy co nejbližší víku odlučovače, a v hlubším zapaštění výstupní trouby. Z výše popsaného jevu tedy vyplývá, že vrchní část cyklónu je původcem přechodného neuspořádaného proudění, tedy je pro odlučování nevhodná. Nastalý jev lze také zmírnit např. užitím tzv. šroubovitého víka, vložky šroubovitého



Obrázek 11 – Vliv turbulencí na koncentraci prachu v plynu [5]

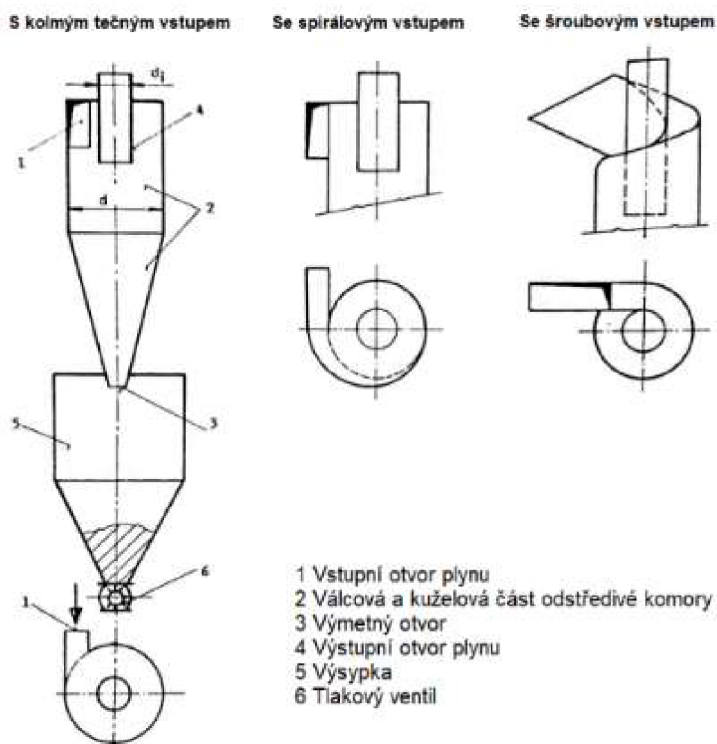


tvaru, lopatkami či výmetnými otvory. Vlivem sekundárního proudění dochází k dalšímu nepříznivému jevu, a to k tvorbě proudu plynu nepodobnému vzduchové smršti. Nepříznivé je proto, že unáší prachové částice z kuželové části směrem do výstupní trouby. Tento jev lze zmírnit buď prodloužením kuželové části nebo naopak její úplnou absencí. [5]

Cyklóny jsou charakteristické jednoduchou konstrukcí, malou spotřebou materiálu a jednoduchostí na údržbu a obsluhu. Lze je použít při vysokých teplotách plynu i koncentracích částic. Mezi nevýhody se řadí nižší odlučivost jemné frakce, náchylnost na abrazi a zalepování a především vyšší tlaková ztráta. Zpravidla se dnes již nepoužívají jako samostatné odlučovače, neboť zkrátka nejsou schopné splnit požadované emisní limity, nicméně je velmi výhodné je užít jako součást odlučovacích systémů, kde působí jako první stupeň pro vyčištění hrubé frakce. Mez odlučivosti se pohybuje, v závislosti na podmínkách, v širokém rozmezí 2-40  $\mu\text{m}/\text{m}^3$ . Při čištění hrubé frakce lze cyklóny provozovat jednotlivě, v jiných případech se provozují ve skupinách, případně v oddílech bateriových odlučovačů. Cyklóny lze řadit do série či paralelně. Sériové zapojení vede ke zvýšení odlučivosti, nicméně za cenu značného zvýšení tlakové ztráty zařízení. Paralelní uspořádání je výhodné vzhledem k rozdělení proudu znečištěného plynu, díky čemuž jej lze čistit v cyklónech menších rozměrů, které mají vyšší odlučivost. [1] [5]

Pro usnadnění návrhu základních rozměrů cyklónu se běžně užívají tzv. simplex, kterých je celá řada. Jedná se o ideální poměry jednotlivých rozměrů cyklónu pro maximální odlučivost vůči známé veličině – zpravidla se jedná o průměr nebo průtok. V následujících podkapitolách budou probrány jednotlivá provedení cyklonových odlučovačů. Z hlediska uzpůsobení vstupní části lze cyklóny rozdělit: [1]

- S kolmým tečným vstupem
- Se spirálovým a polospirálovým vstupem
- Se šroubovým vstupem



Obrázek 12 – Stavba cyklónů s tečným, spirálovým a šroubovým vstupem [1]

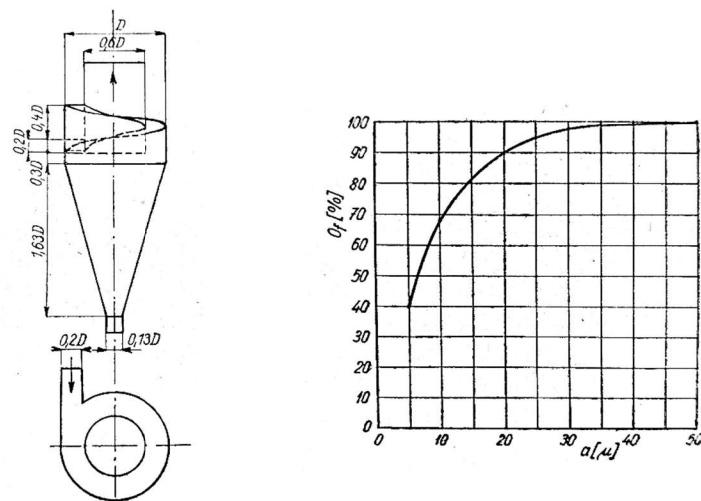
### 3.3.1 Cyklón s kolmým tečným vstupem

Konstrukčně nejjednodušším a typem je cyklón s kolmým tečným vstupem. Jedná se o nejběžněji používané provedení vstupní části. Plyn vstupuje do cyklónu tečným nátrubkem obdélníkového či kruhového průřezu. Cyklón je osazen vodorovným víkem, jehož výhodou jsou nízké pořizovací náklady, nicméně není natolik účinný z hlediska potlačení vlivu sekundárního proudění a tvorby prachového prstence v horní části odlučovače jako cyklón se šroubovým či spirálovým víkem. [1]

### 3.3.2 Cyklón se šroubovým vstupem

Oproti klasickému cyklónu s tečným vstupem je zde místo hladkého víka umístěno víko šroubovitě, jehož tvar usměřuje proudění nosného plynu a má příznivý vliv na potlačení vzniku prachového prstence. Díky tomu nedochází k nárazovému přesycení cyklónu prachem (k němuž dochází při odtržení prachové vrstvy pod víkem a nasátí jeho části do výstupní trouby, viz vliv sekundárního proudění), tedy nedochází ke zhoršení jeho odlučivosti.

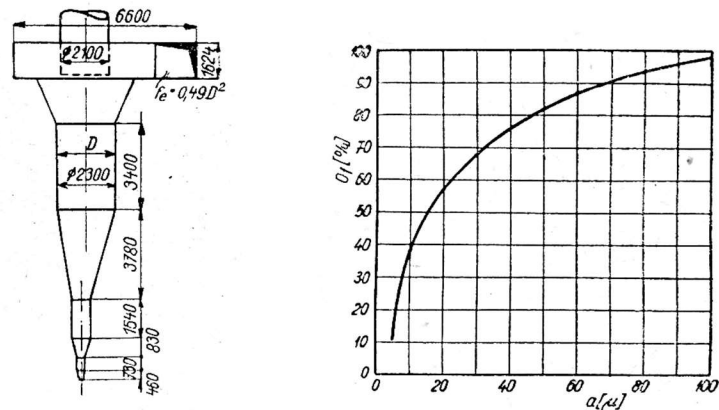
Při testování cyklónu se spirálovým, o němž si povíme dále, a šroubovým víkem bylo zjištěno, že lepší odlučivosti dosahuje druhý jmenovaný s hodnotou 87 % při PMO 12  $\mu\text{m}$ , a to při takřka dvojnásobném průměru cyklónu a průtoku plynu. Cyklón se spirálovým víkem o menším průměru dosáhl odlučivosti 46 % při PMO 15,5  $\mu\text{m}$ . Nevýhodou obou typů odlučovačů je jejich brzké opotřebení vlivem abraze, případně nutnost vyztužení válcové a kuželové části pancéřováním tlustým alespoň 6-8 mm pro zvýšení životnosti. [5]



Obrázek 13 – Cyklón se šroubovým víkem a jeho frakční odlučivost  
při průměru 3700 mm [5]

### 3.3.3 Davidsonův cyklón

Zatímco u cyklónu s tečným i šroubovým vstupem je znečištěný plyn do odstředivé komory vháněn tečným nátrubkem, Davidsonův cyklón je konstrukčně odlišný. Vstupní i výstupní kanál cyklónu je spirálového tvaru a vstupní část je s válcovou částí cyklónu spojena komolým kuželem. [5]

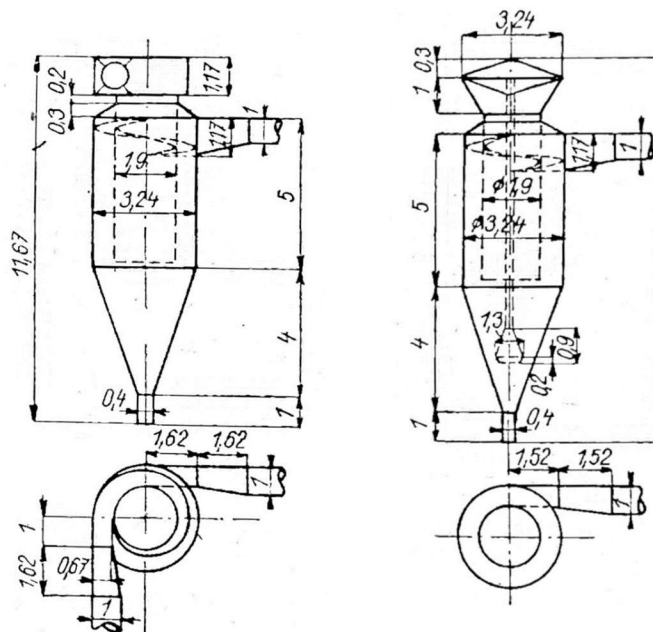


Obrázek 14 – Davidsonův cyklón D-9a o průměru 2300 mm a jeho frakční odlučivost [5]

### 3.3.4 Cyklóny LIOT

Cyklóny LIOT jsou charakteristické prodlouženou válcovou částí odstředivé komory, do níž hluboko zasahuje výstupní trouba, která je ukončena buď spirálovým nástavcem (typ B) nebo difusorem (typ H). Plyn je přiváděn tečným nátrubkem a dále usměrňován šroubovitou vložkou, což značně potlačuje tvorbu prachového prstence pod víkem odstředivé komory. V kuželové části typu H je umístěn usměrňovací kužel, který usměrňuje vyčištěný plyn do výstupní trouby a zabraňuje zpětnému strhávání odloučeného prachu na stěnách kuželové části odstředivé komory. V případě změny polohy kužele ve vertikální ose je možné korigovat tlak ve výsypce, což je vhodné u hůře těsnících zařízení.

Při testování cyklónů LIOT bylo zjištěno, že v jejich střední části je velikost střední obvodové rychlosti plynu až 1,7x menší než ve vstupním průřezu, a tedy i velikost odstředivé síly je násobně menší. Dále bylo dokázáno, že odlučivost zařízení úměrně stoupá s klesajícím vrcholovým úhlem kužele (tedy s prodlužováním kuželové části). [5]



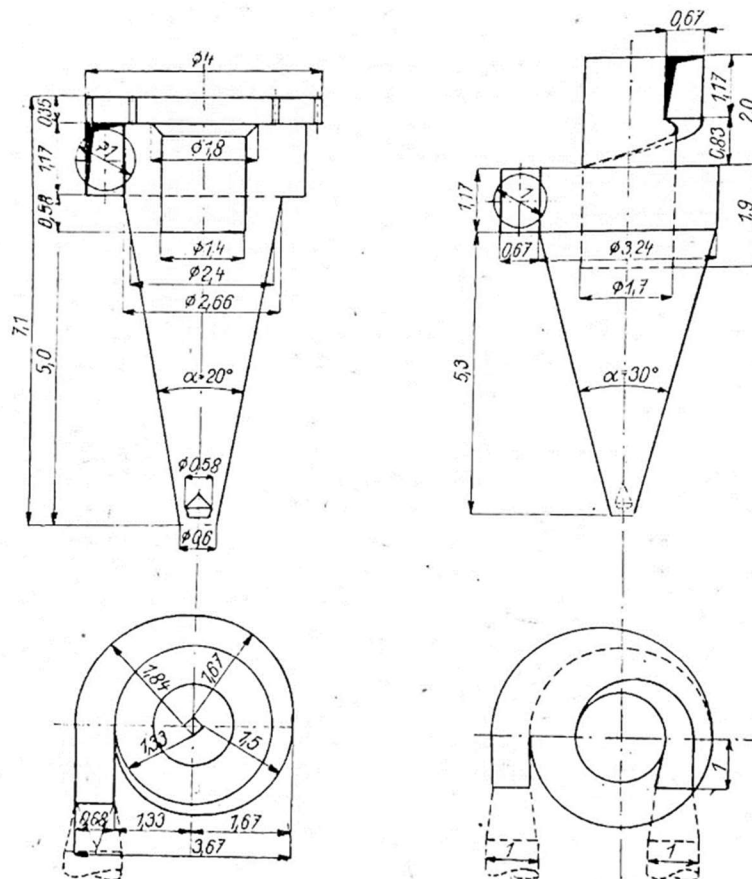
Obrázek 15 – Suché mechanické cyklóny LIOT: vlevo typ B, vpravo typ H [5]

### 3.3.5 Batakoviův cyklón

Jedná se o speciální typ cyklónu, který měl být náhradou za cyklóny LIOT typu B a H. Konstrukčně se od výše jmenovaných liší absencí válcové části odstředivé komory a čištění plynu tedy probíhá pouze v kuželové části s malým vrcholovým úhlem. Ve spodní části cyklónu je umístěn usměřovací kužel, stejně jako u cyklónů LIOT.

Po zhodnocení původního návrhu Butakovova cyklónu bylo provedeno několik konstrukčních změn. Při pohledu na schémata obou zařízení si lze všimnout, že byla zvětšena velikost vrcholového úhlu odstředivé komory z  $20^\circ$  na  $30^\circ$ , díky čemuž bylo možno zvětšit průřez výstupní trouby, což vede ke snížení tlakové ztráty. Spirála na vstupu byla nahrazena čtvrtkruhem.

Ve srovnání s cyklónem LIOT typu H dosahuje novější verze Batakova cyklónu vyšší odlučivosti a především je konstrukčně jednodušší a levnější, neboť je na jeho výrobu potřeba pouze cca 40 % materiálu. Cyklóny byly testovány při totožném průtoku, vstupní rychlosti a čištěn byl tentýž prach. [5]



Obrázek 16 – Butakovoviův cyklón: vlevo původní návrh, vpravo upravená verze [5]

### 3.3.6 Hartmannův cyklón

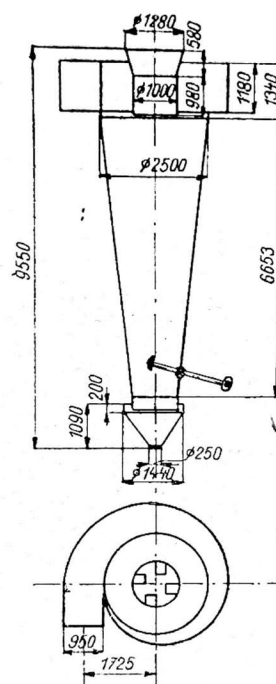
Konstrukčně se Hartmannův cyklón nápadně podobá cyklónu Batakovovu. Znečištěný plyn je přiváděn spirálním vstupem do odstředivé komory, která se skládá taktéž pouze z kuželové části. Kužel má menší vrcholový úhel a je delší. Oproti Batakovu cyklónu je výstupní trouba zapuštěna do kuželové části jen nepatrně, zasahuje do ní pouze několik centimetrů pod úroveň spirálního vstupu. Konec výstupní trouby je tvaru difuzoru, což má příznivý vliv na velikost tlakové ztráty zařízení. Největší rozdíl pak spočívá v absenci usměrňovacího kužele a v řešení odvodu separovaného prachu. Odstředivá komora je zakončena dnem se čtyřmi totožnými otvory, což má za cíl zabránit strhávání již odloučeného prachu. Při testování na čištění spalin z práškového kotle byla naměřena celková odlučivost 55 % a přibližná mez odlučivosti 13  $\mu\text{m}$ . [5]

### 3.3.7 Van Tongerenův odlučovač

Van Tongerenův odlučovač byl zkonstruován ve třech základních provedeních, a to:

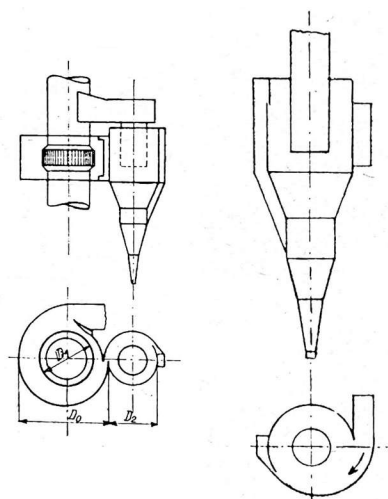
- Van Tongerenův dvojitý odlučovač
- Van Tongerenův cyklón s prachovou kapsou
- Van Tongerenův cyklón se šroubovým žlábkem

Dvojitý odlučovač je zvláštní typ, který se skládá ze dvou cyklónů. Znečištěný plyn vstupuje nejprve spirálním vstupem do většího z nich, který je osazen lopatkovou mříží, kde je prach separován vlivem odstředivé síly na stěnách cyklónu. Oproti předešlým konstrukcím nekončí ve výsypce, nýbrž je odváděn štěrbinou<sup>5</sup> spolu s minoritním podílem plynu (přibližně 20 %) do sekundárního cyklónu, kde je následně odloučen. Vyčištěný plyn poté vstupuje bočním otvorem do výstupní trouby, kterou odchází ze sekundárního odlučovače. Otvor výstupní trouby je vhodné navrhovat tak, aby jeho výška byla výrazně menší, než je samotná výška odstředivé komory, a to proto, aby prach, unášený složkami sekundárního proudění, narazil na vnější stěny komína a namísto výstupu s čistým plynem mohl být odstředivou silou naveden na vnější stěnu odlučovače. Pro, pokud možno co nejefektivnější, vyčištění plynu jsou ve



Obrázek 17 –

Hartmannův cyklón [5]



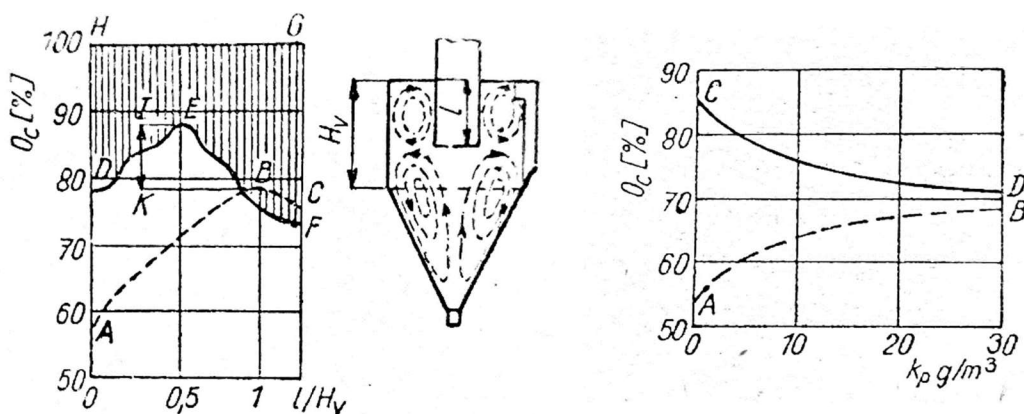
Obrázek 18 – Van Tongerenovy odlučovače:

vlevo dvojitý odlučovač,  
vpravo cyklón s prachovou kapsou [5]

<sup>5</sup> Pro efektivnější shlukování prachu v „rozích“ odstředivé komory je v těchto místech štěrbinu širší (tvar písmene U),

výstupním otvoru umístěny lopatky, směřující proti směru pohybu čistěného plynu, jejichž cílem je zamezit vstupu prachových částic, které se od nich odráží. Lopatky jsou pevné nebo otočné, což je výhodné zejména u zdrojů s proměnlivým zatížením, kdy je lze natáčet v závislosti na aktuálním průtoku plynu. Měřeními byla zjištěna odlučivost zařízení 80-90 % při PMO 25-30  $\mu\text{m}$ . Mezi hlavní výhody patří neměnná odlučivost i při značně proměnném zatížení, možnost čištění velkých průtoků plynu při nízké tlakové ztrátě a celková kompaktnost.

Dalším typem je cyklón s prachovou kapsou, jehož odstředivá komora je složena ze dvou válcových a dvou kuželových částí. Oproti všem již zmíněným cyklónům je sekundární proudění, a jeho vlivem vznikající prachový prstenec pod víkem, příznivým jevem, který vede ke zlepšení celkové odlučivosti zařízení. Znečištěný plyn je tečně přiváděn nátrubkem nikoliv těsně pod víko ale v optimální vzdálenosti od něj, aby zde byl dostatek prostoru pro tvorbu prachového prstence, který se ovšem nikdy nevytvoří, neboť je v horní části odstředivé komory úzká štěrbina, kterou je vznikající prstenec kontinuálně strháván do prachové kapsy umístěné mimo odstředivou komoru. Prach je kapsou unášen do spodní části odstředivé komory, kde ústí do válcové části cyklónu. Pro co nejvyšší odlučivost je třeba umístit spodní hranu výstupní trouby na pomezí obou částí dvojitého víru. Bylo experimentálně dokázáno, že tato rovina leží přibližně pod středem válcové části odstředivé komory. [5]



Obrázek 19 – Vliv délky zapuštění výstupní trouby a závislost celkové odlučivosti cyklónu na koncentraci prachu v plynu u cyklónu s prachovou kapsou a bez ní [5]

Na obrázku 19 vlevo si lze všimnout dvou křivek označenými písmeny ABC (cyklón bez prachové kapsy) a DEF (cyklón s prachovou kapsou), které představují závislost odlučivosti na hloubce zapuštění výstupní trouby. Při vhodném zapuštění výstupní trouby (poměr  $l/H_v$ ) lze u obvyklých cyklónů dosáhnout užitím prachové kapsy lepší odlučivosti až o několik %, viz body I-K. Na tentýž obrázku vpravo je vyobrazen graf závislosti odlučivosti na koncentraci prachu v plynu, kde křivka AB znázorňuje obvyčejný cyklón bez prachové kapsy a křivka CD tentýž cyklón s využitím prachové kapsy.

Vývojově posledním typem odlučovačů Van Tongeren je cyklón se šroubovitým žlábkem<sup>6</sup>, který je umístěn ve válcové části odstředivé komory. Jeho úkolem je kontinuální odvod tvořícího se prachového prstence pod víkem (jako účel prachové kapsy u předchozího typu) a usměrnění prachu, který dosáhne stěny odstředivé komory již ve válcové části.

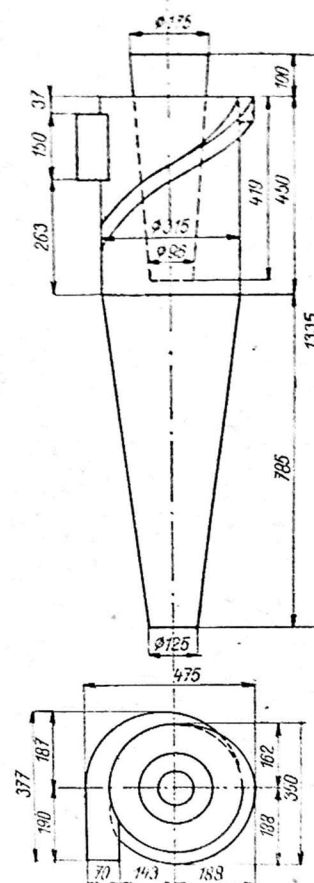
<sup>6</sup> Žlábek končí přibližně ve stejné rovině, v níž je umístěn otvor výstupní trouby.

Vzhledem k minimalizaci výrobních nákladů je vstupní kanál půlkruhového tvaru, nikoliv spirálového. Výstupní trouba se rozšiřuje na způsob difuzoru, a to za účelem zmenšení tlakové ztráty zařízení. Odlučivost posledního typu Van Tongerenova cyklónu je ze všech typů nejvyšší, ovšem pouze při nižších koncentracích prachu v plynu, neboť by došlo k přesycení žlábků a prach by byl strháván do výstupní trouby. [5]

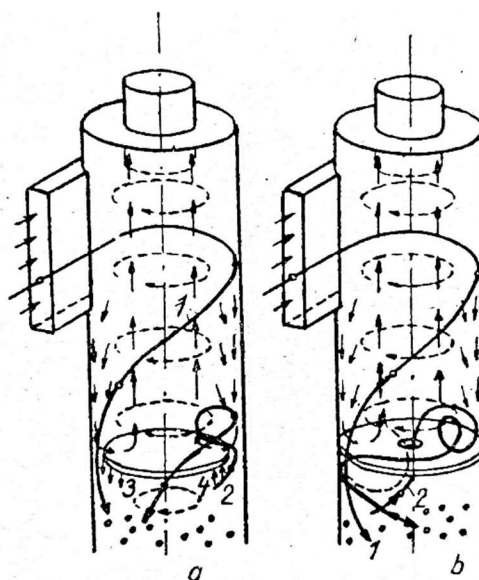
### 3.3.8 Feifelův cyklón

Feifelův cyklón se skládá pouze z válcové odstředivé komory, která je osazena kruhovým víkem a dnem, jenž je po obvodu opatřeno prstencovou štěrbinou nebo výmetnými otvory. Plyn je přiváděn tečným nátrubkem a po průchodu odstředivou komorou jde část spolu s prachem do výsypky, načež se vrací kruhovým otvorem umístěným v jeho středu. Jak již víme z předchozích typů cyklónů, nejlepší oblast z hlediska odlučivosti je střední část komory, neboť jsou zde nepatrné radiální síly a obvodové rychlosti jsou plně vyvinuty. Díky tomu je zde vysoká šance, že i velmi malá částice dosáhne stěny odstředivé komory. Jedná se o ideální místo pro umístění otvoru výstupní trouby.

Jak jsme již řekli, podmínky pro odstranění částic z plynu jsou nejvíce nepříznivé u víka a dna odstředivé komory. Feifel usoudil, že je vhodné částice odvádět do výsypky v místě jejich nejvyšší koncentrace, tedy pouze v oblasti styku dna s boční stěnou komory, a proto se zde nachází výše zmíněná prstencová štěrbiná, případně výmetné otvory. Nutno ovšem podotknout, že tlak není v celém průřezu konstantní, neboť cyklón není osově symetrický. Na obrázku 21 jsou popsány trajektorie prachu do výsypky. Vlevo je cyklón opatřen prstencovou štěrbinou bez osového vstupního otvoru, kde je tlak v místě 3 větší než v místě 4, tedy v oblasti 3 prach vstupuje do výsypky a v oblasti 4 z ní vystupuje nosný plyn spolu s uneseným zbytkem. V pravé části obrázku si lze všimnout konstrukčního provedení s osovým otvorem, kudy odchází z výsypky nosný plyn, neboť je v místě osy cyklónu nejnižší tlak. Aby nedocházelo ke kontaminaci již čistého plynu, respektive aby mohly být uneseny částice opět vyloučeny ze středu jádra, je nutné vzdálit vstupní otvor a otvor výstupní trouby ode dna cyklónu.



Obrázek 20 – Van Tongerenův cyklón se šroubovitým žlábkem [5]

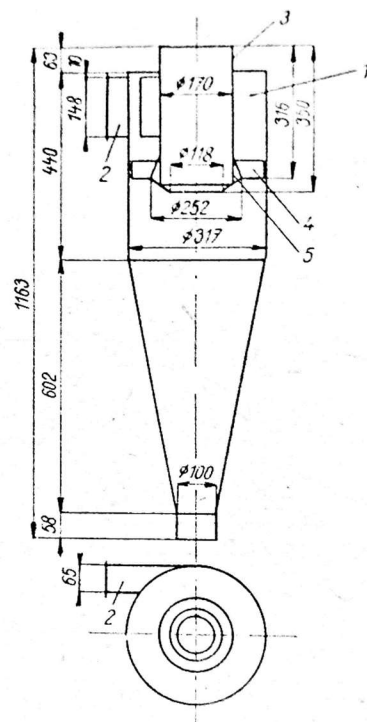


Obrázek 21 – Princip Feifelova cyklónu [5]

Feifelovy cyklóny vynikají vysokou odlučivostí, dosahující až 90 %, i pro jemné prachy, kde průměr nejmenších částic byl 5-8  $\mu\text{m}$ . Ačkoliv lze Feifelovy cyklóny aplikovat jednotlivě, vzhledem k malým rozměrům cyklónu, a tedy i nízkému průtokovému množství, je vhodné jejich užití ve velkých počtech, při bateriovém uspořádání. [5]

### 3.3.9 Cyklón Korsa

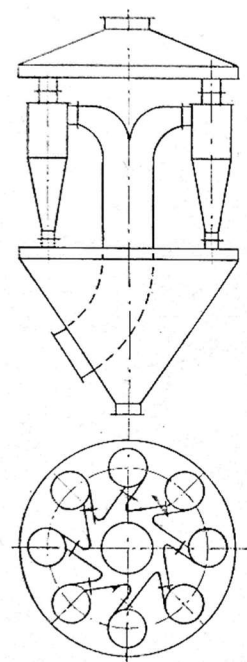
Cyklón Korsa se skládá s válcové a kuželové části (vrcholový úhel je cca 20°) odstředivé komory. Oproti konstrukčně podobným cyklónům je přibližně v rovině otvoru výstupní trouby na ní umístěn náboj, na němž jsou rozváděcí lopatky. Plyn je přiváděn tečným nátrubkem. Náboj má rozšiřující se tvar ve směru proudění plynu, což má za následek zvyšující se rychlost proudění a za cíl usměrnit prachové částice zdržující se v oblasti vnějšího pláště výstupní trouby. Tok plynu je při průchodu rozváděcími lopatkami rozdělen na vícero proudů, které jsou ovšem různé, neboť plyn vstupuje asymetricky vzhledem k průřezu odstředivé komory, tedy tečným nátrubkem z jedné strany.



Obrázek 22 – Cyklón Korsa [5]

Tak jako u jiných cyklónů s rovinným víkem je i u typu Korsy problém s tvorbou prachového prstence pod horním víkem, který má nepříznivý vliv na celkovou odlučivost, jenž je ovšem částečně vyřešen umístěním již zmíněných rozváděcích lopatek. Ty také brání plnému rozvinutí sekundárního proudění. Výstupní trouba má tvar difuzoru, díky čemuž je docíleno snížení tlakové ztráty až o 12 %, a je osazena již zmíněnými rozváděcími lopatkami. S klesající velikostí průřezu výstupního otvoru roste odlučivost zařízení, nicméně roste také tlaková ztrata. Při testování různých provedení cyklónů Korsy byla zjištěna odlučivost 78-84 % při PMO v rozmezí 2-4  $\mu\text{m}$ .

Cyklón Korsy se používá výhradně ve skupinovém provedení, případně pro lepší odlučivost lze zařadit více skupinových odlučovačů za sebe. Jsou uspořádány v kruhu, přičemž mají společnou prachovou výsypku a prostor pro vyčištěný plyn. Díky speciální osově hlavě, která přivádí znečištěný plyn tečně do každého z cyklónů, je docíleno takřka rovnoměrného rozdělení proudu plynu. Nevýhodou skupinových odlučovačů Korsy je obtížná montáž a velké rozměry. Naproti tomu jsou schopny dosáhnout vysoké odlučivosti blízké se bateriovým odlučovačům, přičemž oproti nim jsou výrobně levnější a nejsou tak náchylné na abrazi. [5]



Obrázek 23 –  
Skupinové zapojení  
cyklónů Korsy [5]

### 3.4 Odstředivé – bateriové

Jelikož je odlučivost samostatně pracujících cyklónů běžně nedostačující pro jemné prachy, bylo třeba ji zvýšit, čehož lze nejlépe docílit jejich zmenšením. Odstředivé odlučovače v bateriovém uspořádání jsou schopny čistit i jemný prach při zachování potřebného průtokového množství, neboť se skládají z většího množství malých cyklónů (tzv. buněk),

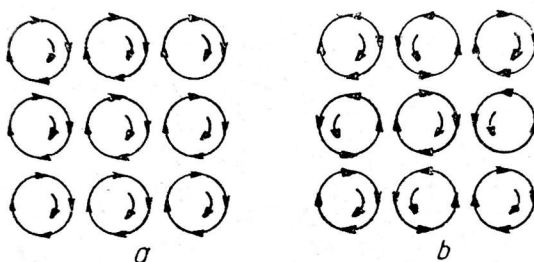


jejichž průměr bývá zpravidla menší než 300 mm. Buňky bateriových odlučovačů lze dle způsobu vzniku proudění rozdělit do dvou základních skupin: [5]

- Buňky s tečným vstupem
- Buňky s osovým vstupem a usměrňovacím zařízením – lopatkové kolo
  - Malé lopatky umístěné vějířovitě
  - Šroubovitě lopatky

Z hlediska kompletace bateriových odlučovačů jsou výhodnější buňky s axiálním vstupem plynu, neboť je lze mnohem jednodušeji skládat vedle sebe (vyčistit nebo vyměnit) než buňky s tečným vstupem. Celková odlučivost bateriového odlučovače je vždy nižší než odlučivost jednotlivých buněk, a to z důvodu nerovnoměrného tlakového spádu mezi jednotlivými buňkami a společnou výsypkou. Pro maximální možnou odlučivost je třeba rovnoměrného proudění plynu mezi výsypkou a buňkou, čehož nelze docílit kvůli konstrukčním nepřesnostem, usazeninám prachu apod. Abychom se rovnoměrnému tlakovému spádu alespoň přiblížili, je třeba splnit následující podmínky: [5]

- Vstupní rychlost plynu do buněk by neměla překročit 10 m/s
- Vstup znečištěného plynu musí být rovnoměrně vzdálen od jednotlivých buněk
- Odsávání části plynu z výsypky – vznik podtlaku (4-17 % – dle typu zařízení)



Obrázek 24 – Schéma oběžného proudění v buňkách [5]

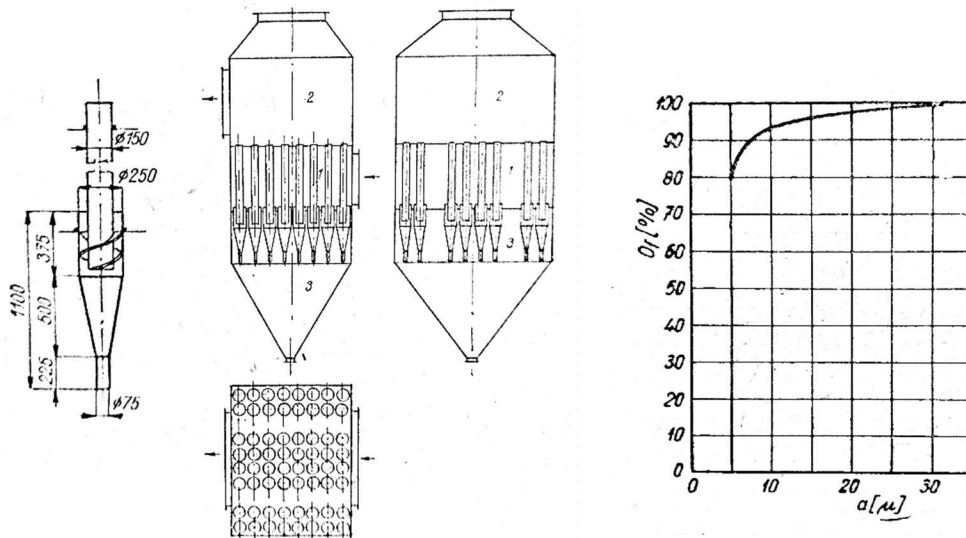
Na obrázku výše jsou znázorněny možnosti oběžného proudění v buňkách bateriového odlučovače. Při stejnosměrném proudění (a) nastává vzájemné brždění vírů ve výsypce, což je z hlediska odlučivosti i tlakového spádu nepříznivý jev. Z toho důvodu je výhodné oběžné protichůdné proudění (b), kdy víry vystupující z buňky do výsypky mají v místech vzájemného přiblížení přibližně souhlasný směr.

Bateriové odlučovače jsou složeny z jednotlivých bloků buněk (vyrábí se v různých počtech) v závislosti na velikosti průtokového množství čištěného plynu. Velkou výhodou bateriových odlučovačů je možnost, zaslepení bloků při změně průtokového množství plynu, díky čemuž odlučovač pracuje stále s optimálním průtokovým množstvím. Při správné funkci bateriových odlučovačů, s důrazem na rovnoměrné zatížení jednotlivých buněk, lze dosáhnout vysokých odlučivostí i pro jemné prachy se značným množstvím částic pod 10  $\mu\text{m}$ . Jsou schopny čistit plyny i za vysokých teplot. Nutností je, aby byl prach suchý a nevláknitý, neboť se odlučovač snadno ucpává. Při konstrukci buněk je třeba dbát na dostatečné silné stěny z důvodu náchylnosti na abrazi. [5]

### 3.4.1 Bateriový odlučovač CG-1

Buňky odlučovače se zpravidla vyrábí o průměru 250 mm při průměru výstupní trouby 150 mm, případně pro nelepící prach lze zkonstruovat i menší o průměru 150 mm. Po vstupu

do buňky je plyn usměrněn rozváděcími šroubovitými lopatkami. Blok odlučovače je vzduchotěsně rozdělen horizontálními deskami do třech částí. Horní přepážka odděluje již vyčištěný plyn od vstupního prostoru a spodní přepážka odděluje tentýž prostor od prachové výsypky. [5]

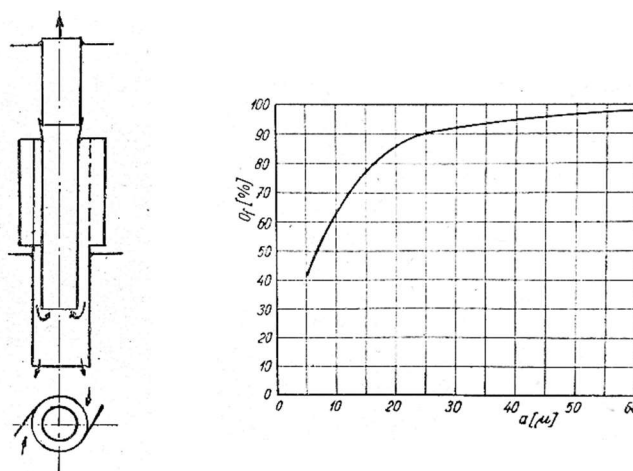


Obrázek 25 – Bateriový odlučovač CG-1 a jeho frakční odlučivost při dvou buňkách o průměru 150 mm [5]

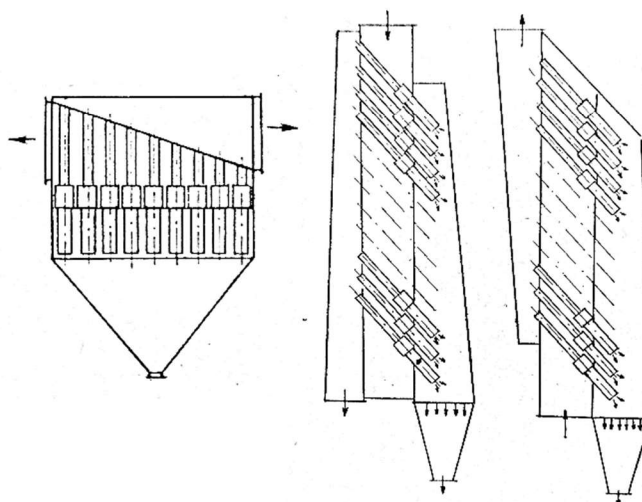
### 3.4.2 Bateriový odlučovač Prat-Daniel

Odlučovač Prat-Daniel je typický dvojitým tečným přívodem znečištěného plynu do komory a absencí kuželové části odstředivé komory. Plyn přivedený tečným vstupem je uveden do rotačního pohybu a po dosažení otvoru výstupní trouby se proud otáčí o 180° a odchází pryč z buňky. Pro zlepšení odlučivosti lze buňku opatřit dnem s obvodovou štěrbinou a osovým otvorem. Buňky se běžně konstruují v průměru 150 mm.

Uspořádání buněk bývá obvykle totožné jako u předchozího CG-1. Buňky mohou být kolmé ke směru vstupu a výstupu plynu nebo pod úhlem, jak si lze všimnout na obrázku č. 27.



Obrázek 26 – vlevo: Buňka odlučovače Prat-Daniel, vpravo: Frakční odlučivost odlučovače Prat-Daniel s buňkami o průměru 150 mm [5]



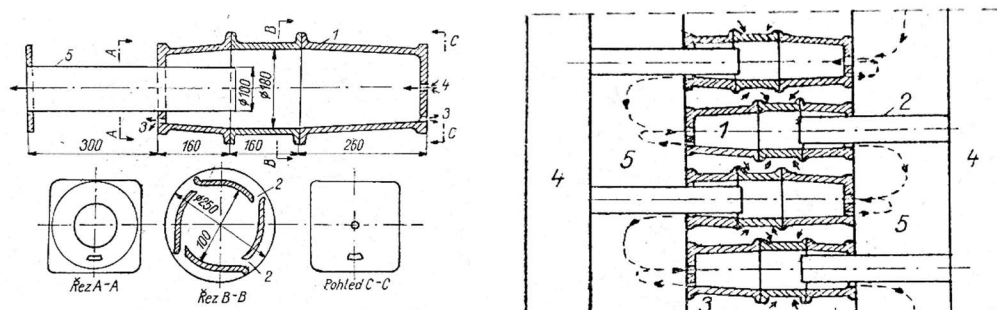
Obrázek 27 – Možnosti konstrukčního provedení bateriového odlučovače Prat-Daniel [5]

Nejvyšší odlučivosti lze dosáhnout při kombinaci odlučovače Prat-Daniel s bočním sekundárním cyklónem (stejný typ), do nějž je odsávána část již vyčištěného plynu, přibližně 10 % z celkového průtokového množství. V primárním odlučovači jsou ve výstupních troubách ještě další trouby menšího průměru, které ústí do vzduchotěsně odděleného prostoru vyčištěného plynu, zatímco ty s větším průměrem odvádí plyn s prachem do prostoru odsávání plynu do sekundárního odlučovače. [5]

### 3.4.3 Bateriový odlučovač Feifel

Buňka bateriového odlučovače Feifel je složena ze dvou komolých kuželů a válcové komory, spojených přírubami. Oproti předchozím typům jsou buňky v horizontální poloze. Do válcové komory o průměru 180 mm plyn vstupuje tečně 4 štěrbinami po obvodu. Na obvodu obou čelních stěn je štěrbina sloužící jako výmetný otvor. Z kratšího kužele odchází vyčištěný plyn výstupní troubou, která takřka nezasahuje do válcové části. Prostor odlučovače je rozdělen vzduchotěsnými přepážkami do několika částí. Odděleny jsou části 4 (oblast již čistého plynu), 5 (výsypka) a 3 (oblast vstupu plynu do buněk).

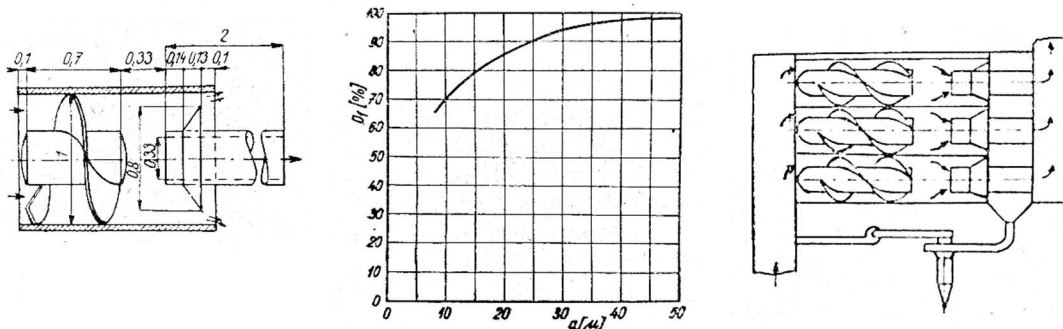
Feifelův bateriový odlučovač vyniká vysokou odlučivostí pohybující se přes 90 % při PMO 4-5  $\mu\text{m}$  a je odolný vůči abrazi. Mezi hlavní nevýhody patří riziko ucpávání výmetných otvorů a velké rozměry vzhledem k umístění buněk. [5]



Obrázek 28 – Bateriový odlučovač Feifel [5]

### 3.4.4 Bateriový odlučovač VTI

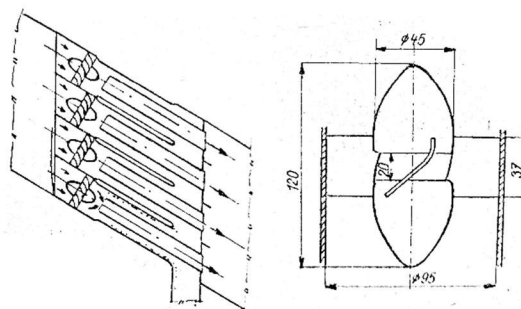
Jedná se o odlučovač jednoduché konstrukce s přímým tokem plynu. Znečištěný plyn je po vstupu do komory usměrňován dvěma šroubovitými lopatkami. Prach se koncentruje na stěně odstředivé komory a poté odchází spolu s částí plynu prstencovou štěrbinou do společné výsypky. Aby nedocházelo k usazování prachu u výstupní štěrbině, je zde umístěn kuželový nástavec. Pro optimální provoz je nutné odsávání vzduchu z výsypky (cca 20 %), a to z důvodu potlačení proudění mezi jednotlivými buňkami. Tento odsátý plyn je dále čištěn v jiném cyklónu. Mezi hlavní výhody odlučovače VTI patří snadná výroba (absence kuželových částí) a kompaktnost. [5]



Obrázek 29 – Bateriový odlučovač VTI – konstrukce a frakční odlučivost [5]

### 3.4.5 Bateriový odlučovač Schicht

Je druhým typem bateriového odlučovače s přímým tokem plynu. Plyn je po vstupu do buňky usměrňován rozváděcím vejčitým kolečkem, které je osazeno lopatkami. V zásadě se jedná o velmi jednoduchý typ, který nedosahuje takových odlučivostí jako jiné, a to především z důvodu nerovnoměrného rozdělení plynu mezi buňkami. Jeho hlavní výhodou je kompaktnost. Lze jej umístit přímo do potrubí, a to právě takové množství buněk, kolik je potřeba. Pro zlepšení odlučivosti je vhodné odsávat plyn z prachové výsypky, případně je nutné, aby byla prachová výsypka dokonale utěsněna a nedocházelo k přísávání falešného vzduchu. [5]

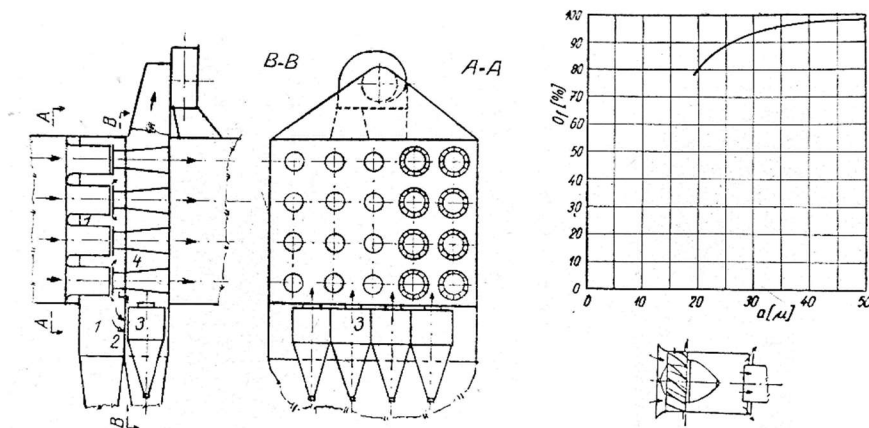


Obrázek 30 - Bateriový odlučovač Schicht [5]

### 3.4.6 Bateriový odlučovač Sirocco

Jedná se o dvoustupňový odlučovač. Plyn vstupuje do horizontálních buněk, načež je rozveden lopatkami, kde je prach soustředěn na stěně buňky a odchází prstencovou štěrbinou spolu s částí vzduchu do primární výsypky (1). Zatímco hrubá frakce zde sedimentuje, jemnější částice pokračují spolu s odsávaným plynem otvory (2) do

vertikálního bateriového odlučovače (3), kde je odloučen jemný prach. Takto vyčištěný dílčí plyn je následně odsáván do hlavního proudu čistého plynu. Tento typ odlučovače je vhodný pouze pro hrubší prach (nad 20  $\mu\text{m}$ ). Mezi jeho výhody patří takřka konstantní odlučivost při proměnném průtoku, kompaktnost, nízká tlaková ztráta a s tím související nízké provozní náklady. [5]



Obrázek 31 – Bateriový odlučovač Sirocco – konstrukce a frakční odlučivost [5]

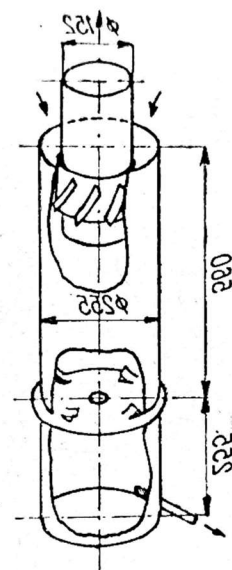
### 3.4.7 Howdenův bateriový odlučovač

Howdenův odlučovač je taktéž dvoustupňový, konstrukčně dosti podobný odlučovači Sirocco. Znečištěný plyn vstupuje do horizontálně umístěných buněk primárního odlučovače s přímým tokem plynu, načež je rozveden usměrňovacími lopatkami umístěnými na náboji. Odloučený prach je poté s dílčím množstvím plynu přiveden do svislých buněk sekundárního odlučovače stejného typu, nicméně menších průměrů a s vratným tokem. Odloučený prach je usazen ve výsypkách, zatímco vyčištěný plyn je přiváděn do hlavního proudu plynu vystoupivšího z primárního odlučovače. Oproti odlučovači Sirocco vyniká Howdenův odlučovač vysokou odlučivostí dosahující 93 % při PMO 2,5  $\mu\text{m}$ . [5]

### 3.4.8 Bateriový odlučovač Dunlab II ES-2

Je konstrukčně podobný odlučovači Feifel. Plyn je osově přiveden do válcové odstředivé komory buňky, kde je usměrňován rozváděcími lopatkami. V dolní polovině je komora rozdělena kolmou přepážkou, v níž jsou 4 výmetné otvory a středový kruhový otvor, obdobně jako u odlučovače Feifel, která ji rozděluje na odstředivou část a výsypku. Z prachové výsypky je část plynu přivedena zpět do odstředivé komory a zbytek je odsáván, přičemž je dále čištěn v jiném odlučovači.

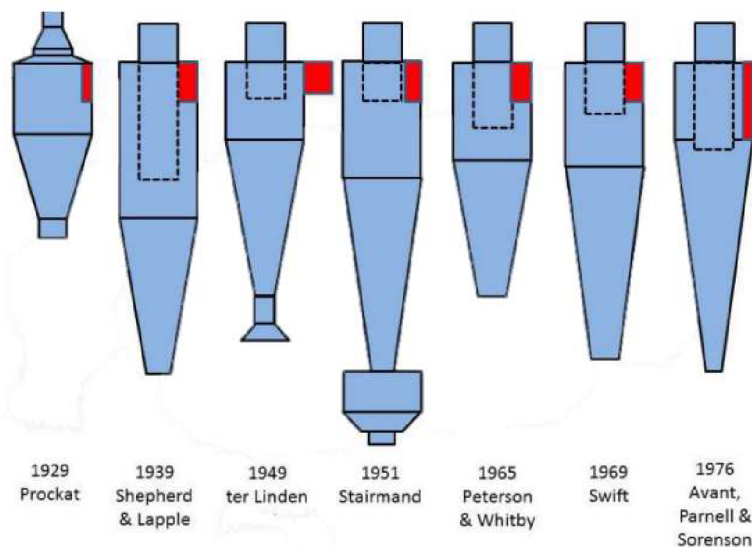
Na obrázku si lze všimnout konstrukčního provedení buňky bateriového odlučovače, u něhož bylo dosaženo nejlepších výsledků, a to celkové odlučivosti cca 90 %, přičemž prošlý popílek obsahoval cca 2 % částic větších než 20  $\mu\text{m}$  a 19 % částic větších 10  $\mu\text{m}$ . [5]



Obrázek 32 – Buňka bateriového odlučovače Dunlab II ES-2 [5]

### 3.5 Současné trendy

Ačkoliv prošel vývoj cyklónů během posledních několika desetiletí optimalizací, jejich základní princip a tvar se v zásadě nezměnil. Vzhledem k přísnějším emisním limitům tuhých znečišťujících látek byl kladen důraz na zvýšení odlučivosti, a to i za cenu vyšší tlakové ztráty, čehož bylo docíleno mj. prodloužením těla kuželové části cyklónu a jejich zúžením, tedy došlo ke změně poměrů charakteristických rozměrů<sup>7</sup> ze 2D2D na 1D2D či 1D3D, jak si lze všimnout na schémata vývoje níže. K navrhování cyklónu se běžně využívá tzv. simplexů, tedy závislosti základních rozměrů cyklónu na charakteristické veličině – zpravidla se jedná o průtok.



Obrázek 33 – Optimalizace konstrukce cyklónů pro dosažení vyšší účinnosti [7]

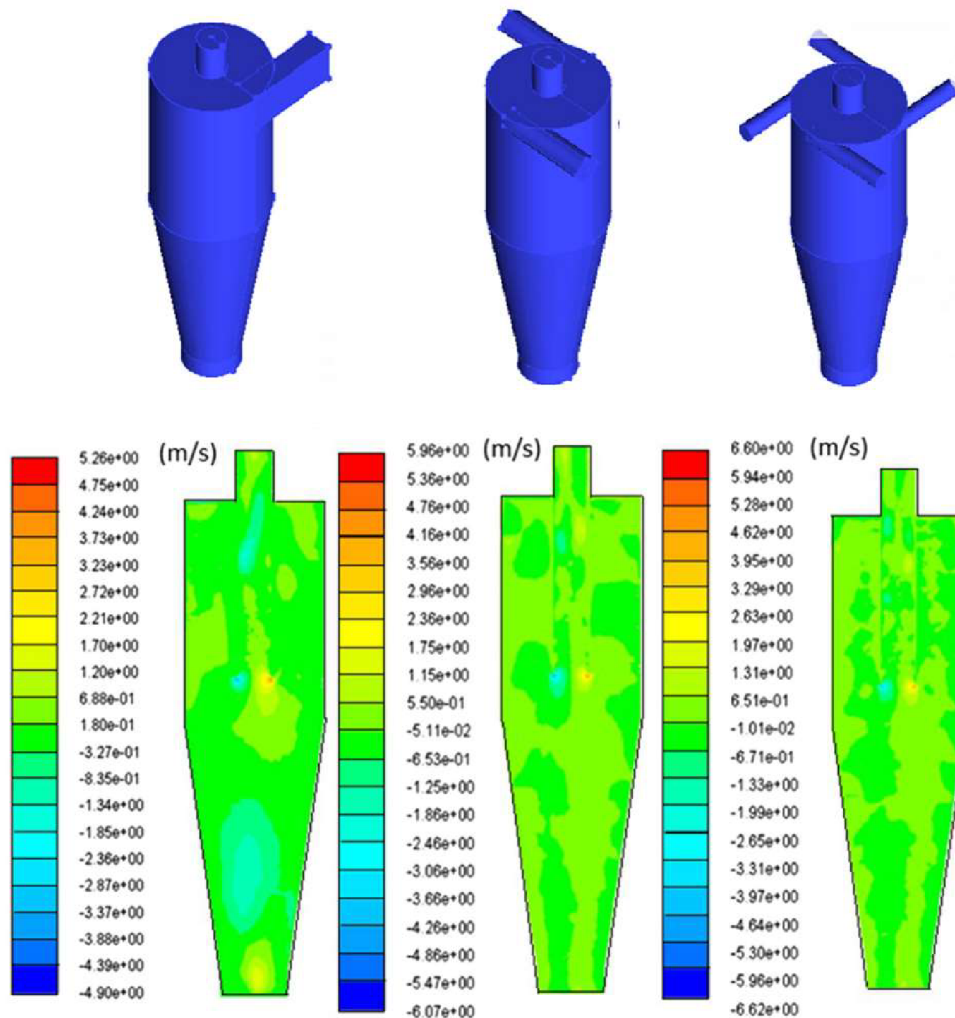
Author (date)	Height (in Cylinder Diameters)			
	Efficiency	Cylinder (Barrel)	Cone	Total
Prockat (1929)	Low	1	1	2
Shepherd and Lapple (1939)	High	2	2	4
ter Linden (1949)	High	1	2	3
Stairmand (1951)	High	1.5	2.5	4
Peterson and Whitby (1965)	High	1.33	1.84	3.17
Swift (1969)	High	1.4	2.5	3.9
Avant et al. (1976)	High	1	3	4

Obrázek 34 – Základní rozměry běžně používaných cyklónů [7]

Při návrhu cyklónu je třeba zvážit konstrukci vstupního otvoru a výstupní trouby. Maximální odlučivosti dosahují cyklóny se spirálovým vstupem i výstupem, nicméně u malých cyklónů se nehodí vzhledem k náročnosti výroby a u cyklónů s velkým průtokem plynu hrozí nebezpečí deformace těla, neboť snižují pevnost zařízení v axiálním směru. Vliv na účinnost separace částic má také počet vstupních otvorů, kterými je přiváděn znečištěný plyn, a jejich geometrie. Při simulaci stejných cyklónů s jedním, dvěma a čtyřmi tečnými vstupy plynu bylo prokázáno, že rovnoměrné uspořádání vícero symetrických vstupů je z hlediska odlučivosti

<sup>7</sup> Označení xDxD značí poměr výšek válcové a kuželové části cyklónu vůči průměru válcové části. Tedy pro demonstraci 2D2D je cyklón, jehož výška válce i kuželu je rovna dvojnásobku jeho průměru.

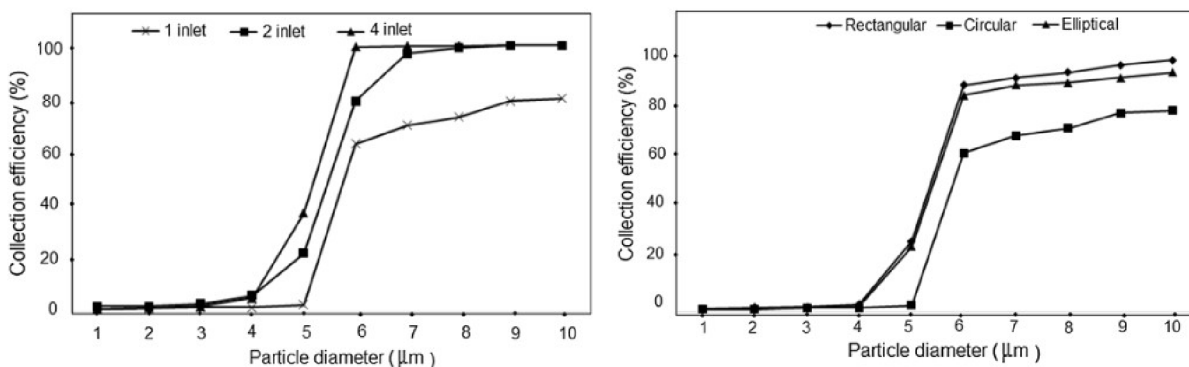
výhodnější z důvodu rovnoměrnějšího rozložení proudu plynu a vyšší tečné rychlosti v odstředivé komoře, viz znázornění níže. [8] [9]



Obrázek 35 – Velikost tečných rychlostí v simulovaných modelech [9]

Odlučivost je proměnná také v závislosti na geometrii vstupního nátrubku. Simulace prokázala, že nejlepších výsledků lze dosáhnout s obdélníkovým, případně elipsovitým nátrubkem, nicméně za cenu vyšší tlakové ztráty, viz obrázek 36 vpravo. [9]





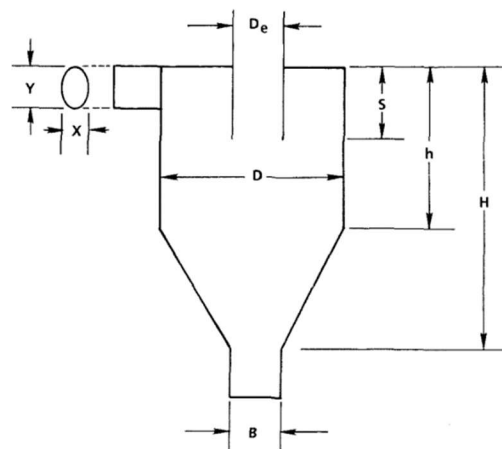
Obrázek 36 – Vliv konstrukce vstupních nátrubků na frakční odlučivost [9]

Odlučivost lze dále zvýšit umístěním deflektoru do výstupní trouby a do výtokového otvoru cyklónu. Jedná se o těleso válcového či kuželového tvaru, které má za cíl zamezit nežádoucímu zpětnému proudění, což vede i k nižší tlakové ztrátě. Deflektor umístěný v ústí do výsypky dále částečně zabraňuje zpětnému strhávání již odloučených částic zpět do odstředivé komory cyklónu. [8]

Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, nejvyšší odlučivosti lze dosáhnout užitím bateriového odlučovače, který je složen z jednotlivých buněk, jejichž průměr se pohybuje řádově v jednotkách až stovkách milimetrů. V 90. letech byla provedena experimentální studie odlučivosti a vlivů na ni velmi malých cyklónů o rozměrech v jednotkách centimetrů, viz tabulka níže.

Tabulka 1 – Charakteristické rozměry cyklónů [10]

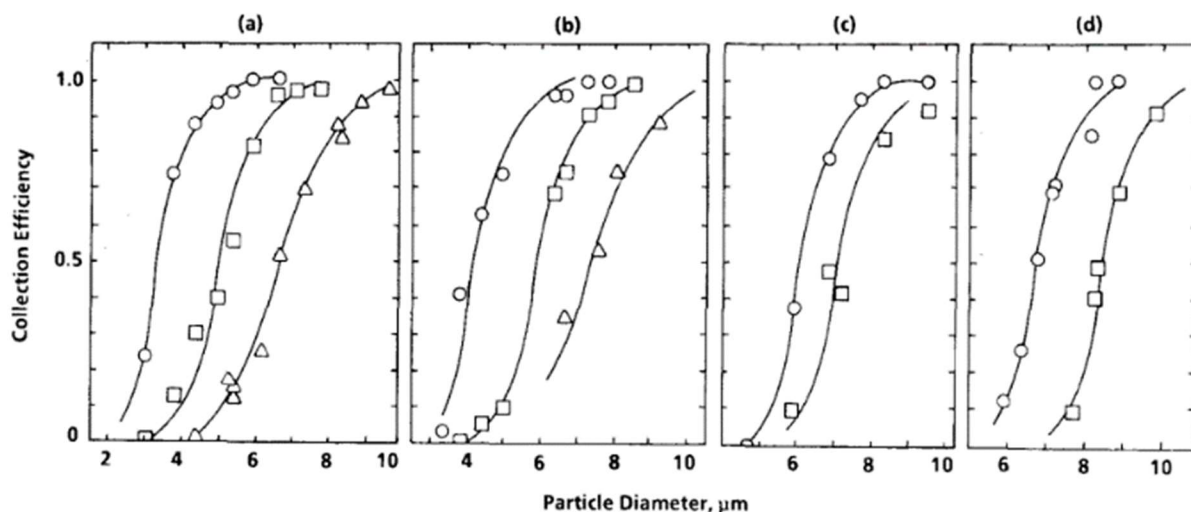
Označení cyklónu	Průměr těla D	Průměr výstupní trouby $D_e$	Další rozměry [mm]
	[mm]	[mm]	X=7,1 Y=12,9 S=36 H=45 H=95 B=15
a)	219	8	
b)	219	10	
c)	219	13,6	
d)	219	17,5	



Obrázek 37 – Rozměry cyklónu [10]

Jak si lze všimnout z grafů na obrázku 38, návrh výstupní trouby má zásadní vliv na odlučivost cyklónu, která s jejím rostoucím průměrem výrazně klesá. Spolu s ní se snižuje i velikost tlakové ztráty. Ve studii byly srovnány naměřené výsledky frakčních odlučivostí s teoretickými modely dle autorů Barth a Leith-Licht. Bylo prokázáno, že pro odhad teoretické odlučivosti cyklónu malých rozměrů je mnohem přesnější Barthův model. [10]





Obrázek 38 – Frakční odlučivosti měřených cyklónů pro různé průtoky:

(o) 18.4 l/min; (□) 12.4 l/min; (Δ) 8.8 l/min. [10]

Pro dosažení optimální odlučivosti cyklónu je kromě průměru výstupní trouby dále důležitá také hloubka jejího zapuštění. V roce 2017 bylo simulací zjištěno, že vhodným zapuštěním trouby lze zvýšit odlučivost až o několik procent. Optimální poměr  $s/D$  se liší v závislosti na vstupní rychlosti, nicméně lze prohlásit, že pohybuje v rozmezí 1-1,5.

Tabulka 2 – Hodnoty zjištěné během simulace vlivu hloubky zapuštění na odlučivost [11]

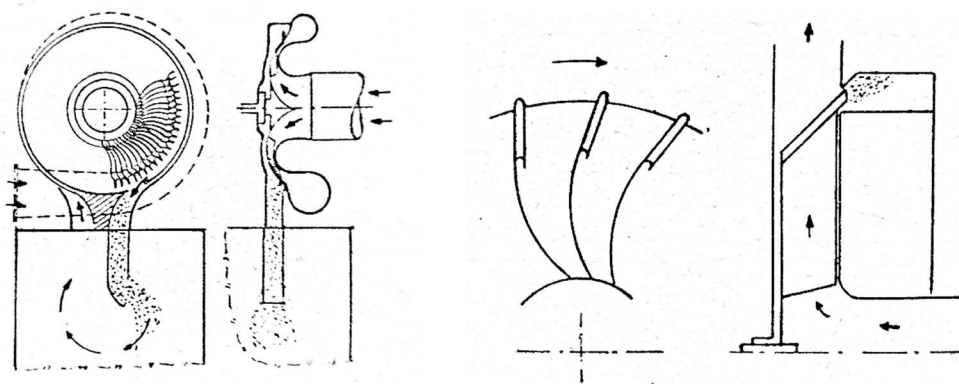
Poměr $s/D$	Další rozměry	$v_{MAX}$ [m/s]		$p_{MAX}$ [Pa]		$O_c$ [%]	
		$v_{IN}=15$	$v_{IN}=30$	$v_{IN}=15$	$v_{IN}=30$	$v_{IN}=15$	$v_{IN}=30$
[-]	[mm]	[m/s]		[m/s]		[m/s]	
	$D_c=1000$	[m/s]		[m/s]		[m/s]	
0,50	X=200	18,97	38,07	424,58	1697,11	82,14	78,73
0,75	Y=500	19,12	38,41	428,95	1715,74	81,24	83,39
1,00	$D_e=500$	18,90	37,94	437,56	1747,97	80,55	83,51
1,25	h=1500	19,03	38,22	450,40	1802,54	85,71	85,95
1,50	H=4000	19,41	38,88	462,31	1854,84	86,50	84,58

V závislosti na vlastnostech čistěného média a prachu se cyklóny vyrábí z plechů z uhlíkové oceli, z ušlechtilé oceli třídy 17, případně při vyšší míře abraze z otěruvzdorné oceli. Při zvláště abrazivním prachu či plynu s vysokým obsahem vlhkosti s rizikem kondenzace vodních par je vhodné povrch odlučovací komory cyklónu chránit tenkou vrstvou plastu, gumy či keramiky. [5] [8]

### 3.6 Rotační – rotoklony

Oproti předchozím zařízením, které využívají k odlučování tíhové a odstředivé zrychlení, u rotačních odlučovačů je dominantní Coriolisovo zrychlení, které vzniká při relativním pohybu částice vzhledem k tělesu, jenž se zároveň otáčí.

Rotoklony si lze představit jako kombinaci dvou zařízení, a to ventilátoru a odlučovače. Existují 2 hlavní typy lopatek rotoklonu, a to lžičkovité a se žlábkem. V obou provedeních jsou při průchodu plynu rotorem prachové částice odvalovány od osy k okrajovým částem lopatek, kde v případě lžičkovitých odchází úzkou prstencovou štěrbinou s dílčím množstvím plynu do tzv. sekundárního oběhu. Po průchodu prachovou výsypkou se prachové částice usazují a zbytkový plyn je opět nasáván ventilátorem. U lopatek se žlábkem je situace obdobná. Znečištěný prach je odváděn s dílčím množstvím plynu žlábkem v lopatce do přilehlého prachového prostoru, kde sedimentuje.



Obrázek 39 – Rotoklon se lžičkovitými lopatkami (vlevo) a se žlábkem (vpravo) [5]

Rotoklony jsou kompaktní, provozně úsporné a dosahují obstojných odlučivostí částic. Nejsou náchylné na abrazi, mohou lze odlučovat i plyn o vysoké teplotě a jejich odlučivost je takřka konstantní i při proměnném průtoku plynu. Hlavní nevýhodou jsou vysoké investiční náklady, neboť skříň i lopatky musí být vyrobeny z kvalitních materiálů a pro optimální provoz je nutné přesné obrobení a montáž. [5]

## 4 Mokrý mechanický odlučovače

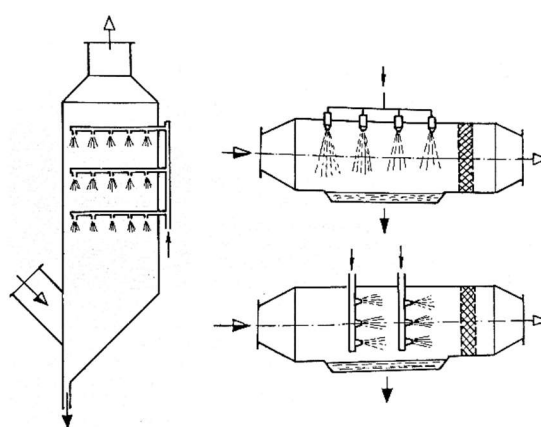
### 4.1 Sprchové

Jedná se o nejjednodušší druh mokrých odlučovačů. Čištění je založeno na setrvačném principu, kdy je proud plynu sprchován kapalinou, která strhává prachové částice z nosného média. Sprchové odlučovače lze rozdělit dle provedení na sprchové věže, kde kapalina smáčí plyn pádovou rychlostí, a sprchové komory, v nichž je do plynu kapalina vstříkována vysokotlakými tryskami.

Znečištěný plyn proudí ve sprchové věži zespoda nahoru nízkou rychlostí, ne větší než 1,5 m/s. V horní části jsou umístěny trysky pro vstříkování kapaliny tak, aby bylo dosaženo jejího rovnoměrného rozdělení v celém průřezu. Vzhledem k optimální velikosti kapek 800  $\mu\text{m}$  je nutno používat trysky nízkotlaké.

Sprchové věže mají vysokou měrnou spotřebu vody (1-5  $\text{l/m}^3$ ) a nedosahují vysokých odlučivostí, tedy zpravidla jsou řazeny jako předodlučovače.

Sprchové komory jsou principiálně velmi podobné. Rozdíl spočívá v horizontálním provedení, vyšší rychlosti plynu (do 3 m/s), nižší měrné spotřebě vody (0,2-1,1  $\text{l/m}^3$ ) a vstříkování vody vysokotlakými tryskami (optimální velikost kapek se pohybuje v rozmezí 100-300  $\mu\text{m}$ ). Na výstupu je většinou instalován odlučovač kapek. [1] [5]



Obrázek 40 –

vlevo: Sprchová věž,

vpravo: Sprchová komora [1]

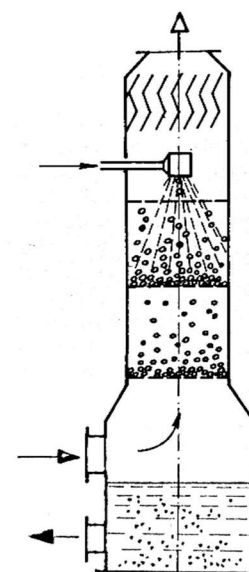
### 4.2 Setrvačné

Setrvačné odlučovače lze rozdělit dle provedení na dva typy, a to na odlučovače se skrápěnou vrstvou a hladinové.

Nejjednodušším odlučovačem se skrápěnou vrstvou je tzv. prutkový odlučovač, kde je skrápěná vrstva složena z několika řad válcových tyčí o průměru cca 16 mm. Rychlost plynu je přibližně 15 m/s a měrná spotřeba vody se pohybuje kolem 0,2  $\text{l/m}^3$ . Jelikož nedosahuje vysoké odlučivosti, lze ji zvýšit přidáním dalších řad prutů, nicméně s odlučivostí roste i tlaková ztráta, užívá se jej jako předodlučovače.

Dalším typem se skrápěnou vrstvou je náplňový odlučovač, kde plyn proudí skrz vrstvu tvořenou keramickými nebo plastovými kroužky. Rychlost plynu se pohybuje do 15 m/s, při vyšších rychlostech roste riziko strhávání kapaliny vyčištěným plynem. Odlučivost je závislá na tloušťce skrápěné vrstvy, přičemž při rostoucí tloušťce se zvyšuje tlaková ztráta. Měrná spotřeba vody je závislá na koncentraci prachu, nicméně zpravidla nepřesahuje 1  $\text{l/m}^3$ .

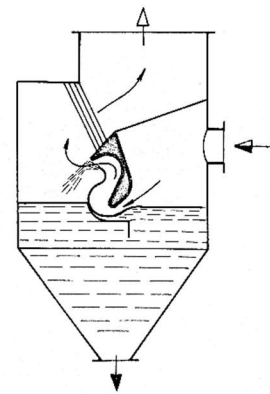
Modernějším zařízením je odlučovač s pohyblivou skrápěnou vrstvou. Plyn proudí skrz několik pater perforovaných plechů, na nichž jsou umístěny plastové kuličky, které jsou vířeny. Proti proudu plynu je vstříkována kapalina, která je smáčí.



Obrázek 41 – Odlučovač se skrápěnou pohyblivou vrstvou [1]

Rychlost proudění bývá zpravidla přibližně 5 m/s. Odlučovače se skrácenou vrstvou jsou schopné dosáhnout odlučivosti blízké se 99 %.

Nejrozšířenějším setrvačným zařízením s nejvyšší odlučivostí (mez odlučivosti je až  $1\mu\text{m}$ ) je hladinový odlučovač. Konstruuje se jak s osovým, tak s tečným přívodem plynu. Znečištěný plyn je přiveden vysokou rychlostí štěrbinou mezi lopatkou a vodní hladinou, načež strhává kapalinu a dochází ke směšování prachu a vzniklé vodní tříště. Po průchodu skrz vodní hladinu prochází plyn ještě vodní clonou, kde jsou odloučeny zbylé částice. Na výstupu z odlučovače je vhodné zařadit odlučovač kapek. Nevýhodou odlučovače je jeho vysoká tlaková ztráta, která je spolu s odlučivostí takřka konstantní i při proměnném průtoku plynu. [1] [5] [12]



Obrázek 42 - Hladinový odlučovač s tečným přívodem plynu [1]

### 4.3 Vírové

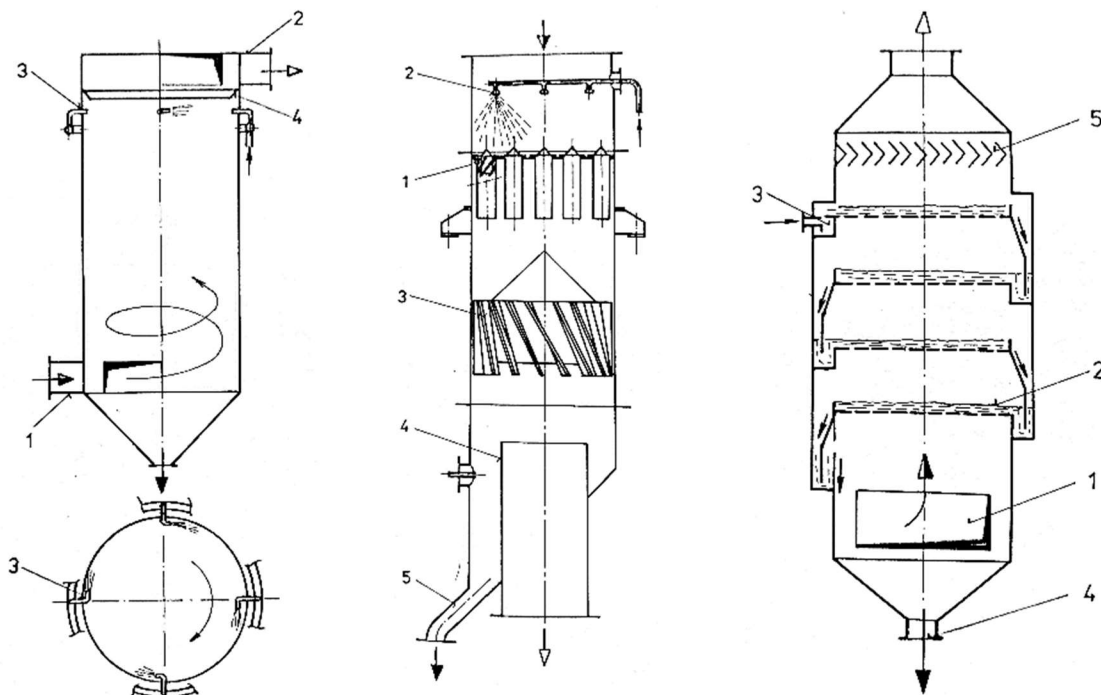
Dle působení kapaliny je lze je rozdělit do dvou základních skupin. První z nich jsou odlučovače (obr. č. 43), kde je kapalinou smáčená pouze stěna odstředivé komory, načež jsou částice odváděny ve formě kalu. Znečištěný plyn vstupuje (1) tangenciálně do spodní části válcové odstředivé komory. Kapalina je přivedena taktéž tangenciálně v horní části tryskami umístěnými po obvodu komory (3), čímž vzniká na stěně válce souvislý vodní film, který omývá proudící plyn a strhává prachové částice soustředěné u stěn komory. Plyn je z odstředivé komory odváděn opět tangenciálně (2). V horní části odlučovače je umístěna kuželová vložka (4), jež má zabránit úniku vody s vyčištěným plynem. Výhodou odlučovače se smáčenými stěnami je nízká měrná spotřeba vody (méně než  $0,3\text{ l/m}^3$ ). Oproti cyklónům netrpí na abrazi a lze v nich čistit i lepivý prach, nicméně nejsou vhodné pro plyny o teplotách převyšujících  $150\text{ }^\circ\text{C}$  z důvodu odpařování vodního filmu a následného nalepování částic na stěny komory. Maximální přípustná koncentrace částic v plynu je  $30\text{ g/m}^3$ .

Druhým provedením je vírníkový odlučovač, který dosahuje vyšší odlučivosti než odlučovač se smáčenými stěnami. Oproti předešlému odlučovači je kapalina vstříkována ve směru proudu plynu, opět v horní části komory (2), a to proti ústí vírníků (1), do kterých axiálně vstupuje znečištěný plyn. Jedná se o malé články o průměru 150 mm, které jsou na vstupu vybaveny usměrňovacími lopatkami. Ve vírnících je kal soustředěn na stěnách a následně odkapává na odlučovač kapek (3) a je odveden výtokovou trubkou (5). Čistý plyn je odveden středovou trubkou (4). Ve srovnání s předchozím odlučovačem dosahuje vyšší odlučivosti s mezí odlučivosti  $1\mu\text{m}$  při srovnatelné měrné spotřebě vody  $0,2\text{--}0,4\text{ l/m}^3$ . Nutno dbát na maximální přípustnou koncentraci prachu  $20\text{ g/m}^3$  a počítat s vyššími tlakovými ztrátami. [1]

### 4.4 Pěnové

Pěnový odlučovač je dosti podobný setrvačnému odlučovači se skrácenými přepážkami. Plyn vstupuje do válcové komory ve spodní části zařízení, načež prostupuje několik pater porézních přepážek, přes které protéká kapalina přiváděná v horní části nátokovou komorou. Při vhodné rychlosti plynu se na přepážkách vytváří pěna, která separuje prachové částice z proudu. Před výstupem plynu je řazen odlučovač kapek. Jakmile kapalina steče po porézních přepážkách, je odvedena hrdlem ve formě kalu. Důležitými podmínkami pro optimální funkci odlučovače jsou rovnoměrná tvorba pěny v celém průřezu přepážky, což omezuje velikost

zařízení, a vhodná vstupní rychlost plynu, přibližně 2 m/s. Mez odlučivosti je 1,5  $\mu\text{m}$  na patro, tlaková ztráta na patro je cca 300 Pa a měrná spotřeba prachu se pohybuje v rozmezí 0,3-0,6  $\text{l/m}^3$  v závislosti na koncentraci prachu v plynu. Hlavní výhodou pěnových odlučovačů je možnost jejich použití i pro silně znečištěné plyny o koncentraci až 500  $\text{g/m}^3$  a při vyšších teplotách, neboť nejsou tolik náchylné na odpar vody jako jiné typy mokřých odlučovačů. [1]



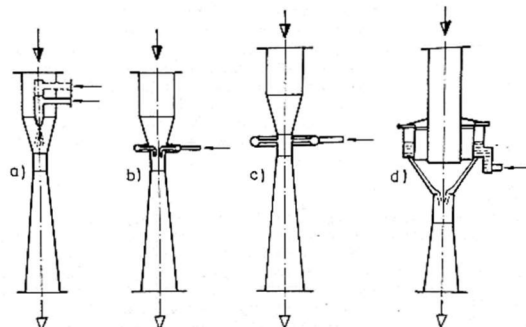
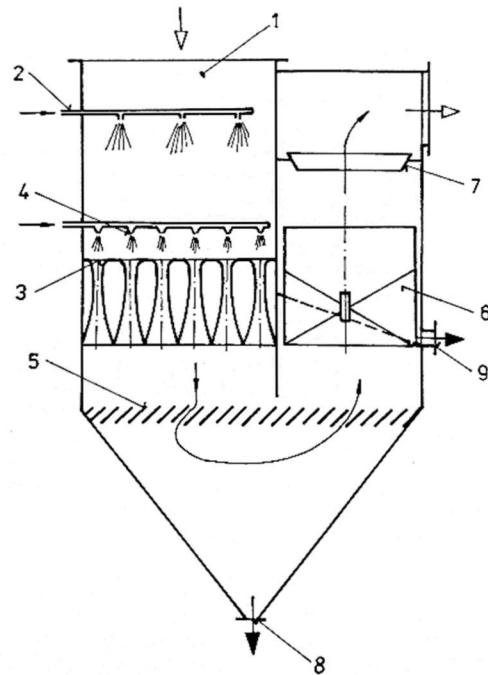
Obrázek 43 – zleva: Odlučovač se smáčenými stěnami, vířníkový odlučovač a pěnový odlučovač [1]

#### 4.5 Proudové

V proudových odlučovačích dochází k nástřiku kapaliny do proudu plynu při vysoké rychlosti dosahující až 100 m/s. Kapky jsou následně tříštěny na velikost desetin  $\mu\text{m}$  a vzhledem k relativní rychlosti jsou schopné separovat prachové částice o rozměrech menších než 1  $\mu\text{m}$ , přičemž k odlučování dochází jak v oblasti nástřiku kapaliny, tak v dýze. Při konstrukci proudových odlučovačů jsme limitováni velikostí Venturiho trubice, neboť je třeba dosáhnout rovnoměrného rozstřiku kapaliny v celém průřezu, a proto se pro větší průtoky plynu používá článkových odlučovačů složených z vícero trubic případně štěrbin. Z obrázku na následující straně je patrné, že kapalina může být vstříkována před hrdlo trubice (a) nebo až do něj (b, c). Speciálním případem je řešení za pomoci volného nátoku kapaliny po stěnách Venturiho trubice, kde je poté strhnuta proudem plynu (d).

Proudové odlučovače jsou kompaktní a lze dosáhnout odlučivosti 80-95 % pro částice o rozměru nad 2  $\mu\text{m}$ . Nevýhodami jsou vysoká tlaková ztráta dosahující 5-10 kPa, vysoká spotřeba energie a vysoká měrná spotřeba vody, která se pohybuje v závislosti na tlakové ztrátě v rozmezí 0,7-2,1  $\text{l/m}^3$ . [1] [12]

- 1 – Vstup znečištěného plynu
- 2, 4 – Vstřík chladicí a čistící vody
- 3 – Venturiho trubice
- 5 – Žaluziový odlučovač
- 6 – Vířník
- 7 – Kuželová deska
- 8, 9 – Otvory pro odvod kalu



Obrázek 44 - Proudový odlučovač a  
možnosti přívodu kapaliny do  
Venturiho trubice [1]

## 5 Elektrické odlučovače

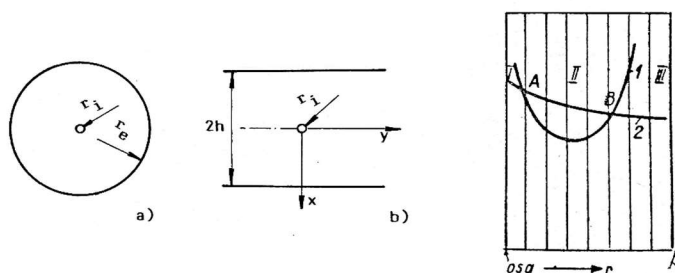
Obecný princip EO spočívá v nárazové ionizaci plynu přivedeného mezi nabíjecí a usazovací elektrodu. Konstrukčně lze EO sestavit jak s kladnou, tak se zápornou nabíjecí elektrodou, nicméně je vhodné jej konstruovat se zápornou z důvodu vyšší stability korony a vyšších elektrických proudů při stejné velikosti napětí bez rizika přeskoků výboje. Ionizace plynu nastává v okamžiku překročení kritické hodnoty intenzity elektrického pole, jejíž hodnota je závislá na stavu plynu a geometrickém uspořádání elektrod. Velikost intenzity elektrického pole je závislá na velikosti stejnosměrného napětí. Ionty plynu se vážou na prachové částice a nabíjí je. Mezi elektrodami vzniká elektrické pole, které působí na nabitě částice a usměrňuje jejich pohyb k usazovací elektrodě. Z usazovací elektrody je nutno pravidelně oklepávat prach, který poté končí ve výsypce. Dle konstrukčního provedení lze elektrostatické odlučovače rozdělit do dvou základních skupin, na deskové (a) a trubkové (b).

Na obrázku níže vpravo si lze všimnout závislosti velikosti elektrické intenzity (křivka 1) a kritické elektrické intenzity pole na velikosti poloměru nabíjecí elektrody  $r$ . V zásadě mohou nastat 3 situace při stejné velikosti stejnosměrného napětí – oblast I, II, III. Při malém poloměru elektrody (oblast I) je elektrické namáhání plynu větší než jeho pevnost ( $E > E_{krit}$ ), tedy nastává stabilní výboj. Mezi body A a B (oblast II) je pevnost plynu větší než jeho namáhání, výboj nenastává. V oblasti III roste od bodu B namáhání plynu, zatímco jeho pevnost se zmenšuje. Výboj je nestabilní a hrozí přeskoky.

Nabíjení částic probíhá dvěma způsoby v závislosti na jejich velikosti. Je nutné si uvědomit, že prachové částice mají řádově větší dielektrickou konstantu než plyn a z toho důvodu je energeticky nejméně náročné, když jdou elektrické siločáry právě skrz tyto částice. Elektrické siločáry jsou trajektorií pro plynné ionty, které je sledují a při styku s částicí ji nabíjí.

Po styku částice s usazovací elektrodou nastávají dvě odlišné situace. V případě vodivého prachu je částice nabitá stejným nábojem jako elektroda, je od ní odpuzována a může dojít k jejímu odtržení do proudícího plynu. Nevodivé částice si ponechávají svůj záporný náboj, díky čemuž odpuzují právě se blíží. Napětí v nevodivé vrstvě může způsobit kladnou koronu plynu v pórech, což vede k neutralizaci záporně nabitých částic, což zásadně zhoršuje odlučivost. K potlačení výše uvedeného je nutné pravidelné oklepávání elektrody, případně vlhčení plynu před vstupem do EO za účelem zvětšení vodivosti.

Pro optimální provoz EO je třeba se co nejvíce přiblížit konstantní rychlosti vstupujícího plynu v celém průřezu. Toho lze docílit vhodným přechodovým kusem mezi potrubím a EO, případně se do výsypky, skrz kterou plyn vstupuje, instaluje ve vícero řadách usměrňovací perforovaný plech. Jako nabíjecí elektrody se běžně používají dráty kruhového průřezu se standardním průměrem 2-2,5 mm. Vyrábí se z různých materiálů v závislosti na vlastnostech prachu, nejčastěji ze železa nebo chromniklové oceli. Usazovací elektrody se v případě trubkového EO konstruují v hexagonálním tvaru. U deskových výměníků je několik různých konstrukcí usazovacích elektrod. Nejjednodušší jsou usazovací elektrody ve tvaru hladkých



Obrázek 45 –

vlevo: základní rozdělení Elektrostatických odlučovačů;

vpravo: závislost výboje na poloměru nabíjecí elektrody

[1] [5]



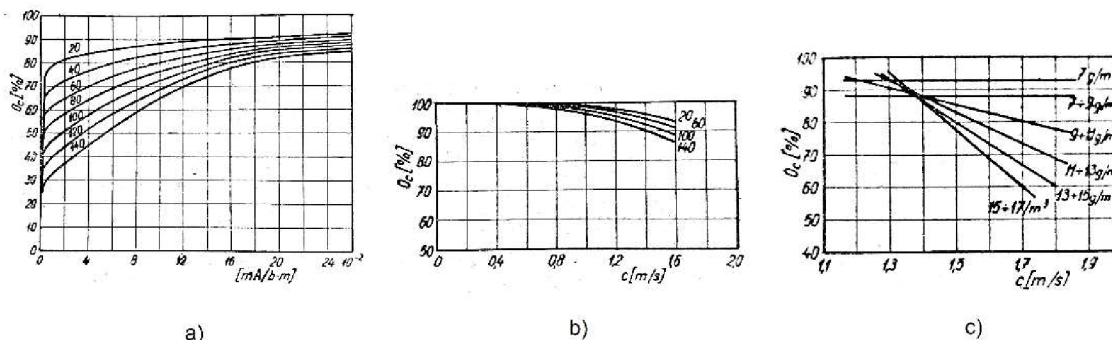
rovinných desek. Výhodou je snadné oklepávání prachu, nicméně při vyšších teplotách hrozí jejich zborcení a plyn má při kontaktu s jejich povrchem vysokou rychlost, což může způsobit zpětné unášení již usazených částic. Nevýhody hladkých desek kompenzují elektrody z vlnitého plechu, kde plyn dosahuje nižších rychlostí a povrch elektrody je větší, což má příznivý vliv na tloušťku prachové vrstvy, nicméně je taktéž nelze použít při vysokých teplotách plynu. Riziko zborcení potlačují provedení usazovacích elektrod ve tvaru drátěného síta se čtvercovými otvory nebo zavěšených železných tyčí. Posledním používaným typem jsou tzv. kapsové usazovací elektrody. Lze si je představit jako nad sebou zavěšené plechy s horním okrajem ohnutým do proudu plynu. Prach při oklepání padá na ohnutý okraj dolejšího plechu, načež putuje do výsypky. Kapsy mohou být také ve formě do desek vylisovaných dutin. Kapsové elektrody jsou vhodné při odlučování hrubšího vodivého prachu.

Odlučivost EO se při optimálním provozu pohybuje v rozmezí 90-99,9 % a její velikost závisí na několika faktorech, a to na: [1] [5]

- Konstrukčním provedení EO a četnosti oklepávání elektrod
- Velikosti přiváděného proudu
- Rychlosti a teplotě plynu v EO a koncentraci, případně vlastnostech prachu

Rychlost proudění plynu by neměla přesáhnout 1,4 m/s, neboť by při vyšší rychlosti docházelo ke strhávání již usazeného prachu. Rychlost proudění plynu může být i vyšší, ovšem pouze u plynu s malou koncentrací prachu ( $<7 \text{ g/m}^3$ ) a při častějším oklepávání. Odlučivost dále klesá s rostoucí teplotou plynu, což se zásadněji projevuje při teplotách nad  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ . Vliv vysoké teploty na odlučivost lze účinně negovat zpomalením plynu v EO. Odlučivost EO úměrně roste se zvyšující se vlhkostí nosného plynu, zvláště při teplotách blízkých se teplotě rosného bodu. Spolu s odlučivostí roste také riziko kondenzace vodních par a s tím související zalepování elektrod prachem, který nelze oklepat, což má za následek značné snížení odlučivosti.

EO vynikají vysokou odlučivostí a jsou schopné vyčistit plyn od částic submikronových velikostí. Na odlučivost nemá vliv velikost částic, oproti tomu závisí na fyzikálních vlastnostech prachu a plynu, přičemž EO nejsou vhodné pro čištění plynů s vysokou koncentrací částic. V trubkových EO lze docílit rovnoměrnějšího rozložení plynu v celém průřezu, tedy je vhodné je použít pro hůře usazované prachy. Nevýhodami jsou horší oklepávání a větší spotřeba el. energie než u deskových EO, které jsou výhodné z hlediska snadnější montáže a oklepávání prachu. EO mají velmi malou tlakovou ztrátu a nízké provozní náklady. Vzhledem k velikosti zařízení a nutné přesnosti vyrobených dílů jsou investičně drahé. [1] [5] [6]



Obrázek 46 – Závislost celkové odlučivosti EO na: a) přiváděném proudu při různých intervalech oklepávání; b) rychlosti plynu při různých intervalech oklepávání; c) rychlosti plynu při rozdílných koncentracích prachu [5]



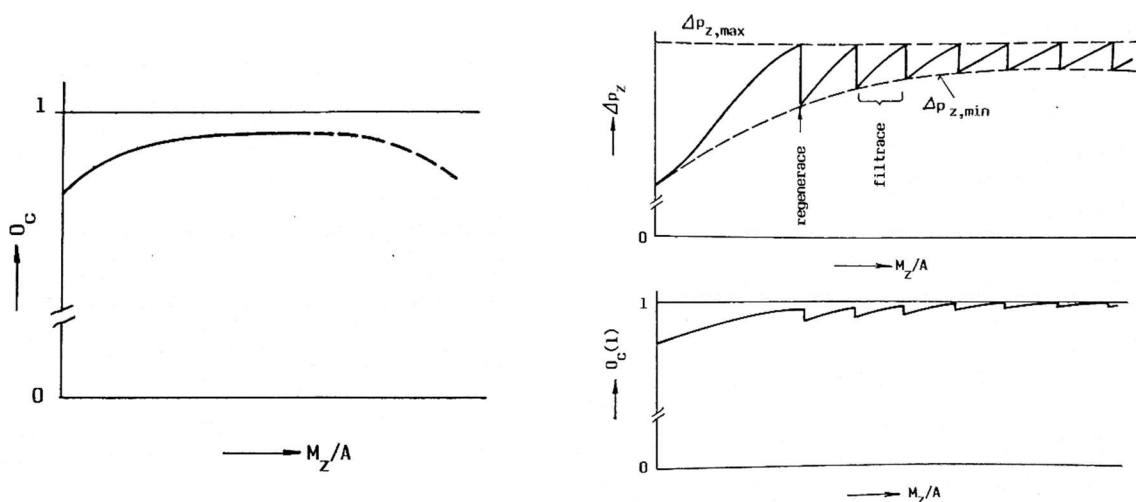
## 6 Filtry

Filtrační zařízení lze dle použití rozdělit do dvou základních oblastí, a na zařízení určená k filtraci atmosférického vzduchu zařízení pro průmyslovou filtraci. Zásadní rozdíl spočívá v rozdílných parametrech plynu a částic, kdy teplota plynu při průmyslové filtraci běžně dosahuje několika set °C a koncentrace prachu, která se u prvně jmenovaných pohybuje řádově v  $\text{mg/m}^3$  plynu, zatímco u průmyslové filtrace se lze bavit o jednotkách  $\text{g/m}^3$ . Vzhledem k zaměření práce se budu dále věnovat pouze filtraci průmyslové, které lze rozdělit dle materiálu filtrační vrstvy následovně: [1]

- S textilními vlákny
  - Hadicové
  - Kapsové
- Se zrnitou vrstvou
- Se slinutou porézní vrstvou

Hadicové a kapsové filtry se regenerují buď zpětným proplachem nebo pulsním profukem, přičemž u hadicových filtrů lze zpětný proplach kombinovat s mechanickým čištěním (kmitání hadic v ose nebo třesením kolmo k ose), případně u hrubých prachů je lze čistit pouze mechanicky.

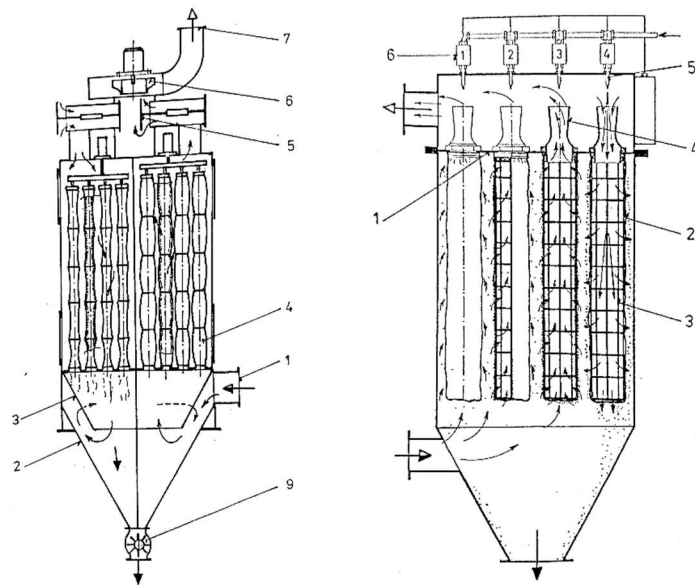
Princip filtrace spočívá v proudění znečištěného plynu přes filtrační vrstvu, která může být různé struktury – vláknitá, zrnitá, porézní, nicméně u průmyslové filtrace dominují vláknité filtry. Vzhledem k vyšší koncentraci prachu v čistěných plynech dochází k rychlému zaplnění čelních pórů a následnému nalepování dalších částic na již zachycené částice – vznik filtračního koláče. Tento jev je příznivý z hlediska odlučivosti do určité meze, kdy je třeba filtrační vrstvu regenerovat, viz obrázek dále. Základní veličiny charakterizující filtrační vrstvu jsou odlučivost a tlaková ztráta. Jejich hodnoty závisí na parametrech plynu a struktuře vrstvy, respektive vlivu jejího zanesení. Odlučivost roste se zvětšující se tloušťkou filtrační vrstvy (a klesajícím průměrem jednotlivých vláken) a s rostoucí hodnotou objemového zaplnění, nicméně spolu s odlučivostí roste úměrně i tlaková ztráta.



Obrázek 47 – vlevo: Závislost celkové odlučivosti na zanesení filtrační vrstvy; vpravo: průběh tlakové ztráty a celkové odlučivosti se zanesením filtrační vrstvy [1]

Při volbě filtrační textilie je třeba posoudit její vhodnost pro čištění plynu. Tedy nutno zhodnotit vlastnosti filtrační vrstvy, které lze shrnout do třech skupin – fyzikálně-chemické, filtrační a chemické. Mezi fyzikálně-chemické vlastnosti patří průměr vláken a materiál z něž je vyroben, poréznost a tloušťka vrstvy, teplotní odolnost<sup>8</sup>, stupeň nehořlavosti, prodyšnost<sup>9</sup>, aj. Filtrační textilie lze vyrobit v široké škále teplotních odolností v závislosti na použitém materiálu. Zatímco vlákna z PVC<sup>10</sup> (bavlny a vlny) je vhodné používat pouze do teploty 50 °C (90 °C), skleněná vlákna jsou tepelně odolná i při 300 °C a kovová vlákna snesou teploty >300 °C. Běžně používanými materiály k výrobě vláken se střední teplotní odolností pohybující se v rozmezí 100-230 °C jsou polymery PAN, POP, PES a aramid<sup>11</sup>. Teplotní odolnost lze zvýšit vpichováním daného vlákna do nosné vrstvy, zpravidla skleněného vlákna. Ke zlepšení regenerace se filtrační vrstva zažehluje, případně se na ni nanáší tenká porézní membrána z teflonu. Odlučivost průmyslové filtrace běžně dosahuje při užití kvalitních vláken hodnot přes 99 % s výstupní hmotnostní koncentrací prachu <1 mg/m<sup>3</sup>. [1]

Hadíkové filtry se konstruují buď v kruhovém nebo řadovém uspořádání. V případě kruhového hadíkového filtru jsou hadice uspořádány v kruhové komoře, jež je rozdělena na několik částí. V případě kruhového hadíkového filtru na obrázku níže vlevo je plyn přiveden bočním otvorem (1) do výsypky, kde je rozveden prostorem mezi pláštěm výsypky (2) a kuželovou vestavbou (3) do jednotlivých sektorů filtru, načež prostupuje hadicí (4) ven. Vyčištěný plyn vystupuje skrz ventil (5) a je ventilátorem (6) odváděn skrz výstupní otvor (7). V režimu regenerace se uzavře výstupní ventil (5) a otevře se regenerační ventil (na obrázku vlevo nad hadicemi). Vzduch následně proudí odlučovačem v opačném směru. Prach je z výsypky kontinuálně odváděn rotačním uzávěrem (9). V případě tentýž filtru v řadovém uspořádání je komora rozdělena do čtvercových nebo obdélníkových sektorů a společná výsypka je žlabového tvaru, kde je prach odváděn šnekovým dopravníkem. Průměr hadic bývá zpravidla v rozmezí 140-250 mm a délka dosahuje až 10 m. Hadíkové filtrační jednotky se zpětným proplachem pracují s tlakovou ztrátou v rozpětí 800-1500 Pa. [1] [5]



Obrázek 48 – vlevo: kruhový hadíkový filtr se zpětným proplachem;  
vpravo: řadový hadíkový filtr s pulsním profukem [1]

<sup>8</sup> Jedná se o teplotu, při které nedochází trvalým působením k podstatným změnám ve vlastnostech filtrační vrstvy.

<sup>9</sup> Vyjadřuje měrný průtok plynu textilií v čistém stavu při dané tlakové ztrátě 200 Pa

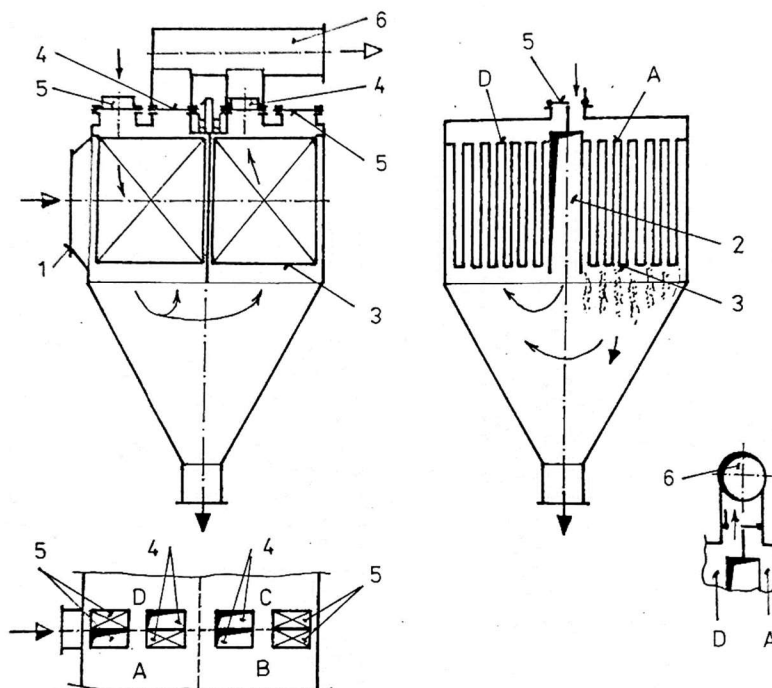
<sup>10</sup> Polyvinylchlorid

<sup>11</sup> POP – polypropylen ~ 90 °C, PAN – polyakrilonitril ~ 135 °C, PES – polyester ~ 150 °C a aramid – aromatický polyamid ~ 230 °C

V případě hadicového filtru s pulsním profukem je dělicí rovina (1) v horní části, v níž jsou na přírubách zavěšeny jednotlivé hadice (2), které jsou zároveň zavěšeny na drátěné kostry. Hlavní rozdíl spočívá v opačném směru probíhající filtrace, a to zvenku dovnitř. Vyčištěný plyn po výstupu z hadic protéká skrz dýzové nástavce (4) umístěné na jejich koncích a odchází výstupním otvorem. Kolmo k výstupnímu průřezu hadic jsou umístěny dýzy (5), kterými je přiveden v krátkých časových intervalech (desetiny sekundy) stlačený vzduch o tlaku cca 0,5 MPa přes solenoidové ventily (6), což vyvolá uvnitř hadice tlakový impuls, který způsobí její regeneraci. Hlavními výhodami pulsní regenerace jsou nižší tlaková ztráta hadic (až o 50 %), neboť je regenerace intenzivnější, a možnost čistit zařízení jako celek nebo po jednotlivých úsecích bez nutnosti odstavení. Hlavní nevýhodou je nižší životnost textilie, neboť je mechanicky více namáhána než při regeneraci se zpětným proplachem.

Alternativou k hadicím jsou kapsové filtry. Běžné provedení spočívá ve čtvercové nebo obdélníkové komoře, která je rozdělena do 4 oblastí, kde je v každé samostatná filtrační textilie ve tvaru hluboké kapsy, které jsou zpevněny výstuhou umístěnou uvnitř. Regenerace může být řešena jak zpětným proplachem, tak pulsním profukem.

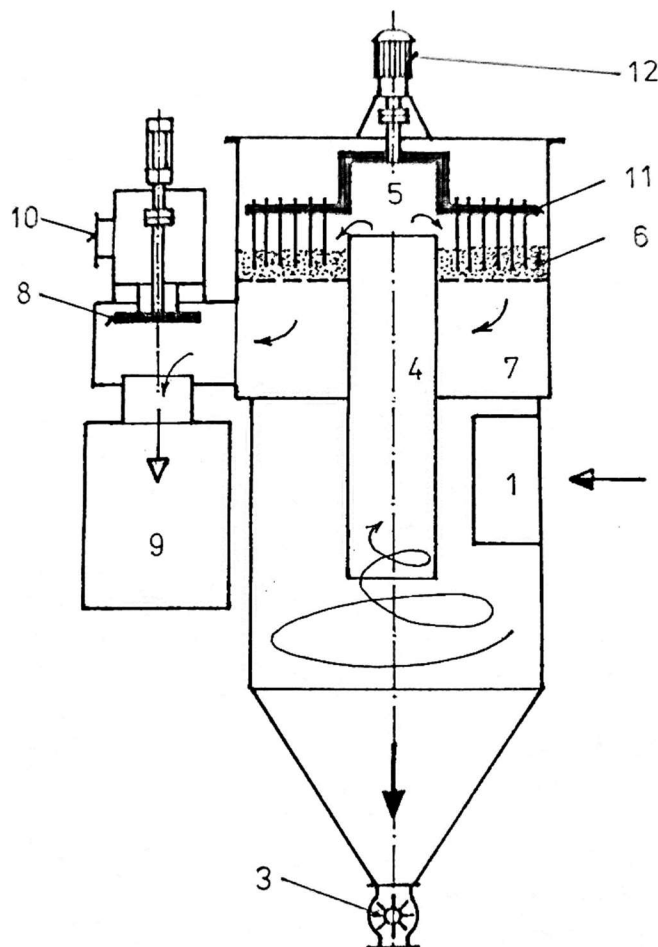
Znečištěný plyn je do odlučovače přiveden bočním vstupem (1), načež je veden skrz boční kanál (2) a prachovou výsypku do jednotlivých komor (A, B, C, D). V každé komoře se kromě kapsy (3) nachází také výstupní (4) a regulační klapka (5). Při čištění plynu jsou otevřeny výstupní klapky a plyn proudí skrz kapsy do společného výstupního potrubí (6). V případě regenerace komory je výstupní klapka uzavřena a otevře se klapka regulační, kudy je přiváděn regenerační vzduch, který se po reverzním průchodu čištěnou kapsou ve výsypce rozdělí mezi ostatní komory. Kapsové filtry lze jednoduše sestavovat do větších celků, tzv. filtračních stanic, se společnou žlabovou výsypkou. Při optimálním provozu dosahují kapsové filtry výstupních koncentrací prachu pod  $1 \text{ mg/m}^3$  při tlakové ztrátě 800-1400 Pa. Lze je provozovat pouze pro vstupní koncentraci prachu do  $100 \text{ g/m}^3$ . Hlavním problémem kapsových filtrů je zajištění absolutního utěsnění okrajů kapes. [1] [5] [6]



Obrázek 49 – Kapsový filtr s regenerací zpětným proplachem;  
komory A, B, C jsou v provozu, komora D je čištěna [1]

Odlučovač se zrnitou vrstvou se běžně provozuje ve dvou stupních odlučování, viz typický zástupce na obrázku níže. Princip spočívá v primární odloučení hrubších částic v cyklónu (2), do kterého plyn vstupuje tečným vstupem (1). Odvod částic z výsypky je zajištěn rotačním podavačem (3). Plyn s jemnější frakcí prachu následně odchází z primární oblasti odlučování výstupní troubou (4), načež vstupuje do sekundárního odlučovacího stupně (5). Plyn se zde již podruhé otáčí o 180 ° a prostupuje zrnitou vrstvou (6), běžně se používá např. písek, který lze použít i při teplotách blížících se 500 °C. Po prostupu zrnitou vrstvou plyn pokračuje meziprostorem (7), prochází přes otevřený ventil (v horní poloze) (8) do výstupního potrubí (9). Při regeneraci je proud plynu opačný. Ventil je v dolní poloze a regeneračním otvorem (10) je přiváděn regenerační vzduch. Ve stejnou chvíli se začne zrnitou vrstvu prohrabávat hrablo (11), které je poháněno elektromotorem (12). Prachové částice jsou unášeny regeneračním vzduchem skrz výstupní troubu cyklónu do výsypky. Tlaková ztráta dvoustupňových odlučovačů se zrnitou vrstvou je obdobná jako u textilních filtrů, v rozmezí 800-1400 Pa. [1]

Pro čištění menších průtoků plynu se využívají filtry ze slinutých porézních vrstev, které bývají potaženy teflonovou membránou pro lepší odlučivost a snadnější regeneraci. Oproti předchozím typům filtrů je zde vyšší počáteční tlaková ztráta, nicméně u porézní vrstvy dochází k odlučování pouze na jejím povrchu, takže nárůst tlakové ztráty vlivem zanášení je mnohem menší než u textilií nebo zrnité vrstvy. Porézní vrstva bývá silná až několik cm a většinou má tvar kruhového průřezu nebo členitých dutých těles. Hlavní výhodou je kompaktnost zařízení. Regenerace je obdobná jako u hadicových filtrů s pulsním profukem. [1]



Obrázek 50 – vlevo: Dvoustupňový odlučovač se zrnitou vrstvou [1]

## 7 Návrhy variant základního cyklónu

Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, k návrhu základních rozměrů cyklónu je vhodné použít některý ze simplexů, tedy definovaných geometrických závislostí na průtoku plynu, s ohledem na požadovaný výkon či odlučivost. Vzhledem k požadované vysoké odlučivosti při nízkém průtoku plynu jsem zvolil tři základní konstrukční provedení cyklónu s tečným obdélníkovým vstupem, které dosahují oproti cyklónům s axiálním vstupem vyšší odlučivosti, dle simplexu Lapple, Stairmand a Swift – oba pro svou deklarovanou vysokou účinnost, načež jsem srovnal hodnoty teoretických frakčních odlučivostí, dle autorů Barth a Lapple, a výše tlakových ztrát, dle autorů Shepperd+Lapple, Casal+Benet a Ramachandran, při stejném průtoku suspenze plynu a prachu.

### 7.1 Charakteristické parametry suspenze

Tabulka 3 – Základní parametry suspenze

Celkový průtok plynu	$\dot{Q}_g$	50,0	$[m_N^3/h]$
		183,21	$[m^3/h]$
Teplota plynu	$T_g$	1073,15	$[K]$
Hustota plynu	$\rho_g$	1,195	$[kg/m_N^3]$
		0,326	$[kg/m^3]$
Dynamická viskozita plynu	$\mu_g$	$1,597 \cdot 10^{-5}$	$[Pa \cdot s]$
Hustota TZL	$\rho_t$	1500	$[kg/m_N^3]$
Vstupní koncentrace TZL	$c_{t,in}$	5	$[g/m_N^3]$
Výstupní koncentrace TZL	$c_{t,out}$	0,05	$[g/m_N^3]$
Požadovaná celková odlučivost	$O_c$	99	$[\%]$
Frakční složení prachu	$[-]$	Chemické složení plynu	$[-]$
$w_{>10 \mu m}$	0,66	$\varphi_{CO}$	0,18
$w_{10-5 \mu m}$	0,12	$\varphi_{CO_2}$	0,20
$w_{5-2,5 \mu m}$	0,07	$\varphi_{CH_4}$	0,04
$w_{2,5-1 \mu m}$	0,12	$\varphi_{H_2}$	0,08
$w_{<1 \mu m}$	0,03	$\varphi_{N_2}$	0,50

#### 7.1.1 Hustota nosného plynu

Nejprve bylo nutné stanovit hustoty jednotlivých složek plynu za normálních podmínek, tedy při teplotě  $T_N = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  a tlaku  $p_N = 101,235 \text{ kPa}$ . [13] Následně byla spočítána výsledná hustota nosného plynu za normálních podmínek a za pomoci upravené stavové rovnice pro teplotu  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$\rho_{CO} = 1,165 \frac{kg}{m^3} \quad \rho_{CH_4} = 0,668 \frac{kg}{m^3} \quad \rho_{N_2} = 1,165 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_{CO_2} = 1,842 \frac{kg}{m^3} \quad \rho_{H_2} = 0,090 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_{g,N} = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot \varphi_i \quad (7.1)$$

$$\rho_{g,N} = \rho_{CO} \cdot \varphi_{CO} + \rho_{CO_2} \cdot \varphi_{CO_2} + \rho_{CH_4} \cdot \varphi_{CH_4} + \rho_{H_2} \cdot \varphi_{H_2} + \rho_{N_2} \cdot \varphi_{N_2}$$

$$\rho_{g,N} = 1,195 \frac{kg}{m_N^3}$$

$$\rho_g = \rho_{g,N} \cdot \frac{T_{g,N}}{T_g} \quad (7.2)$$

$$\rho_g = 1,195 \cdot \frac{293,15}{1073,15} = 0,326 \frac{kg}{m^3}$$

Kde:

$\rho_{g,N}$	- Výsledná hustota plynu při teplotě 20 °C [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_g$	- Výsledná hustota plynu při teplotě 800 °C [kg/m <sup>3</sup> ]
$\varphi_i$	- Objemový zlomek dané složky [-]
$\rho_i$	- Hustota dané složky [kg/m <sup>3</sup> ]

### 7.1.2 Dynamická viskozita plynu

Další společná část výpočtu spočívá ve stanovení výsledné dynamické viskozity plynu. Nejprve jsem stanovil dynamické viskozity jednotlivých složek a poté spočítal výslednou hodnotu pro směs, totožně jako při výpočtu hustoty. [14] [15] [16]

$$\mu_{CO} = 4,216 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$$

$$\mu_{H_2} = 1,953 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$$

$$\mu_{CO_2} = 4,210 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$$

$$\mu_{N_2} = 4,177 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$$

$$\mu_{CH_4} = 2,746 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$$

$$\mu_g = \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot \mu_i \quad (7.3)$$

$$\mu_g = \mu_{CO} \cdot \varphi_{CO} + \mu_{CO_2} \cdot \varphi_{CO_2} + \mu_{CH_4} \cdot \varphi_{CH_4} + \mu_{H_2} \cdot \varphi_{H_2} + \mu_{N_2} \cdot \varphi_{N_2}$$

$$\mu_g = 3,955 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$$

Kde:

$\mu_g$	- Výsledná dynamická viskozita plynu [Pa·s]
$\varphi_i$	- Objemový zlomek dané složky [-]
$\mu_i$	- Dynamická viskozita dané složky [Pa·s]

### 7.2 Teoretická frakční odlučivost

Pro výpočet teoretické frakční odlučivosti byly zvoleny dva výpočtové modely, a to Barthův a Lappleho. Původně jsem počítal i s modelem od autorů Leith a Licht, ten se nicméně

ukázal jako nevhodný pro malé cyklóny při frakčních odlučivostech pro částice o velikosti menší než 5  $\mu\text{m}$ . [10]

### 7.2.1 Barthův model

Stanovení frakční odlučivosti dle Barthova modelu je založeno na vztahu mezi koncovými rychlostmi částic o daném průměru, pro který je počítána frakční odlučivost, a částic o kritické velikosti. [12]

$$O_{f,(i)} = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{v_{ts}}{v_{ts,m}}\right)^{-3,2}\right)} \quad (7.4)$$

Kde:

$O_{f,(i)}$	- Frakční odlučivost [-]
$v_{ts}$	- Koncová rychlost částic dané frakce [m/s]
$v_{ts,m}$	- Koncová rychlost částic s 50% odlučivostí [m/s]

Poměr rychlostí  $\frac{v_{ts}}{v_{ts,m}}$  může být vztažen ke střední radiální rychlosti rotujícího plynu v axiální ose cyklónu s maximální tečnou rychlostí. Za předpokladu konstantní hustoty plynu lze psát:

$$\frac{v_{ts}}{v_{ts,m}} = \frac{\pi \cdot h_m \cdot \rho_t \cdot v_{t,max}^2 \cdot D_i^2}{9 \cdot \mu_g \cdot \dot{Q}_g} \quad (7.5)$$

Kde:

$h_m$	- Výška střední osy cyklónu [m]
$\rho_t$	- Hustota částic [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$v_{t,max}$	- Maximální tečná rychlost [m/s]
$D_i$	- Charakteristický rozměr částice [m]
$\mu_g$	- Dynamická viskozita plynu [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ]
$\dot{Q}_g$	- Průtok plynu [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

Výška střední osy cyklónu závisí na rozměru cyklónu a hloubce zapuštění výstupní trouby. V závislosti na poměru průměrů výstupní trouby a ústí do prachové výsypky ji lze stanovit z následujících rovnic:

$$D_e \leq B \rightarrow h_m = (H - S) \quad (7.6)$$

$$D_e > B \rightarrow h_m = \frac{(H - h) \cdot (D_c - D_e)}{(D_c - B)} + (h - S) \quad (7.7)$$

Barth definoval odhad velikosti maximální tečné složky rychlosti v cyklónu následovně:

$$v_{t,max} = v_{out} \cdot \frac{\left(\frac{D_e}{2}\right) \cdot (D_c - b) \cdot \pi}{2 \cdot a \cdot b \cdot \alpha + h_m \cdot (D_c - b) \cdot \pi \cdot \lambda} \quad (7.8)$$

Kde:

$v_{out}$	- Výstupní rychlost plynu z cyklónu [m/s]
$D_e$	- Průměr výstupní trouby cyklónu [m]
$D_c$	- Průměr cyklónu [m]
$a, b$	- Charakteristické rozměry vstupní části [m]
$\alpha$	- Rozměrový parametr [-]
$\lambda$	- Koeficient tření <sup>12</sup> [-]

Hodnota rozměrového parametru závisí na poměru rozměru vstupní části  $b$  a průměru cyklónu  $D_c$  následovně:

$$\alpha = 1 - 1,2 \cdot \left(\frac{b}{D_c}\right) \quad (7.9)$$

### 7.2.2 Lappleho model

Výpočet teoretické účinnosti dle Lappleho byl definován již v 50. letech minulého století, což jej řadí mezi jeden z nejstarších. Lze ji spočítat následovně: [17]

$$O_{f,(i)} = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{D_{50}}{D_i}\right)^2\right)} \quad (7.10)$$

Kde:

$O_{f,(i)}$	- Frakční odlučivost [-]
$D_{50}$	- Kritická velikost částic [m]
$D_i$	- Velikost částic dané frakce [m]

Kritickou velikost částic lze stanovit:

$$D_{50} = \sqrt{\frac{9 \cdot \mu_g \cdot b}{2 \cdot \pi \cdot \rho_t \cdot N \cdot v_{out}}} \quad (7.11)$$

Kde:

$\mu_g$	- Dynamická viskozita plynu [Pa·s]
$b$	- Charakteristický rozměr vstupní části [m]
$\rho_t$	- Hustota částic [kg/m <sup>3</sup> ]
$N$	- Počet obrátek plynu uvnitř cyklónu [-]
$v_{out}$	- Výstupní rychlost plynu z cyklónu [m/s]

Počet obrátek proudících částic uvnitř cyklónu je závislý na geometrických rozměrech válcové a kuželové části cyklónu. Princip určení počtu obrátek dle Lappleho je vhodný pro 1D2D

<sup>12</sup> Zpravidla se volí hodnota 0,02



cyklóny, nicméně pro 2D2D a 1D3D cyklóny je dost nepřesný. Pro výpočet byly použity empirické vztahy vzešlé ze studie z roku 2006. Lze jej spočítat z následujících rovnic: [18]

- Počet obrátek ve válcové části:

$$N_1 = \frac{L_1}{\pi \cdot D_c} \quad (7.12)$$

Kde:

- $N_1$  - Počet obrátek ve válcové části cyklónu [-]
- $L_1$  - Empiricky stanovená trajektorie ve válcové části [m]
- $D_c$  - Průměr cyklónu [m]

- Počet obrátek v kuželové části:

$$N_2 = \frac{L_2}{\pi \cdot \frac{D_c + D_e}{2}} \quad (7.13)$$

Kde:

- $N_2$  - Počet obrátek v kuželové části cyklónu [-]
- $L_2$  - Empiricky stanovená trajektorie v kuželové části [m]
- $D_c$  - Průměr cyklónu [m]
- $D_e$  - Průměr výstupní trouby [m]

- Výsledný počet obrátek:

$$N = N_1 + N_2 \quad (7.14)$$

Tabulka 4 - Numericky stanovené trajektorie pro různé modely cyklónu [18]

1D2D	1D3D	2D2D
$L_1 = 1,26 \cdot \pi \cdot h$	$L_1 = 1,53 \cdot \pi \cdot h$	$L_1 = 1,53 \cdot \pi \cdot h$
$L_2 = 2,565 \cdot D_c$	$L_2 = 10,83 \cdot D_c$	$L_2 = 7,22 \cdot D_c$

### 7.3 Teoretická celková odlučivost

Celkovou odlučivost lze stanovit ze zjištěných frakčních odlučivostí a frakčního složení prachu, viz níže:

$$O_c = \sum_{i=1}^n O_{f,(i)} \cdot w_i \quad (7.15)$$

### 7.4 Závislost odlučivosti na počtu sériově zapojených cyklónů Swift

Přibližnou frakční odlučivost sériově zapojených cyklónů lze spočítat z následujícího vztahu: [8]

$$O_{f,n,(i)} = 1 - (1 - O_{f,(i)})^n \quad (7.16)$$

Kde:

- $O_{f,n,(i)}$  - Frakční odlučivost n sériově zapojených cyklónů [-]
- $O_{f,(i)}$  - Frakční odlučivost 1 cyklónu [-]
- $n$  - Počet zapojených cyklónů [-]

## 7.5 Tlaková ztráta

Tlaková ztráta cyklónu je závislá na hustotě, rychlosti proudícího plynu a geometrickém parametru. Lze ji spočítat z následující rovnice: [12]

$$\Delta p_z = \frac{\rho_g \cdot v_{in}^2}{2} \cdot \Delta H \quad (7.17)$$

Kde:

- $\rho_g$  - Hustota plynu [kg/m<sup>3</sup>]
- $v_{in}$  - Vstupní rychlost plynu do cyklónu [m/s]
- $\Delta H$  - Geometrický parametr [-]

Vstupní rychlost ideálního plynu lze spočítat z rovnice kontinuity toku, viz:

$$\dot{Q}_g = S \cdot v = konst \quad (7.18)$$

$$S_{in} \cdot v_{in} = S_{out} \cdot v_{out}$$

$$v_{in} = \frac{S_{out} \cdot v_{out}}{S_{in}} = \frac{\frac{\pi \cdot D_e^2}{4} \cdot v_{out}}{a \cdot b}$$

Geometrický parametr  $\Delta H$  lze spočítat dle tří různých autorů následovně: [12]

- Shepperd a Lapple

$$\Delta H = 16 \cdot \left(\frac{a \cdot b}{D_e^2}\right) \quad (7.19)$$

- Casal a Benet

$$\Delta H = 11,3 \cdot \left(\frac{a \cdot b}{D_e^2}\right)^2 + 3,33 \quad (7.20)$$

- Ramachandran

$$\Delta H = 20 \cdot \left(\frac{a \cdot b}{D_e^2}\right) \cdot \sqrt[3]{\frac{\frac{S}{D_c}}{\frac{H}{D_c} \cdot \frac{h}{D_c} \cdot \frac{B}{D_c}}} \quad (7.21)$$

V případě sériově řazených odlučovačů lze výslednou tlakovou ztrátu spočítat jako: [5]

$$\Delta p_z = \sum_{i=1}^n \Delta p_i \quad (7.22)$$

Kde:

$\Delta p_i$  - Tlaková ztráta jednotlivých cyklónů [Pa]

### 7.6 Návrh cyklónu dle simplexu Lapple

$$\frac{\dot{Q}_g}{D_c^2} = 6860 \rightarrow D_c = \sqrt{\frac{\dot{Q}_g}{6860}} = 163,0 \text{ mm} \quad (7.23)$$

$$\frac{a}{D_c} = 0,500 \rightarrow a = D_c \cdot 0,500 = 82,0 \text{ mm} \quad (7.24)$$

$$\frac{b}{D_c} = 0,250 \rightarrow b = D_c \cdot 0,250 = 41,0 \text{ mm} \quad (7.25)$$

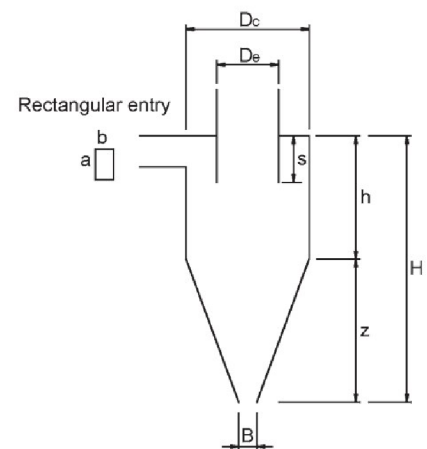
$$\frac{H}{D_c} = 4,000 \rightarrow H = D_c \cdot 4,000 = 654,0 \text{ mm} \quad (7.26)$$

$$\frac{h}{D_c} = 2,000 \rightarrow h = D_c \cdot 2,000 = 327,0 \text{ mm} \quad (7.27)$$

$$\frac{D_e}{D_c} = 0,500 \rightarrow D_e = D_c \cdot 0,500 = 82,0 \text{ mm} \quad (7.28)$$

$$\frac{B}{D_c} = 0,250 \rightarrow B = D_c \cdot 0,250 = 41,0 \text{ mm} \quad (7.29)$$

$$\frac{S}{D_c} = 0,625 \rightarrow S = D_c \cdot 0,625 = 102,0 \text{ mm} \quad (7.30)$$



Obrázek 51 – Základní rozměry cyklónu Lapple [12]

### 7.7 Návrh cyklónu dle simplexu Stairmand

$$\frac{\dot{Q}_g}{D_c^2} = 5500 \rightarrow D_c = \sqrt{\frac{\dot{Q}_g}{5500}} = 183,0 \text{ mm} \quad (7.31)$$

$$\frac{a}{D_c} = 0,500 \rightarrow a = D_c \cdot 0,500 = 91,0 \text{ mm} \quad (7.32)$$

$$\frac{b}{D_c} = 0,200 \rightarrow b = D_c \cdot 0,200 = 37,0 \text{ mm} \quad (7.33)$$

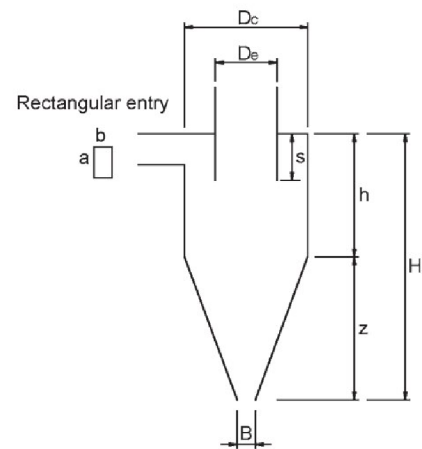
$$\frac{H}{D_c} = 4,000 \rightarrow H = D_c \cdot 4,000 = 730,0 \text{ mm} \quad (7.34)$$

$$\frac{h}{D_c} = 1,500 \rightarrow h = D_c \cdot 1,500 = 274,0 \text{ mm} \quad (7.35)$$

$$\frac{D_e}{D_c} = 0,500 \rightarrow D_e = D_c \cdot 0,500 = 91,0 \text{ mm} \quad (7.36)$$

$$\frac{B}{D_c} = 0,375 \rightarrow B = D_c \cdot 0,375 = 68,0 \text{ mm} \quad (7.37)$$

$$\frac{S}{D_c} = 0,500 \rightarrow S = D_c \cdot 0,500 = 91,0 \text{ mm} \quad (7.38)$$



Obrázek 52 – Základní rozměry cyklónu Stairmand [12]

### 7.8 Návrh cyklónu dle simplexu Swift

$$\frac{\dot{Q}_g}{D_c^2} = 4940 \rightarrow D_c = \sqrt{\frac{\dot{Q}_g}{4940}} = 193,0 \text{ mm} \quad (7.39)$$

$$\frac{a}{D_c} = 0,440 \rightarrow a = D_c \cdot 0,440 = 85,0 \text{ mm} \quad (7.40)$$

$$\frac{b}{D_c} = 0,210 \rightarrow b = D_c \cdot 0,210 = 40,0 \text{ mm} \quad (7.41)$$

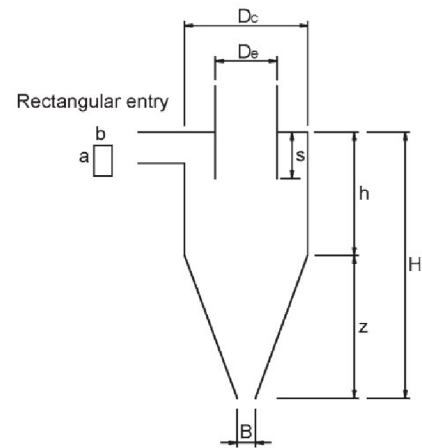
$$\frac{H}{D_c} = 3,900 \rightarrow H = D_c \cdot 3,900 = 751,0 \text{ mm} \quad (7.42)$$

$$\frac{h}{D_c} = 1,400 \rightarrow h = D_c \cdot 1,400 = 270,0 \text{ mm} \quad (7.43)$$

$$\frac{D_e}{D_c} = 0,400 \rightarrow D_e = D_c \cdot 0,400 = 77,0 \text{ mm} \quad (7.44)$$

$$\frac{B}{D_c} = 0,400 \rightarrow B = D_c \cdot 0,400 = 77,0 \text{ mm} \quad (7.45)$$

$$\frac{S}{D_c} = 0,500 \rightarrow S = D_c \cdot 0,500 = 96,0 \text{ mm} \quad (7.46)$$



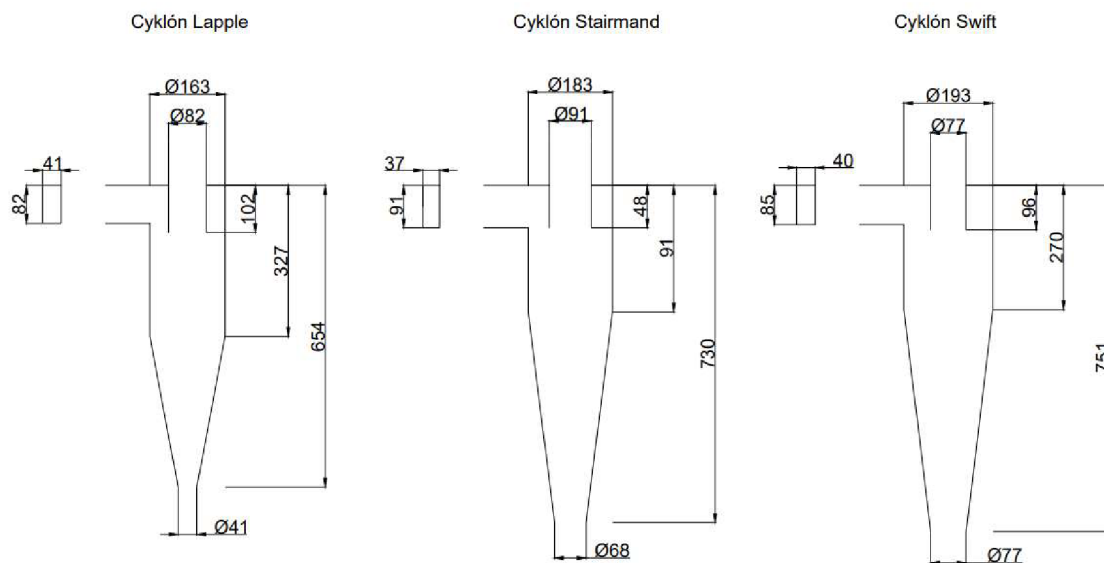
Obrázek 53 – Základní rozměry cyklónu Swift [12]

## 7.9 Zhodnocení základních variant cyklónů

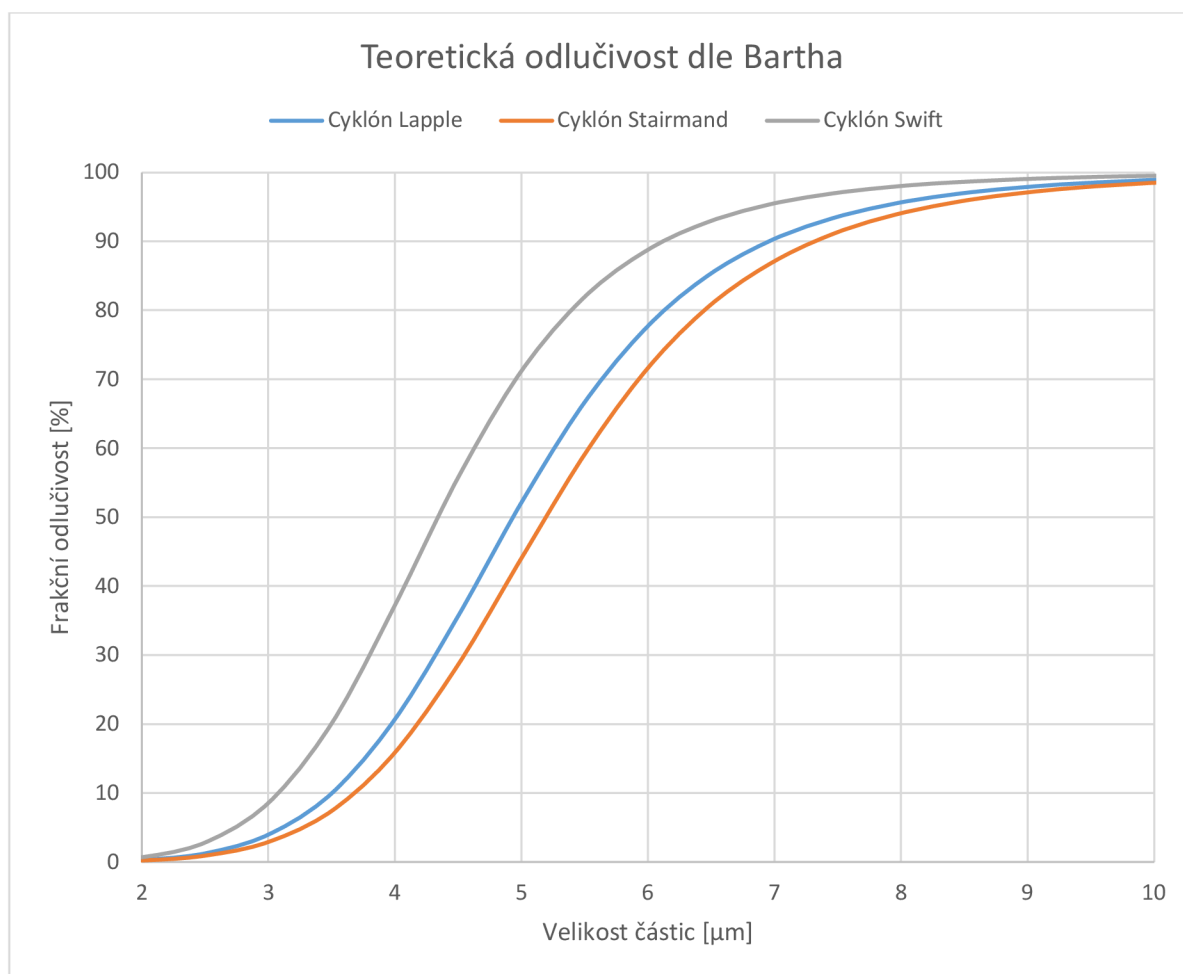
Tabulka 5 – Návrhy základních variant cyklónů

Rozměry cyklónu:	Lapple		Stairmand		Swift		
$D_c$	163,0		183,0		193,0		[mm]
$a$	82,0		91,0		85,0		
$b$	41,0		37,0		40,0		
$H$	654,0		730,0		751,0		
$h$	327,0		274,0		270,0		
$D_e$	82,0		91,0		77,0		
$B$	41,0		68,0		77,0		
$S$	102,0		91,0		96,0		
Průtok plynu $\dot{Q}_g$	183,21		183,21		183,21		[m <sup>3</sup> /h]
Vstupní rychlost $v_{in}$	15,2		15,3		14,9		[m/s]
Výstupní rychlost $v_{out}$	9,7		7,8		10,9		
Max. tečná rychlost $v_{t,max}$	18,9		16,1		17,7		
Frakční odlučivosti:	Barth	Lapple	Barth	Lapple	Barth	Lapple	[%]
$O_f(PM_{20})$	99,99	96,80	99,98	96,83	100,00	98,13	
$O_f(PM_{10})$	98,92	88,32	98,52	88,42	99,94	92,93	
$O_f(PM_{5,0})$	52,13	65,41	44,07	65,62	95,18	76,68	
$O_f(PM_{2,5})$	1,27	32,10	0,92	32,31	18,96	45,11	
$O_f(PM_{1,0})$	0,00	7,03	0,00	7,09	0,07	11,62	
$O_f(PM_{0,5})$	0,00	1,86	0,00	1,87	0,00	3,18	
Celková odlučivost $O_c$	77,76	77,38	77,02	77,47	79,48	76,48	[%]
Tlaková ztráta:							[Pa]
Shepperd a Lapple	$\Delta p_z$	303,3	243,7	332,5			
Casal a Benet		133,0	131,1	123,3			
Ramachandran		257,3	184,5	254,2			
Výška střední osy $h_m$		443	548	655			
Rozměrový parametr $\alpha$	0,70	0,76	0,75			[-]	
Krit. velikost částic $D_{50}$	3,64	3,62	3,82			[ $\mu$ m]	
Počet obrátek v cyklónu $N$	7,7	6,9	7,1			[-]	

Cyklóny dosáhly celkové odlučivosti přes 76 %, a to při obdobné tlakové ztrátě pohybuji se v rozmezí 123-332 Pa v závislosti na modelu výpočtu. Všechny 3 typy dosahují přibližně totožných výsledků, což je způsobeno podobnou geometrií, jak si lze všimnout z obrázku č. 54. Zatímco s využitím modelu výpočtu odlučivosti dle Bartha dosáhl nejvyšší hodnoty cyklón Swift, a to 79,48 %, při stanovení odlučivosti dle Lappleho dosáhl nejvyšší hodnoty cyklón Stairmand, a to 77,47 %. Odlučivosti jsou znázorněny na obrázku č. 55. Odlučivost je možné dále zvýšit konstrukčními zásahy, nicméně za cenu úměrně se zvyšující tlakové ztráty. Vzhledem k nejvyšší odlučivosti dle Bartha, jehož model považuji za přesnější, byl pro další postup zvolen cyklón Swift, jehož rozměry budou optimalizovány pro získání vyšší odlučivosti. Již nyní lze ovšem podotknout, že i po konstrukčních úpravách cyklónu Swift nebude možné při užití jednoho cyklónu splnit požadovanou odlučivost. Pro přiblížení se požadované koncentraci prachu ve vyčištěném plynu bude nutné vést znečištěný plyn optimalizovaným cyklónem vícekrát, tedy zapojit několik totožných cyklónů skupinově do série či cyklón zmenšit a zapojit více buněk paralelně, případně zapojit do série několik paralelně uspořádaných odlučovačů.



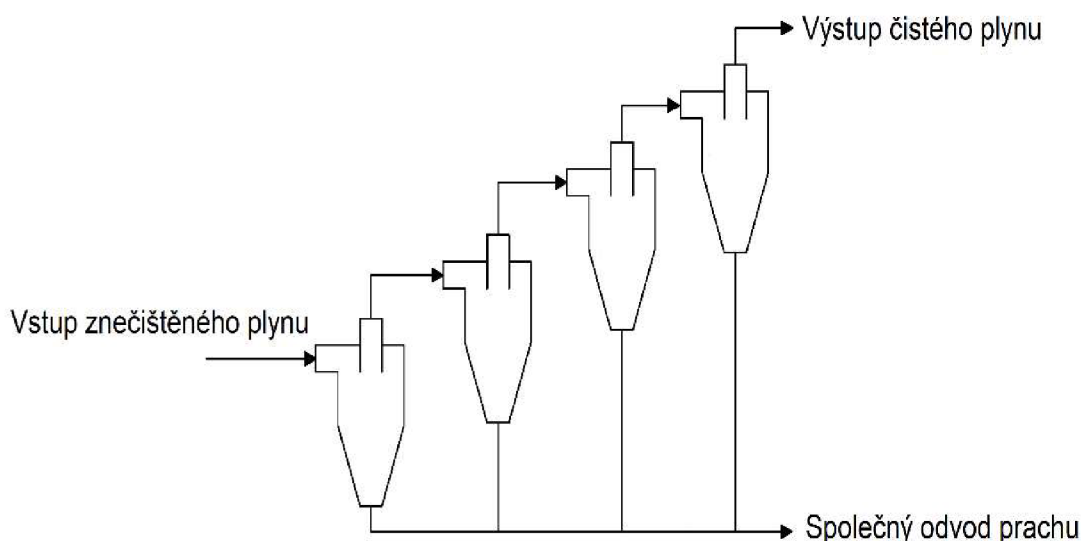
Obrázek 54 – Geometrická podobnost cyklónů pro daný průtok dle simplexů



Obrázek 55 – Teoretická odlučivost jednotlivých variant cyklónů dle Bartha

## 8 Sériově zapojený cyklonový odlučovač Swift

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, samostatně pracující cyklón Swift o průměru 193 mm je schopen dosáhnout teoretické odlučivosti 79,48 % dle Bartha při daném frakčním složení prachu. Zmenšením rozměrů vstupního průřezu, výstupní trouby a průřezu pro odvod prachu došlo ke zvýšení teoretické odlučivosti o 5,5 % dle Bartha a takřka o 4,7 % dle Lappleho, ovšem za cenu více než takřka trojnásobného zvýšení tlakové ztráty, viz tabulka níže. Změnou konstrukce dojde ke zvýšení charakteristických rychlostí, tedy vstupní, výstupní i maximální tečné. Dále dojde ke zvýšení počtu obrátek v cyklónu a ke zmenšení kritické velikosti částic na 2,90  $\mu\text{m}$ .



Obrázek 56 – Schéma sériového zapojení cyklonového odlučovače [19]

Tabulka 6 – Vliv úpravy geometrie cyklónu Swift na jeho odlučivost

Rozměry cyklónu:	Swift - upravený	Swift - původní	
$D_c$	193,0	193,0	[mm]
$a$	57,0	85,0	
$b$	38,0	40,0	
$H$	751,0	751,0	
$h$	270,0	270,0	
$D_e$	57,0	77,0	
$B$	57,0	77,0	
$S$	96,0	96,0	
Průtok plynu $\dot{Q}_g$	183,21	183,21	[m <sup>3</sup> /h]
Vstupní rychlost $v_{in}$	23,2	14,9	[m/s]
Výstupní rychlost $v_{out}$	19,8	10,9	
Max. tečná rychlost $v_{t,max}$	28,2	17,7	

Frakční odlučivosti:		Barth	Lapple	Barth	Lapple	
	$O_f(PM_{20})$	100,00	97,94	100,00	98,13	[%]
	$O_f(PM_{10})$	99,98	92,26	99,94	92,93	
	$O_f(PM_{5,0})$	98,03	74,87	95,18	76,68	
	$O_f(PM_{2,5})$	37,08	42,68	18,96	45,11	
	$O_f(PM_{1,0})$	0,17	10,65	0,07	11,62	
	$O_f(PM_{0,5})$	0,00	2,89	0,00	3,18	
Celková odlučivost	$O_c$	85,01	81,16	79,48	76,48	[%]
Tlaková ztráta:						[Pa]
	Shepperd a Lapple	$\Delta p_z$	933,4	332,5		
	Casal a Benet		294,4	123,3		
	Ramachandran		787,3	254,2		
	Výška střední osy $h_m$		655	655	[mm]	
	Rozměrový parametr $\alpha$	0,76	0,75	[-]		
	Krit. velikost částic $D_{50}$	2,90	3,82	[ $\mu\text{m}$ ]		
	Počet obrátek v cyklónu $N$	7,5	7,1	[-]		

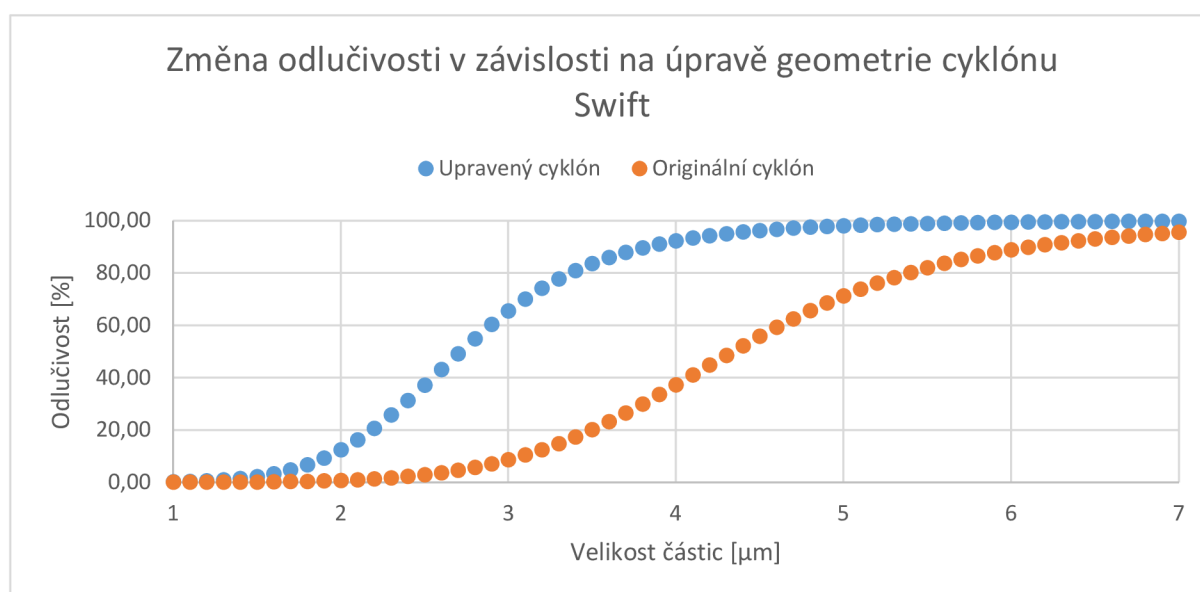
Konstrukční úpravou výše uvedených rozměrů cyklónu Swift dojde ke změně simplexů pro výpočet výšky a šířky vstupního průřezu, průměru výstupní trouby a průměru vrcholové části komolého kužele. Níže jsou uvedeny nové hodnoty daných simplexů:

$$\frac{a}{D_c} = 0,298 \quad (8.1)$$

$$\frac{b}{D_c} = 0,199 \quad (8.2)$$

$$\frac{D_e}{D_c} = 0,298 \quad (8.3)$$

$$\frac{B}{D_c} = 0,298 \quad (8.4)$$



Obrázek 57 – Vliv změny geometrie na odlučivost cyklónu Swift

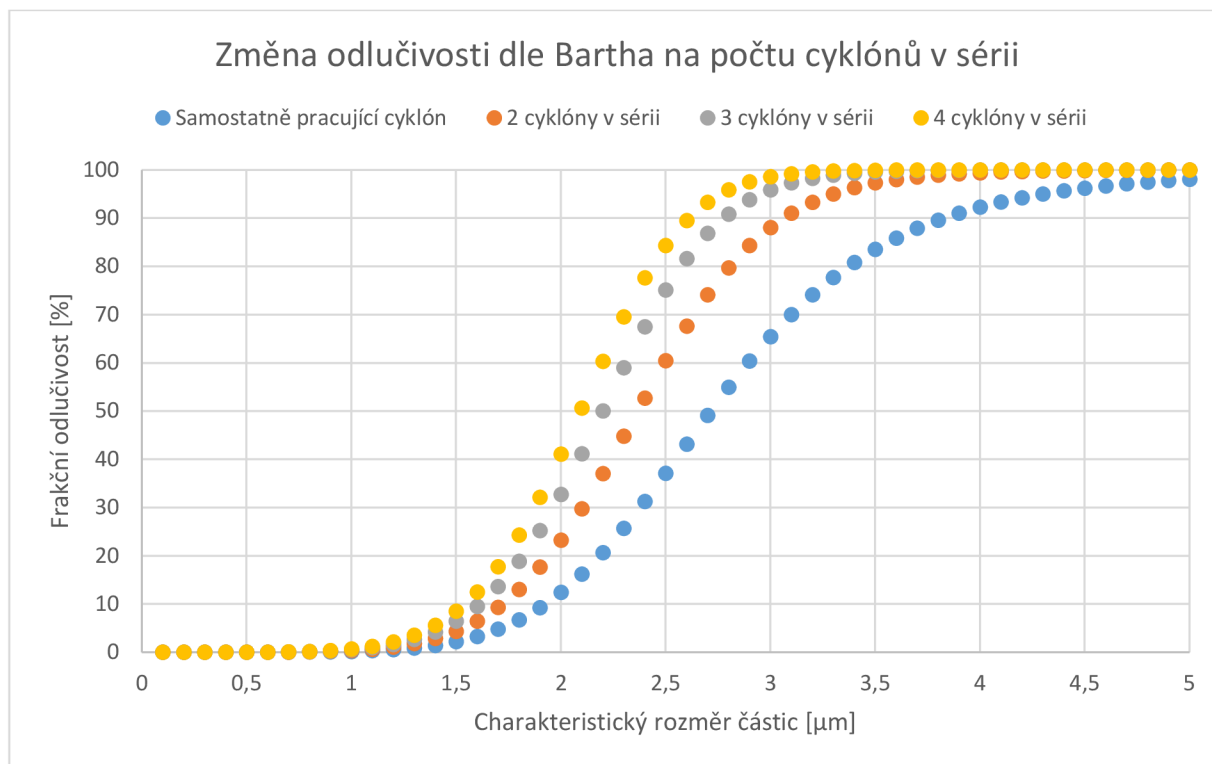


Tabulka 7 – Změna odlučivosti cyklónu Swift při sériovém zapojení

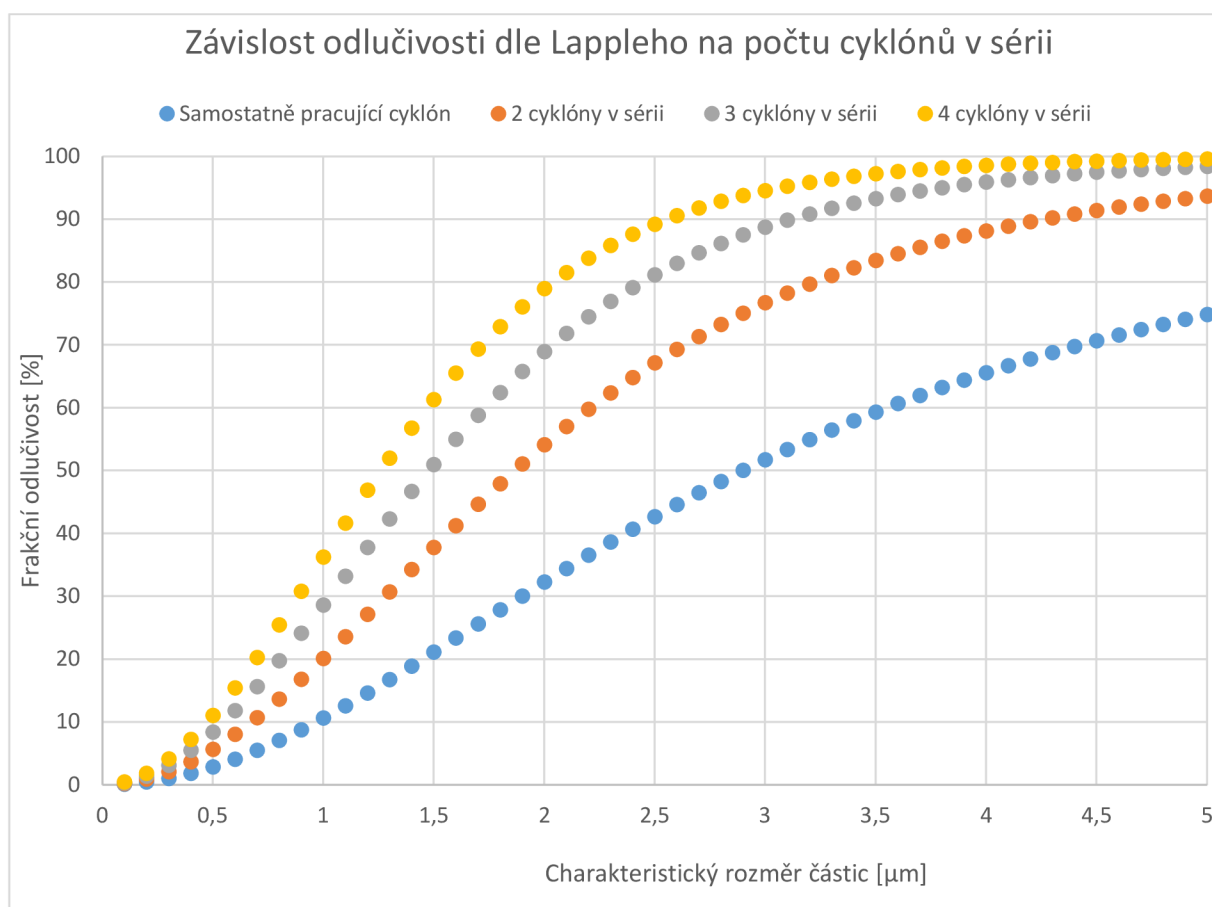
Swift									
Počet cyklónů:	1		2		3		4		
Model výpočtu: <sup>13</sup>	B	L	B	L	B	L	B	L	
Frakční odlučivosti:	[%]		[%]		[%]		[%]		
$O_f(PM_{20})$	100,00	97,94	100,00	99,96	100,00	100,00	100,00	100,00	
$O_f(PM_{10})$	99,98	92,26	100,00	99,40	100,00	99,95	100,00	100,00	
$O_f(PM_{5,0})$	98,03	74,87	99,96	93,68	100,00	98,41	100,00	99,60	
$O_f(PM_{2,5})$	37,08	42,68	60,42	67,15	75,10	81,17	84,33	89,21	
$O_f(PM_{1,0})$	0,17	10,65	0,33	20,16	0,50	28,66	0,67	36,25	
$O_f(PM_{0,5})$	0,00	2,89	0,00	5,70	0,01	8,43	0,01	11,08	
Celková odlučivost:	[%]		[%]		[%]		[%]		
$O_c$	85,01	81,16	87,01	88,98	88,10	91,56	88,84	93,04	
Tlaková ztráta:	[Pa]		[Pa]		[Pa]		[Pa]		
Shepperd a Lapple	$\Delta p_z$		933,4		1866,8		2800,2		3733,6
Casal a Benet			294,4		588,8		883,2		1177,6
Ramachandran			787,3		1574,6		2361,9		3149,2

Z dosažených výsledků lze konstatovat, že maximální odlučivosti lze dosáhnout při zapojení 4 upravených cyklónů Swift do série, dle Bartha 88,8 % a dle Lappleho 93 %. Tlaková ztráta se pohybuje v rozmezí 1177-3733 Pa, nicméně s hodnotou 3149 Pa dle Ramachandrana, která je považována za nejpresnější. Při zapojení druhého cyklónu vzroste odlučivost o 2 % dle Bartha a 7,8 % dle Lappleho, třetího cyklónu o 1 % dle Bartha a 2,5 % dle Lappleho. Při zapojení čtvrtého cyklónu již pouze o 0,7-1,5 %. Vždy je třeba zvážit, nakolik je účelné tímto způsobem zvyšovat odlučivost s ohledem na rostoucí tlakovou ztrátu. V praxi se běžně více než 3 cyklonové odlučovače do série nezapojují. [8] Výše uvedené lze pozorovat v grafech na následující straně. Při sériovém zapojení nelze dosáhnout požadované koncentrace částic na výstupu z odlučovače, respektive požadované odlučivosti 99 % při jejím stanovení dle Bartha a Lappleho. Nutno ovšem podotknout, že v disertační práci z roku 2004 bylo prokázáno, že teoretická odlučivost dle Lappleho byla u cyklónů 1D3D nižší než skutečně naměřená odlučivost, a to o takřka 12 %. [20] Otázkou je, nakolik je zjištění odpovídající i u cyklónu Swift, neboť původní i upravená verze je v poměru 1,4D2,5D<sup>14</sup>. Pro přesné stanovení odlučivosti by bylo nutné experimentálně ověřit teoreticky stanovené hodnoty.

<sup>13</sup> B – počítáno modelem dle Bartha a L – počítáno modelem dle Lappleho<sup>14</sup> Značí poměr průměru cyklónu ku délce válcové a kuželové části. (1D3D např říká, že výška válcové části je stejná jako průměr cyklónu a výška kuželové části je trojnásobná ku průměru.



Obrázek 58 – Závislost teoretické odlučivosti dle Bartha na počtu cyklónů Swift v sérii



Obrázek 59 – Závislost teoretické odlučivosti dle Lappleho na počtu cyklónů Swift v sérii

## 9 Paralelně zapojený cyklonový odlučovač Swift

V následující kapitole byla navržena zmenšená upravená verze cyklónu Swift. Pro požadovaný celkový průtok  $50 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$  bylo paralelně zapojeno 10 buněk o průměru 60,9 mm, každá pro průtok  $5 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$ . Další zmenšení již není na místě, neboť by byly buňky těžko výrobitelné.

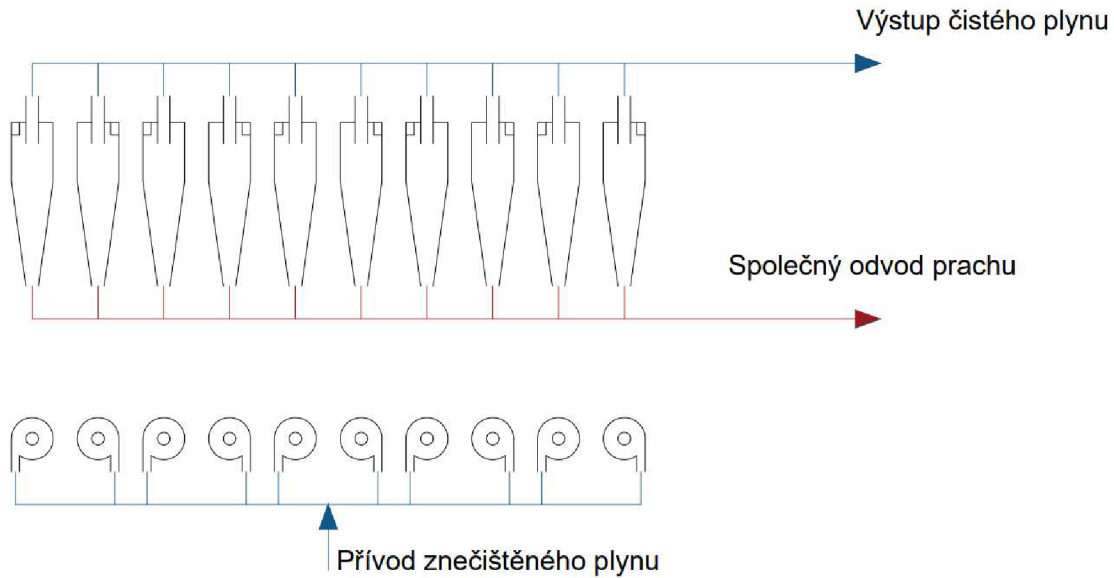
Cyklóny byly navrženy nejprve dle simplexu Swift a poté byly rozměry upraveny vzhledem k vyšší odlučivosti. Došlo ke zmenšení vstupního průřezu plynu, průřezu výstupní trouby a průřezu pro odvod prachu. Poměrná změna rozměrů je totožná jako při návrhu cyklónu Swift o průměru 193 mm, tedy jedná se o geometricky stejný cyklón, pouze navržen pro nižší průtok ale při zachování konstrukčních simplexů.

Tabulka 8 – Provozní parametry a rozměry cyklónu Swift pro paralelní zapojení

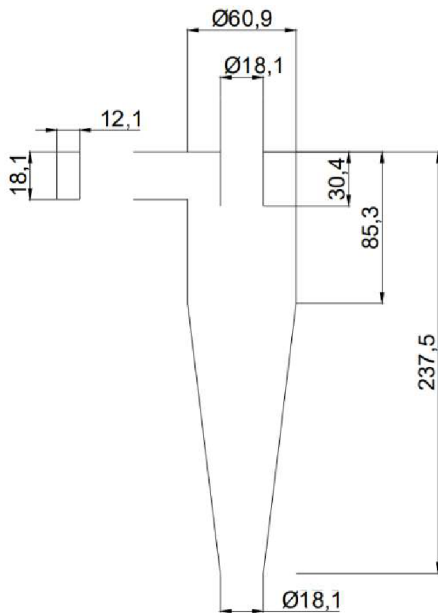
Rozměry cyklónu:		Swift		
$D_c$		60,9		[mm]
$a$		18,1		
$b$		12,1		
$H$		237,5		
$h$		85,3		
$D_e$		18,1		
$B$		18,1		
$S$		30,4		
Průtok plynu $\dot{Q}_g$		18,32		[m <sup>3</sup> /h]
		5		[m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /h]
Vstupní rychlost $v_{in}$		23,2		[m/s]
Výstupní rychlost $v_{out}$		19,8		
Max. tečná rychlost $v_{t,max}$		28,2		
Frakční odlučivosti:		Barth	Lapple	[%]
$O_f(PM_{20})$		100,00	99,34	
$O_f(PM_{10})$		100,00	97,41	
$O_f(PM_{5,0})$		99,95	90,40	
$O_f(PM_{2,5})$		95,91	70,19	
$O_f(PM_{1,0})$		6,25	27,37	
$O_f(PM_{0,5})$		0,08	8,61	
Celková odlučivost	$O_c$	92,14	88,93	[%]
Tlaková ztráta:				[Pa]
Shepperd a Lapple		933,4		
Casal a Benet		294,4		
Ramachandran		787,3		
Výška střední osy $h_m$		207		[mm]
Rozměrový parametr $\alpha$		0,76		[-]
Krit. velikost částic $D_{50}$		1,63		[μm]
Počet obrátek v cyklónu $N$		7,5		[-]

Odlučovač skládající se z 10 paralelně zapojených cyklónů Swift je při daném složení prachu schopen dosáhnout teoretické odlučivosti 92,14 % dle Bartha, respektive 88,93 % dle

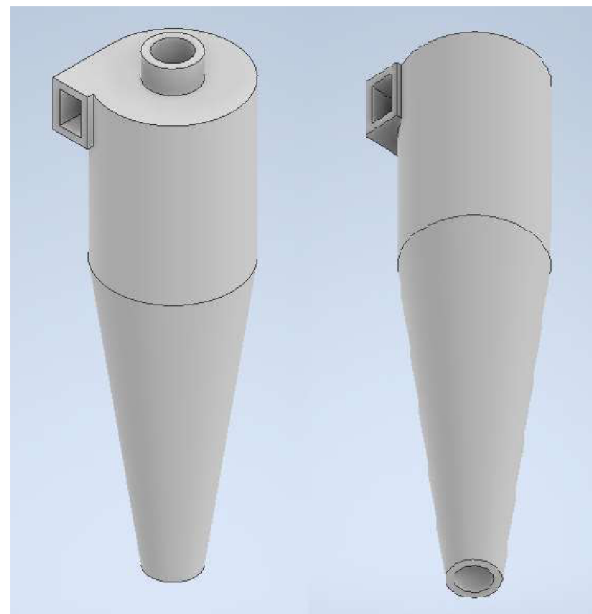
Lappleho, a to při tlakové ztrátě v rozmezí 294 – 933 Pa, při hodnotě 787 Pa dle Ramachandrana. Oproti jedinému cyklónu o průměru 193 mm vzrostla odlučivost cyklónu o cca 7,1 % dle Bartha a o 7,8 % dle Lappleho, a to při srovnatelné tlakové ztrátě. Dále si lze všimnout, že došlo ke zvýšení frakční odlučivosti pro částice o rozměru 2,5  $\mu\text{m}$  dle Bartha z 37 % na takřka 96 % a ke zvýšení frakční odlučivosti částic o rozměru 1  $\mu\text{m}$  o cca 6 %. Změna frakčních odlučivostí částic menších než 0,5  $\mu\text{m}$  je zanedbatelná. V případě stanovení frakčních odlučivostí dle Lappleho je nárůst pozvolný v širokém rozmezí velikostí částic.



Obrázek 60 – Schéma paralelního zapojení upravených cyklónů Swift



Obrázek 62 – Základní rozměry buňky o průměru 60,9 mm



Obrázek 61 – Model upraveného cyklónu Swift o vnitřním průměru 60,9 mm

Zvýšení odlučivosti paralelně zapojených cyklónů jejich dalším zmenšením nepovažují za vhodné z hlediska náročnosti výroby. Pro další zvýšení odlučivosti doporučují zapojit více totožných cyklonových paralelních odlučovačů za sebe. Vzhledem k vyšší odlučivosti při nižší tlakové ztrátě se další část práce bude zabývat konstrukcí paralelního odlučovače s důrazem na jednoduchoost sériového zapojení a rovnoměrný tok plynu buňkami.

Tabulka 9 – Zvýšení odlučivosti zapojením více paralelních odlučovačů za sebe

Swift (10 buněk)						
Počet odlučovačů:	1		2		3	
Model výpočtu: <sup>15</sup>	B	L	B	L	B	L
Frakční odlučivosti:	[%]		[%]		[%]	
$O_f(PM_{20})$	100,00	99,34	100,00	100,00	100,00	100,00
$O_f(PM_{10})$	100,00	97,41	100,00	99,93	100,00	100,00
$O_f(PM_{5,0})$	99,95	90,40	100,00	99,08	100,00	99,91
$O_f(PM_{2,5})$	95,91	70,19	99,83	91,12	99,99	97,35
$O_f(PM_{1,0})$	6,25	27,37	12,10	47,24	17,59	61,68
$O_f(PM_{0,5})$	0,08	8,61	0,16	16,48	0,24	23,67
Celková odlučivost:	[%]		[%]		[%]	
$O_c$	92,14	88,93	93,63	94,45	94,34	96,33
Tlaková ztráta:	[Pa]		[Pa]		[Pa]	
Shepperd a Lapple	4p <sub>z</sub>		933,4		1866,8	
Casal a Benet			294,4		588,8	
Ramachandran			787,3		1574,6	
					2800,2	
					883,2	
					2361,9	

<sup>15</sup> B – počítáno modelem dle Bartha a L – počítáno modelem dle Lappleho

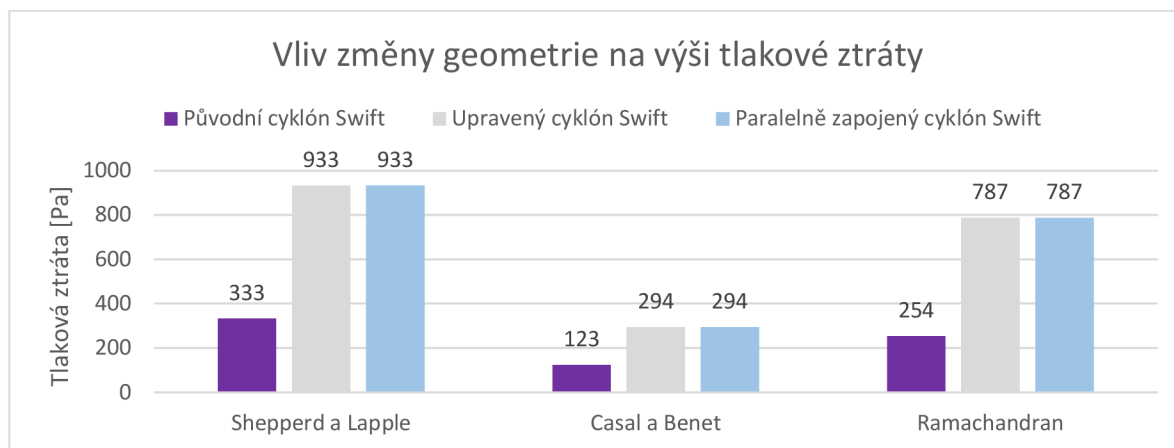
## 10 Shrnutí jednotlivých řešení

Ze tří zvolených „cyklonových rodin“ – Lapple, Stairmand a Swift byly stanoveny odlučivosti dle Bartha a Lappleho, přičemž nejvyšší odlučivosti dle Bartha pro daný průtok plynu dosahuje cyklón Swift, a to 79,48 %. Dle Lappleho dosáhl nejvyšší odlučivosti cyklón Stairmand, a to 77,47 %. Pro další postup byl zvolen cyklón Swift, neboť stanovení teoretické odlučivosti dle Bartha je přesnější pro cyklóny o malých průtocích plynu.

Simplex cyklónu Swift je navrhnut s ohledem na optimální odlučivost při nízké tlakové ztrátě. Vzhledem k požadované vysoké odlučivosti bez ohledu na velikost tlakové ztráty byly provedeny jeho konstrukční úpravy, čímž došlo ke zvýšení teoretické odlučivosti o 5,5 % dle Bartha, respektive 4,7 % dle Lappleho. Výše uvedeného bylo dosaženo zmenšením obdélníkového vstupního průřezu, zmenšením průřezu výstupní trouby a průřezu otvoru pro odvod odloučeného prachu. Odlučivost by šlo zvýšit dalšími konstrukčními zásahy, nicméně pouze nepatrně a s podstatným nárůstem tlakové ztráty, která je již tak vysoká. Vlivem konstrukční změny došlo dle Bartha k výraznému zvýšení frakční odlučivosti částic o rozměru 2,5  $\mu\text{m}$  z 19 % na 37 %. Kritická velikost částic byla zmenšena z původní 3,82 na 2,90  $\mu\text{m}$ . Částice větší než 5  $\mu\text{m}$  dokázala takřka ze 100 % odloučit již původní verze cyklónu a odlučivost částic menších než 1  $\mu\text{m}$  byla zvýšena pouze nepatrně. Spolu se zvýšením odlučivosti došlo ke zvýšení tlakové ztráty, a to takřka trojnásobně oproti původní verzi.

1. varianta řešení spočívá v sériovém zapojení upraveného cyklónu Swift o průměru 193 mm. Při zapojení 4 kusů cyklónů Swift do série bylo dosaženo celkové teoretické odlučivosti 88,84 % dle Bartha a 93,04 % dle Lappleho při daném frakčním složení prachu. Výsledné odlučivosti bylo dosaženo při tlakové ztrátě v rozmezí 1177-3733 Pa v závislosti na modelu výpočtu, s hodnotou 3149 Pa dle Ramachandrana, jehož model výpočtu považuji za nejpřesnější.

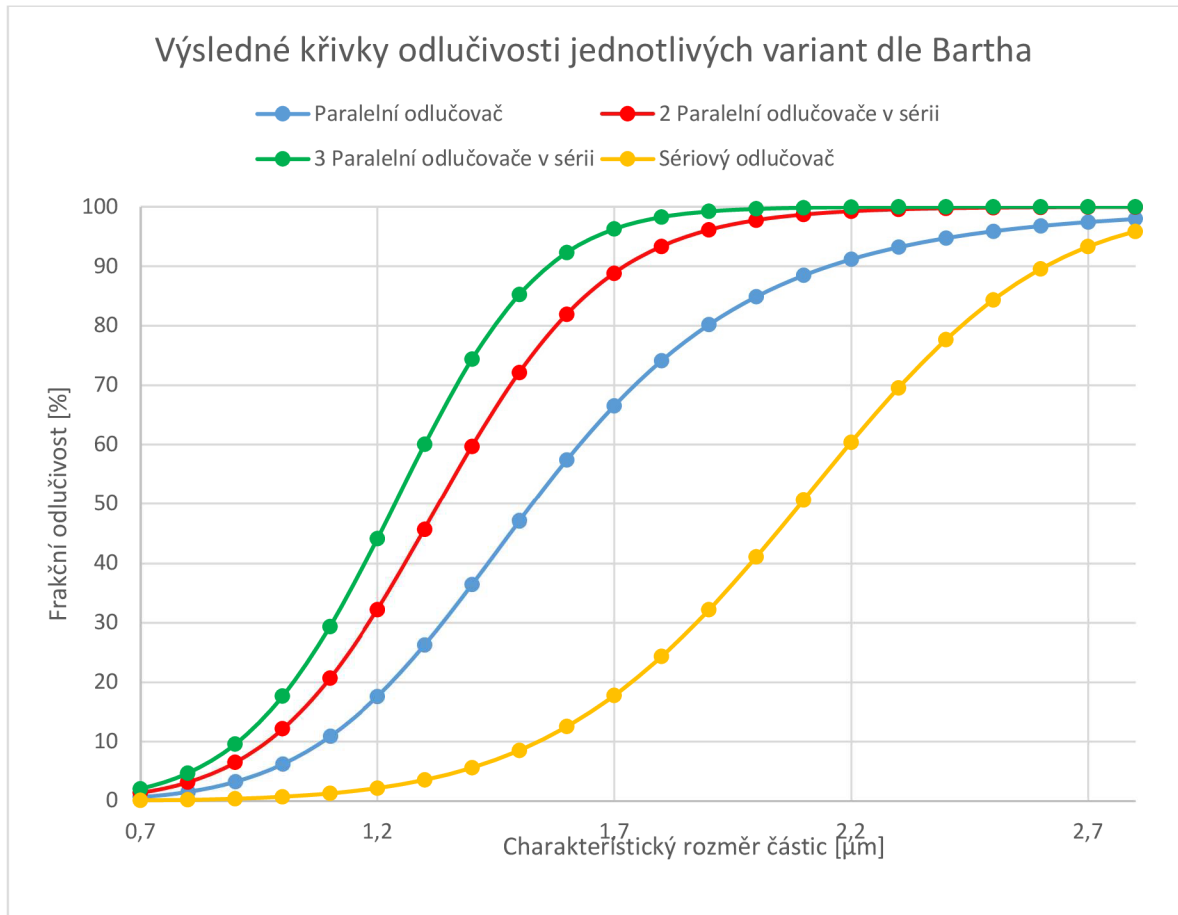
2. varianta se zabývá zmenšením upraveného cyklónu Swift na průměr 60,9 mm a jejich paralelním zapojením v počtu 10 ks pro daný průtok plynu. Jejich další zmenšení nepovažuji za vhodné z hlediska náročnosti výroby. Při paralelním zapojení 10 upravených cyklónů Swift lze dosáhnout odlučivosti 92,14 % dle Bartha a 88,93 % dle Lappleho, a to při tlakové ztrátě v rozmezí 294-933 Pa, kdy hodnota dle Ramachandrana je 787 Pa. Vzhledem k nízké tlakové ztrátě se jeví jako vhodné zvýšit odlučivost zapojením dvou až tří paralelních odlučovačů do série. Při zapojení dvou odlučovačů vzroste odlučivost o cca 1,5 % dle Bartha a 5,5 % dle Lappleho. Zapojením tří kusů za sebe lze docílit odlučivosti 94,34 % dle Bartha a 96,33 % dle Lappleho, a to při tlakové ztrátě v rozmezí 883-2800 Pa, s hodnotou 2361 Pa dle Ramachandrana.



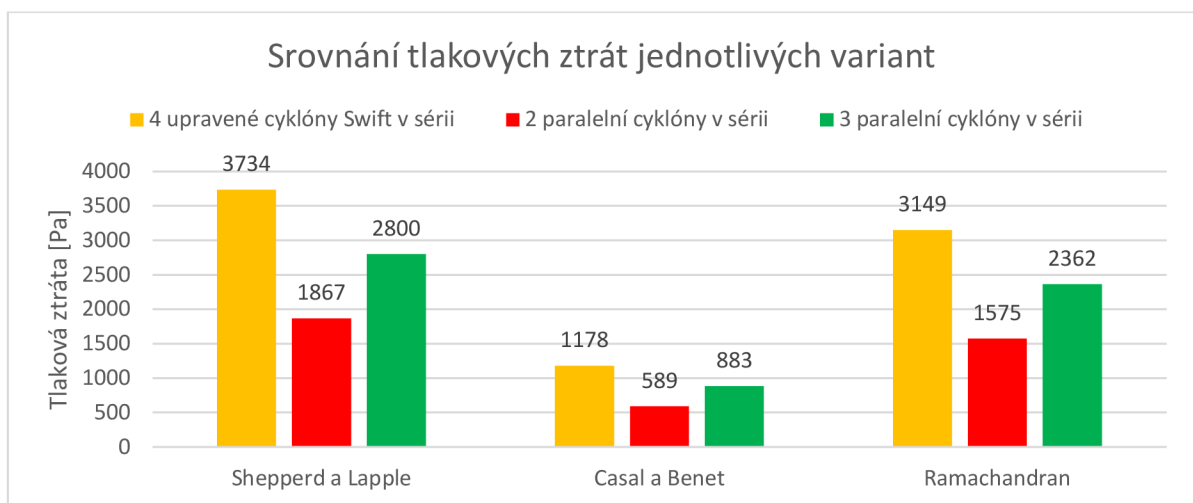
Obrázek 63 - Vliv geometrie na změnu tlakové ztráty cyklónu Swift



Z hlediska přiblížení se k požadované odlučivosti je výhodnější užití zapojení 3 paralelních odlučovačů, složených z upravených buněk Swift o průměru 60,9 mm, za sebou, při němž lze dosáhnout vyšší odlučivosti než při čistě sériovém zapojení, a to při tlakové ztrátě o takřka 800 Pa nižší dle Ramachandrana.



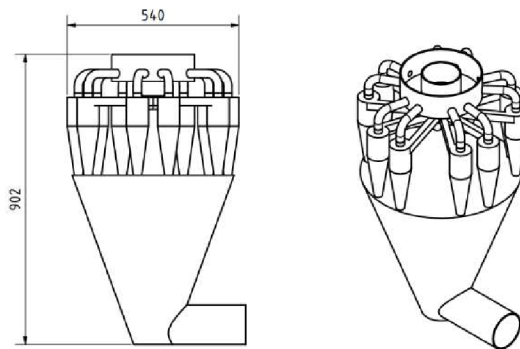
Obrázek 64 – Výsledné křivky odlučivosti jednotlivých variant dle Bartha



Obrázek 65 – Výše tlakových ztrát jednotlivých variant

## 11 Technické provedení paralelního odlučovače

Jak již bylo uvedeno ve shrnutí jednotlivých variant, jako nejvhodnější se jeví sériové zapojení více paralelně uspořádaných odlučovačů. Každý z nich je složen z 10 buněk upraveného cyklónu Swift o rozměru buňky 60,9 mm. Zapojením dvou takových odlučovačů lze dosáhnout celkové odlučivosti cca 93,6-94,5 % v závislosti na modelu výpočtu při tlakové ztrátě 1575 Pa dle Ramachandrana. Při zapojení 3 odlučovačů do série lze při daném složení prachu dosáhnout odlučivosti cca 94,3-96,3 % v závislosti na modelu výpočtu, a to při tlakové ztrátě 2362 Pa dle Ramachandrana. Všechny komponenty odlučovače byly navrženy a vymodelovány v programu Autodesk Inventor.



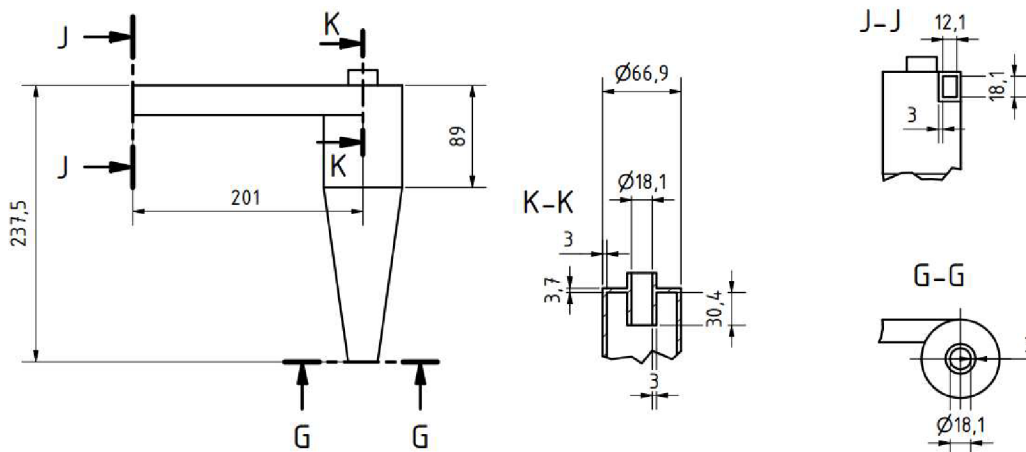
Obrázek 66 – Schéma navrhnutého paralelního odlučovače

### 11.1 Volba materiálu

Volba materiálu závisí vlastnostech čištěného média a ekonomických ukazatelích. V závislosti na vlastnostech čištěného média a prachu se cyklóny vyrábí z plechů z uhlíkové oceli, z ušlechtilé oceli třídy 17, případně při vyšší míře abraze z oteruvzdorné oceli. Vzhledem k vysoké teplotě přiváděného plynu, u něž není předpokládán vysoký obsah vlhkosti, a relativně nízké koncentraci prachu byl zvolen jako vhodný materiál pro výrobu odlučovače a dalších komponent ušlechtilá ocel třídy 17 125 dle ČSN (X10CRAL13 dle EN 10095), a to pro její vysokou teplotní odolnost, jejíž mezní hodnota je 950 °C. [21]

### 11.2 Upravený cyklón Swift

Níže je výkresová dokumentace upraveného cyklónu Swift s pravým vstupem. Cyklón s levým vstupem je konstrukčně stejný. Tloušťka stěn je zvolena 3 mm, tloušťka víka je 3,7 mm a délka nátrubku je vzhledem k celkové konstrukci odlučovače 201 mm. Výkresová dokumentace bude přiložena jako příloha práce.



Obrázek 67 – Konstrukční rozměry cyklónu

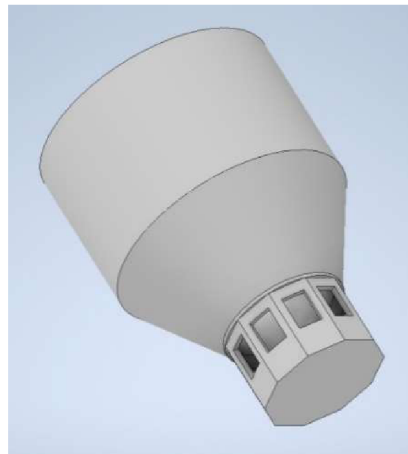


### 11.3 Rozváděcí hlava pro rovnoměrné rozdělení vstupního plynu

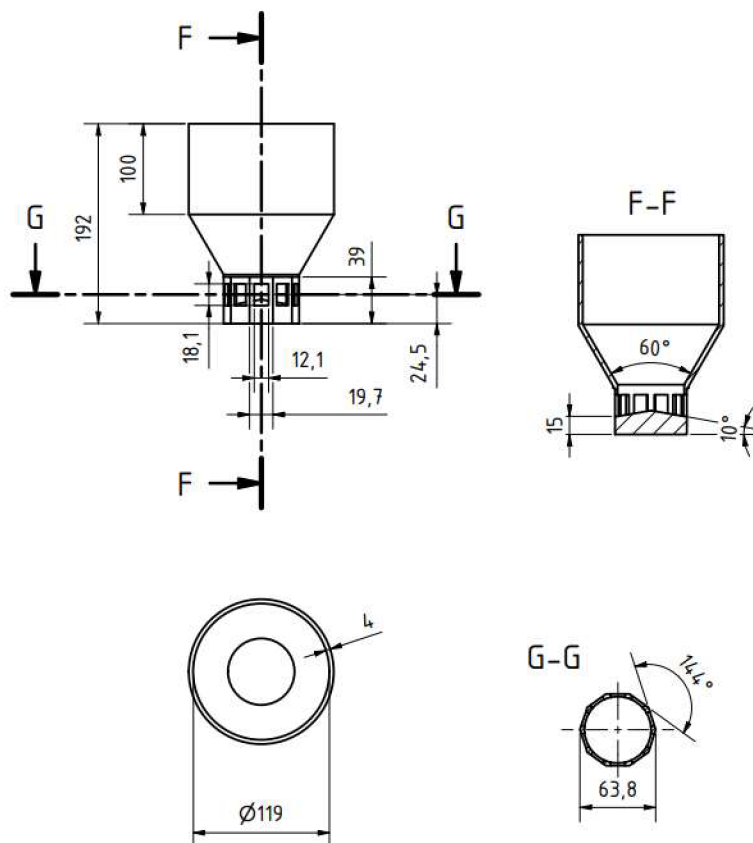
Pro optimální funkci odlučovače je nutné docílit co nejrovnoměrnějšího rozložení proudu plynu mezi jednotlivé buňky. Paralelně zapojené buňky se zpravidla konstruuji s axiálním vstupem, nicméně pro potřebu maximální odlučivosti jsou buňky zkonstruovány se vstupem tečným, u nichž je její vyšší předpoklad.

Vzhledem k nízkému počtu buněk by bylo možné docílit rovnoměrného rozvodu plynu do buněk užitím rozváděcí hlavy ne nepodobné té, které je využito například u skupinového zapojení cyklónů Korsá. Pro rovnoměrný rozvod plynu do buněk byla navržena rozváděcí hlava na obrázku níže.

Plyn vstupuje vertikální trubicí o vnitřním průměru 119 mm, která se zužuje za účelem zvýšení rychlosti proudícího plynu. Trubka je osazena pravidelným desetihranem, ke kterému budou přivařeny nátrubky cyklónů. Pro usměrnění plynu do jednotlivých buněk je zesílené dno opatřeno kuželovým deflektorem s vrcholovým úhlem  $80^\circ$ . Rozváděcí hlava je uzpůsobena pro uspořádání cyklónů s protichůdným uspořádáním, tedy střídavě s levým a pravým vstupem. Dané uspořádání je výhodnější, neboť nedochází ke vzájemnému brždění vírů ve výsypce.



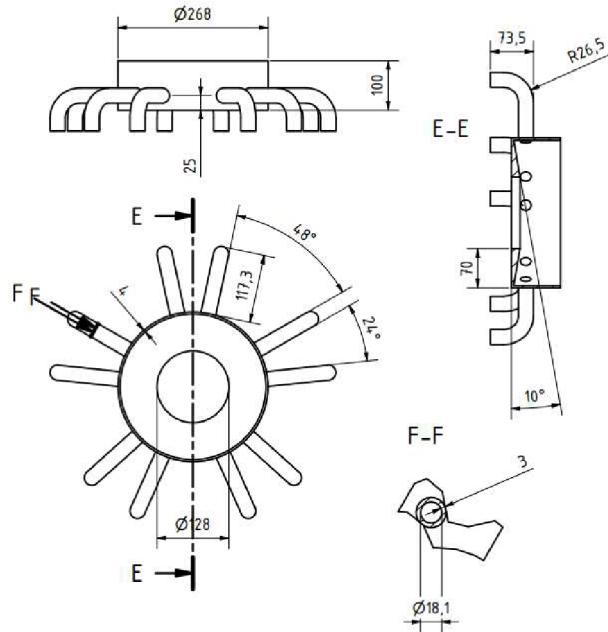
Obrázek 68 – Model rozváděcí hlavy



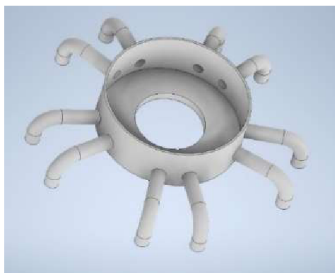
Obrázek 69 - Rozměry rozváděcí hlavy

### 11.4 Odvod vyčištěného plynu

Z hlediska praktičnosti je vhodné vyústění výstupních trub z jednotlivých buněk do společného prostoru, načež lze plyn dále čistit či s ním jinak pracovat. Bylo navrženo obdobné uspořádání, jako v případě rozváděcí hlavy. Plyn je výstupními trubkami veden z cyklónů do jednostranně zapečetěné trubky o vnitřním průměru 260 mm, která je přivařena na trubku přivádějící znečištěný plyn, tedy proudy čistého a znečištěného plynu dále proudí jako v protiproudém výměníku trubka v trubce. Dno trubky je zkoseno pod úhlem  $10^\circ$ , což má za cíl usměrnit proudící plyn. Tloušťka trubky je 4 mm.



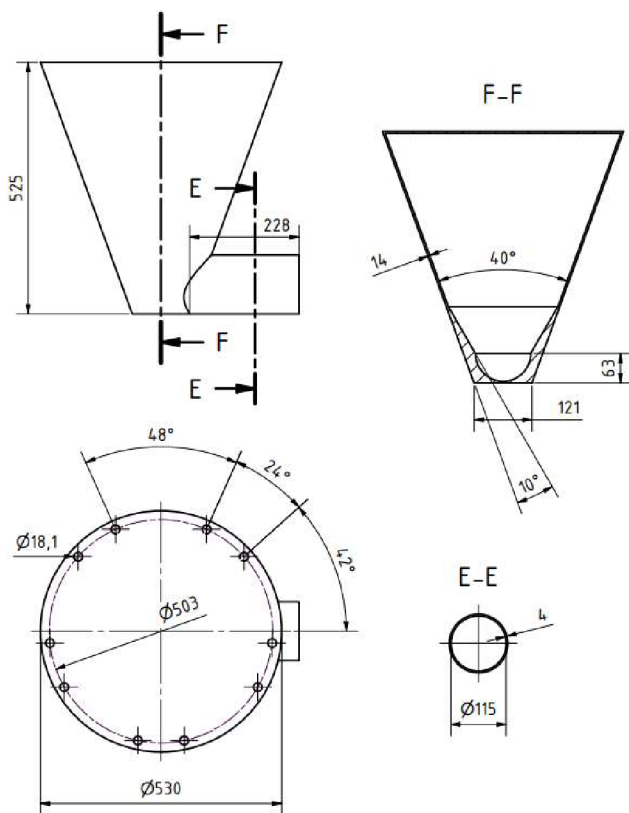
Obrázek 70 – Rozměry armatury pro odvod plynu



Obrázek 71 – Model armatury pro odvod plynu

### 11.5 Výsypka

Výsypku byla navržena s důrazem na plynulý odvod tuhých zbytků z odlučovače, tedy se zkosněním stěn  $70^\circ$ . Dno je opatřeno trubkou pro odvod prachu, který může být jak manuální, tak zautomatizovaný. Tloušťka plechu výsypky je vzhledem k celkovým rozměrům 14 mm.



Obrázek 72 – Rozměry výsypky

Obrázek 73 - Model výsypky

## 12 Přenos tepla

Přenos tepla probíhá 3 mechanismy, a to vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a zářením (radiací), o nichž si povíme v následujících podkapitolách. Je definován tzv. tepelným tokem, který udává množství přenesené tepelné energie v čase.

$$\dot{Q} = \dot{q} \cdot S \quad (12.1)$$

Kde:

- $\dot{Q}$  - Tepelný tok [W]
- $\dot{q}$  - Hustota tepelného toku [W/m<sup>2</sup>]
- $S$  - Plocha, skrz kterou teplo prostupuje [m<sup>2</sup>]

### 12.1 Přenos tepla vedením

Princip spočívá v přenosu kinetické energie srážkami sousedním molekul látky a z toho důvodu je dominantní u pevných látek. Tepelný tok vedením je definován Fourierovým zákonem. Jeho hodnota závisí na teplosměnné ploše, součiniteli tepelné vodivosti, jenž je materiálovou charakteristikou, a tloušťce dané plochy. V zásadě se jedná o analogický jev ku přenosu elektrického proudu. V termomechanice představuje hustota tepelného toku totéž, co elektrický proud a rozdíl teplot obdobu napětí. Součinitel tepelné vodivosti a tloušťka daného materiálu jsou pak tepelným odporem. Princip je patrný na obrázku níže.

- Vedení tepla rovinnou stěnou:

$$\dot{Q} = S \cdot (T_{w1} - T_{w2}) \cdot \frac{\lambda}{h} \quad (12.2)$$

Kde:

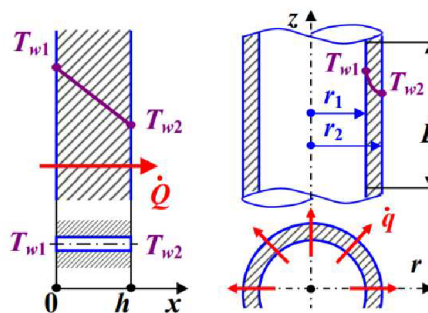
- $S$  - Teplosměnná plocha [m<sup>2</sup>]
- $T_{w1}, T_{w2}$  - Teploty stěny [K]
- $\lambda$  - Součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]
- $h$  - Tloušťka stěny [m]

- Vedení tepla válcovou stěnou

$$\dot{Q} = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot (\Delta T) \cdot \frac{\lambda}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (12.3)$$

Kde:

- $L$  - Délka válcové stěny [m]
- $r_2, r_1$  - Poloměry válcových stěn [m]



Obrázek 74 – Přenos tepla vedením rovinnou a válcovou stěnou [22]

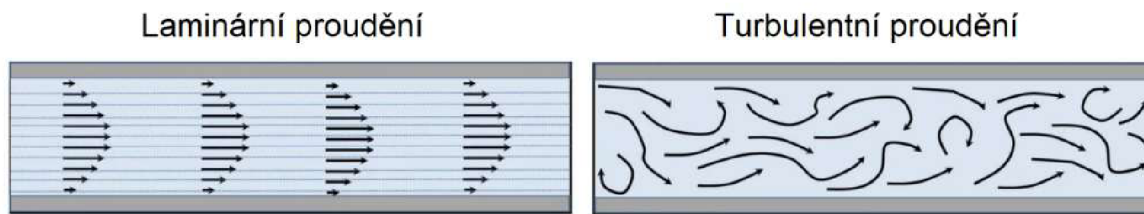
## 12.2 Přenos tepla prouděním

Je charakteristický při proudění tekutin a je popsán Newtonovým vztahem, který definuje přestup tepla mezi povrchem a proudící kapalinou. Tepelný tok závisí na součiniteli přestupu tepla, jenž je oproti součiniteli tepelné vodivosti těžší stanovit, neboť závisí na rychlosti proudění, charakteristických vlastnostech proudící tekutiny a na tvaru obtékaného povrchu. K jeho přibližnému odhadu se využívají bezrozměrná kritéria a tzv. kritériální rovnice.

- Reynoldsovo číslo – Re
- Prandtlovo číslo – Pr
- Nusseltovo číslo – Nu
- Grashofovo číslo – Gr

Proudění lze rozdělit na laminární a turbulentní v závislosti na povaze proudu a na přirozené a nucené v závislosti na příčině vzniku proudění. [22] [23]

- Přirozené proudění
  - Kapaliny:  $\alpha=2-25 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
  - Plyny:  $\alpha=50-1000 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
- Nucené proudění
  - Kapaliny:  $\alpha=25-250 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
  - Plyny:  $\alpha=50-20\,000 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$



Obrázek 75 - Laminární a turbulentní proudění [24]

Reynoldsovo číslo definuje působení setrvačných a třecích sil proudící tekutiny. Určuje, o jaký typ proudění se jedná, zda o laminární či turbulentní. Ačkoliv se považuje za pomyslnou hranici mezi laminárním a turbulentním prouděním hodnota  $Re \approx 2300$ , tak při skutečném proudění je přechod mezi typy proudu pozvolný a při hodnotě  $Re = 2000-4000$  nastává přechodové proudění. [25]

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{v \cdot d}{\frac{\mu}{\rho}} \quad (12.4)$$

Kde:

- $v$  - Rychlost proudění tekutiny [m/s]
- $d$  - Charakteristický rozměr tělesa [m]
- $\nu$  - Kinematická viskozita [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
- $\mu$  - Dynamická viskozita tekutiny [Pa·s]
- $\rho$  - hustota tekutiny [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

Nusseltovo číslo udává poměr tepla přeneseného konvekcí a kondukcí, respektive jejich součinitelů, viz rovnice:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} \quad (12.5)$$

Kde:

- $\lambda$  - Součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]
- $\alpha$  - Součinitel přestupu tepla [W/(m<sup>2</sup>·K)]
- $d$  - Charakteristický rozměr tělesa [m]

Prandtlovo číslo definuje poměr kinematické viskozity tekutiny ku teplotní vodivosti. Pro plyny nabývá hodnot 0,7-1. [26]

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} \quad (12.6)$$

Kde:

- $\nu$  - Kinematická viskozita [m<sup>2</sup>/s]
- $a$  - Teplotní vodivost [m<sup>2</sup>/s]
- $\mu$  - Dynamická viskozita [Pa·s]
- $c_p$  - Měrná tepelná kapacita [J/(kg·K)]
- $\lambda$  - Součinitel tepelné vodivosti [W/m·K]

Grashoffovo číslo udává poměr mezi vztlakovými a třecími silami v tekutině, viz rovnice:

$$Gr = \frac{\gamma \cdot g \cdot d^3 \cdot \Delta T}{\nu^2} \quad (12.7)$$

Kde:

- $\gamma$  - Teplotní objemová roztažnost [1/K]
- $g$  - Tíhové zrychlení [m/s<sup>2</sup>]
- $d$  - Charakteristický rozměr [m]
- $\Delta T$  - Teplotní rozdíl [K]
- $\nu$  - Kinematická viskozita [m<sup>2</sup>/s]

- Přestup tepla při obtékání rovinné stěny

$$\dot{Q} = \alpha \cdot S \cdot (T_w - T_l) \quad (12.8)$$

Kde:

- $S$  - Plocha obtékaného povrchu [m<sup>2</sup>]
- $T_w$  - Teplota obtékaného povrchu [K]
- $T_l$  - Teplota proudící tekutiny [K]
- $\alpha$  - Součinitel přestupu tepla [W/(m<sup>2</sup>·K)]

- Přestup tepla při obtékání válcové stěny

$$\dot{Q} = 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot \alpha \cdot S \cdot (T_{l,h} - T_{w1}) \quad (12.9)$$

Veličiny použité pro přestup tepla z horké tekutiny do válcové stěny jsou vztaženy k obrázku č. 74.

### 12.3 Přenos tepla zářením

Je charakterizován Stefan-Boltzmannovým zákonem, který říká, že hustota zářivého toku dokonalého zářiče je úměrná čtvrté mocnině jeho absolutní teploty. [22]

$$E = \sigma \cdot T^4 \quad (12.10)$$

Kde:

- $E$  - Hustota zářivého toku [W/m<sup>2</sup>]
- $\sigma$  - Stefan-Boltzmannova konstanta = 5,6697·10<sup>-8</sup> [W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)]
- $T$  - Teplota povrchu zářiče [K]

V případě nedokonalých zářičů je nutné zavést veličinu emisivitu, která se pohybuje v rozmezí od 0 do 1. Liší se v závislosti na druhu materiálu a povrchové úpravě zářičího povrchu. Uvažujme nedokonalý zářič o zanedbatelném povrchu ve srovnání s okolím, jenž jej obklopuje. Lze pro tepelný tok zářením psát:

$$\dot{Q} = \varepsilon_z \cdot \sigma \cdot S_z \cdot (T_z^4 - T_o^4) \quad (12.11)$$

Kde:

- $\dot{Q}$  - Tepelný tok [W]
- $\varepsilon_z$  - Emisivita zářiče [-]
- $\sigma$  - Stefan-Boltzmannova konstanta = 5,6697·10<sup>-8</sup> [W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)]
- $S_z$  - Plocha zářiče [m<sup>2</sup>]
- $T_z$  - Teplota povrchu zářiče [K]
- $T_o$  - Teplota okolí [K]

### 13 Tepelné ztráty odlučovače

Poslední část diplomové práce je zaměřena na odhad tepelných ztrát daného odlučovače. Odlučovač bude pracovat ve vnitřním prostoru, kde lze předpokládat teplotu okolního vzduchu 15 °C. Součinitel přestupu tepla vzduchu v místnosti byl zvolen s ohledem na přirozené proudění.

#### 13.1 Měrná tepelná kapacita suspenze

Jelikož je suspenze složena z několika látek, bylo třeba určit hodnotu měrné tepelné kapacity směsi, a to při teplotě 800 °C. Hodnotu měrné tepelné kapacity lze považovat za konstantní v celém odlučovači. Hodnoty měrných tepelných kapacit pro dané složky směsi jsou čerpány z: [27] [28] [29] [30] [31]

- Hodnoty měrných tepelných kapacit při teplotě 1073,15 K:

$$\begin{aligned}
 c_{p,CO} &= 1,199 \frac{kJ}{kg \cdot K} & c_{p,CH_4} &= 4,535 \frac{kJ}{kg \cdot K} & c_{p,N_2} &= 1,182 \frac{kJ}{kg \cdot K} \\
 c_{p,CO_2} &= 1,253 \frac{kJ}{kg \cdot K} & c_{p,H_2} &= 15,100 \frac{kJ}{kg \cdot K} & & \\
 c_p &= \sum_{i=1}^n c_{p,i} \cdot \varphi_i & & & & (13.1)
 \end{aligned}$$

$$c_p = c_{p,CO} \cdot \varphi_{CO} + c_{p,CO_2} \cdot \varphi_{CO_2} + c_{p,CH_4} \cdot \varphi_{CH_4} + c_{p,H_2} \cdot \varphi_{H_2} + c_{p,N_2} \cdot \varphi_{N_2}$$

$$c_p = 2,447 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

#### 13.2 Tepelná vodivost suspenze

Obdobným způsobem bylo třeba stanovit tepelnou vodivost suspenze při teplotě 800 °C, kterou lze dále považovat za konstantní. Hodnoty čerpány a přepočítány z: [32]

$$\begin{aligned}
 \lambda_{CO} &= 78,2 \frac{mW}{m \cdot K} & \lambda_{CH_4} &= 189,6 \frac{mW}{m \cdot K} & \lambda_{N_2} &= 73,8 \frac{mW}{m \cdot K} \\
 \lambda_{CO_2} &= 82,1 \frac{mW}{m \cdot K} & \lambda_{H_2} &= 500,1 \frac{mW}{m \cdot K} & & \\
 \lambda_g &= \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \varphi_i & & & & (13.2)
 \end{aligned}$$

$$\lambda_g = 115,0 \frac{mW}{m \cdot K}$$

Tabulka 10 – Parametry pro výpočet tepelných ztrát

Celkový průtok plynu	$\dot{Q}_g$	50,0	$[m_N^3/h]$
		183,21	$[m^3/h]$
Hustota plynu	$\rho_g$	1,195	$[kg/m_N^3]$
		0,326	$[kg/m^3]$
Teplota plynu	$T_g$	1073,15	$[K]$
Teplota vzduchu	$T_{vz}$	288,15	$[K]$
Dynamická viskozita plynu	$\mu_g$	$1,597 \cdot 10^{-5}$	$[Pa \cdot s]$
Hustota TZL	$\rho_t$	1500	$[kg/m_N^3]$
Měrná tepelná kapacita plynu	$c_p$	2447	$[J/(kg \cdot K)]$
Součinitel tepelné vodivosti plynu	$\lambda_g$	0,115	$[W/(m \cdot K)]$
Součinitel tepelné vodivosti oceli [21]	$\lambda_{ocel}$	45	$[W/(m \cdot K)]$
Součinitel přestupu tepla vzduchu	$\alpha_{vz}$	5	$[W/(m^2 \cdot K)]$
Emisivita oceli [32]	$\varepsilon$	0,7	$[-]$
Stefan-Boltzmannova konstanta	$\sigma$	$5,6697 \cdot 10^{-8}$	$[W/(m^2 \cdot K^4)]$

Výpočet tepelných ztrát byl proveden s ohledem na následující:

- Předpoklad ideálního plynu, v celém průřezu proudu shodné vlastnosti a teplota
- Plyn má konstantní teplotu v celém řešeném prvku mezi 2 řešenými body, poté proběhl přepočítání nové teploty z odhadu tepelných ztrát daného prvku
- Hodnota Prandtlůva čísla je konstantní v celém odlučovači a lze ji spočítat jako:

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda_g} = 0,84 \quad (13.3)$$

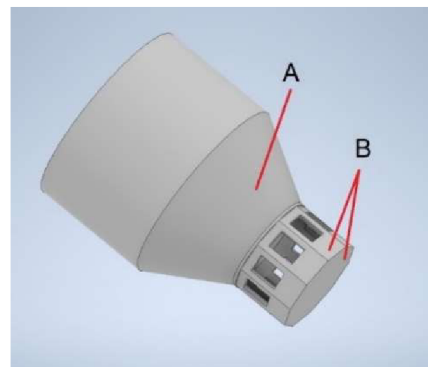
- Kriteriační rovnice pro stanovení Nusseltova čísla: [34]

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (13.4)$$

### 13.3 Výpočet tepelných ztrát rozváděcí hlavy

Plyn je veden přívodním potrubím skrz dýzu, značenou na obrázku A. Délka dýzy je  $L = 53$  mm, vstupní průměr  $D_{A,IN} = 119$  mm, výstupní průměr  $D_{A,OUT} = 64$  mm s konstantní tloušťkou stěny  $h = 4$  mm.

Součinitel přestupu tepla proudícího plynu byl stanoven jako střední hodnotu z mezních hodnot na vstupu a výstupu z dýzy:



Obrázek 76 – Model rozváděcí hlavy



Vstupní rychlost do dýzy A a výpočet součinitele přestupu tepla:

$$v_{A,IN} = \frac{\dot{Q}_g}{S_{A,IN}} = 4,58 \frac{m}{s} \quad (13.5)$$

$$Re_{A,IN} = \frac{v_{A,IN} \cdot D_{A,IN}}{\nu} = \frac{v_{A,IN} \cdot D_{A,IN}}{\frac{\mu_g}{\rho_g}} = 4488 \quad (13.6)$$

$$Nu = 17,92$$

$$\alpha_{A,IN} = \frac{Nu \cdot \lambda_g}{D_{A,IN}} = 17,32 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (13.7)$$

- Výstupní rychlost z dýzy A a výpočet součinitele přestupu tepla:

$$v_{A,OUT} = \frac{\dot{Q}_g}{S_{A,OUT}} = 15,82 \frac{m}{s} \quad (13.8)$$

$$Re_{A,OUT} = \frac{v_{A,OUT} \cdot D_{A,OUT}}{\frac{\mu_g}{\rho_g}} = 8345 \quad (13.9)$$

$$Nu = 29,44$$

$$\alpha_{A,OUT} = \frac{Nu \cdot \lambda_g}{D_{A,OUT}} = 52,89 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (13.10)$$

- Střední součinitel přestupu tepla pro danou oblast proudění:

$$\alpha_A = \frac{\alpha_{A,IN} + \alpha_{A,OUT}}{2} = 35,11 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (13.11)$$

Pro výpočet odporů byl kuželový tvar dýzy zaměněn na válcový o stejném povrchu. Průměr takového válce  $D_A$  pak tedy lze spočítat jako:

$$S_{A,1} = \pi \cdot (r_{A,IN} + r_{A,OUT}) \cdot \sqrt{L^2 + (r_{A,IN} - r_{A,OUT})^2} = 0,0172 m^2 \quad (13.12)$$

$$S_{A,1} = \pi \cdot D_A \cdot L \rightarrow D_A = \frac{S_{A,1}}{\pi \cdot L} = 0,103 m \quad (13.13)$$

Kde  $r_{A,IN}$  a  $r_{A,OUT}$  jsou vnitřní poloměry dýzy na vstupu a výstupu,  $L$  je délka dýzy a  $S_{A,1}$  je vnitřní povrch dýzy, respektive válce.

Nyní již lze přistoupit k výpočtu jednotlivých odporů proti přenosu tepla a následně k tepelné ztrátě prostupem a radiací v dýze:

- Odpor plynu:

$$R_g = \frac{1}{r_A \cdot \alpha_A} = 0,553 \frac{m \cdot K}{W} \quad (13.14)$$

- Odpor trubky

$$R_t = \frac{1}{\lambda_{ocel}} \cdot \ln \frac{r_A + h}{r_A} = 0,002 \frac{m \cdot K}{W} \quad (13.15)$$

- Odpor vzduchu

$$R_{vz} = \frac{1}{(r_{A,} + h) \cdot \alpha_{vz}} = 3,601 \frac{m \cdot K}{W} \quad (13.16)$$

- Ztráta tepla prostupem:

$$\dot{Q}_{p,A} = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (T_g - T_{vz})}{R_g + R_t + R_{vz}} = 62,9 W \quad (13.17)$$

- Vnější teplota stěny trubky

$$T_w = T_g - \frac{\dot{Q}_{p,A} \cdot (R_g + R_t)}{2 \cdot \pi \cdot L} = 968,4 K \quad (13.18)$$

- Ztráta tepla radiací:

$$\dot{Q}_{r,A} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S_{A,2} \cdot (T_w^4 - T_{vz}^4) = 646,4 W \quad (13.19)$$

Kde  $S_{A,2}$  je vnější povrch dýzy:

$$\begin{aligned} S_{A,2} &= \pi \cdot (r_{A,IN} + r_{A,OUT} + 2 \cdot h) \cdot \sqrt{L^2 + ((r_{A,IN} + h) - (r_{A,OUT} + h))^2} \\ &= 0,0187 m^2 \end{aligned} \quad (13.20)$$

Výsledná teplota plynu po průchodu dýzou<sup>16</sup>:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (13.21)$$

$$\dot{Q}_p + \dot{Q}_{r,A} = \dot{V}_g \cdot \rho_g c_p \cdot (T_g - T_{g,A})$$

$$T_{g,A} = T_g - \frac{\dot{Q}_p + \dot{Q}_{r,A}}{\dot{V}_g \cdot \rho_g c_p} = 1055,7 K$$

Výsledná tepelná ztráta plochou B byla uvažována vzhledem k složitosti proudění a zanedbatelné tepelné ztrátě prostupem v dané oblasti pouze jako ztráta radiací.

- Ztráta tepla radiací:

$$\dot{Q}_{r,B} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S_B \cdot (T_w^4 - T_{vz}^4) = 301,0 W \quad (13.22)$$

- Kde teplosměnný povrch je:  $S_B = 0,0087 m^2$

Na výstupu z rozváděcí hlavy do nátrubků cyklónů má plyn výslednou teplotu:

$$T_g = T_{g,A} - \frac{\dot{Q}_{r,B}}{\dot{V}_g \cdot \rho_g c_p} = 1048,3 K \quad (13.23)$$

<sup>16</sup> Pro lepší orientaci je zaměněn symbol pro objemový průtok  $\dot{Q}_g$  za  $\dot{V}_g$

- Výsledná tepelná ztráta rozváděcí hlavy je rovna:

$$\dot{Q}_{AB} = \dot{Q}_{p,A} + \dot{Q}_{r,A} + \dot{Q}_{r,B} = 1010,3 \text{ W} \quad (13.24)$$

Tabulka 11 – Tepelné ztráty rozváděcí hlavy

Vypočtené hodnoty tepelných ztrát rozváděcí hlavy		
$v_{A,IN}$	4,58	[m/s]
$v_{A,OUT}$	15,82	[m/s]
$Re_{A,IN}$	4488	[-]
$Re_{A,OUT}$	8345	[-]
$Nu_{A,IN}$	17,92	[-]
$Nu_{A,OUT}$	29,44	[-]
$\alpha_A$	35,11	[W/(m <sup>2</sup> · K)]
$R_g$	0,553	[(m · K)/W]
$R_t$	0,002	[(m · K)/W]
$R_{vz}$	3,601	[(m · K)/W]
$\dot{Q}_p$	62,9	[W]
$T_w$	968,4	[K]
$\dot{Q}_{r,A}$	646,4	[W]
$\dot{Q}_{r,B}$	301,0	[W]
$T_g$	1048,3	[K]
$\dot{Q}_{AB}$	1010,3	[W]

### 13.4 Výpočet tepelných ztrát nátrubků

Princip výpočtu je totožný jako v předchozí kapitole. Délka nátrubku je 185 mm, vnitřní rozměr obdélníkového profilu 18,1x12,1 mm a tloušťka stěny 3 mm. Pro zjednodušení výpočtu jsem obdélníkový profil nahradil kruhovým s hydraulickým průměrem: [35]

$$D_h = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b} = \frac{2 \cdot 18,1 \cdot 12,1}{18,1 + 12,1} = 14,5 \text{ mm} \quad (13.25)$$

Tabulka 12 – Tepelné ztráty přiváděcích nátrubků

Vypočtené hodnoty tepelných ztrát nátrubků <sup>17</sup>		
$v$	23,24	[m/s]
$Re$	2778	[-]
$Nu$	12,21	[-]
$\alpha$	96,81	[W/(m <sup>2</sup> · K)]
$R_g$	1,424	[(m · K)/W]
$R_t$	0,008	[(m · K)/W]
$R_{vz}$	19,508	[(m · K)/W]
$\dot{Q}_p$	42,2	[W]
$T_w$	996,3	[K]

<sup>17</sup> Vypočtené hodnoty jsou platné pro 1 nátrubek,  $\dot{Q}_C$  je celková tepelná ztráta všech nátrubků.

$\dot{Q}_r$	606,4	[W]
$T_g$	888,5	[K]
$\dot{Q}_c$	6486,2	[W]

### 13.5 Výpočet tepelných ztrát cyklónu

Zde je třeba zdůraznit, že plyn proudící v obvodové části odstředivé komory od vstupu k výsypce ohřívá plyn stoupající středem cyklónu k výstupní troubě, cyklón v zásadě funguje jako protiproudý výměník, tudíž výsledná tepelná ztráta do okolí bude nižší.

Následně je nutné si uvědomit, že trajektorie proudění plynu není čistě v axiálním směru cyklónu jako např. při proudění trubkou, ale po šroubovici. Při zanedbání vlastní tepelné výměny proudu v axiální ose cyklónu lze tvrdit, že část tepelné energie předává skrz stěnu do okolí a část středovému proudu v cyklónu.

Tabulka 13 – Tepelné ztráty cyklónů

Vypočtené hodnoty tepelných ztrát cyklónu <sup>18</sup>		
$v_{IN}$	23,24	[m/s]
$v_{OUT}$	19,78	[m/s]
$Re_{IN}$	2778	[–]
$Re_{OUT}$	2951	[–]
$Nu_{IN}$	12,21	[–]
$Nu_{OUT}$	12,82	[–]
$\alpha_{IN}$	96,81	[W/(m <sup>2</sup> · K)]
$\alpha_{OUT}$	81,42	[W/(m <sup>2</sup> · K)]
$\alpha$	89,12	[W/(m <sup>2</sup> · K)]
$R_{g,v}$	0,339	[(m · K)/W]
$R_{t,v}$	0,002	[(m · K)/W]
$R_{vz,v}$	3,130	[(m · K)/W]
$\dot{Q}_{p,v}$	92,7	[W]
$T_{w,v}$	829,5	[K]
$\dot{Q}_{r,víko}$	56,6	[W]
$\dot{Q}_{r,v}$	331,9	[W]
$R_{g,k}$	0,563	[(m · K)/W]
$R_{t,k}$	0,003	[(m · K)/W]
$R_{vz,k}$	8,717	[(m · K)/W]
$\dot{Q}_{p,k}$	49,6	[W]
$T_{w,k}$	740,6	[K]
$\dot{Q}_{r,k}$	256,3	[W]
$T_g$	694,6	[K]
$\dot{Q}_D$	7871,5	[W]

<sup>18</sup> Dolní index v – válcová část a k – kuželová část odstředivé komory.  $\dot{Q}_D$  ke celková tepelná ztráta cyklónů.

### 13.6 Výpočet tepelných ztrát v odvodních trubách

Tabulka 14 – Tepelné ztráty odvodních trub

Vypočtené hodnoty tepelných ztrát nátrubku		
$v$	19,78	[m/s]
$Re$	2951	[-]
$Nu$	12,82	[-]
$\alpha$	81,42	[W/(m <sup>2</sup> · K)]
$R_g$	1,357	[(m · K)/W]
$R_t$	0,006	[(m · K)/W]
$R_{vz}$	16,598	[(m · K)/W]
$\dot{Q}_p$	33,4	[W]
$T_w$	663,7	[K]
$\dot{Q}_r$	132,2	[W]
$T_g$	653,8	[K]
$\dot{Q}_E$	1656,0	[W]

### 13.7 Volba izolačního materiálu

Jako izolační materiál byla zvolena rohož z keramických vláken, která jsou vyrobena na bázi oxidu hlinitého a křemičitého.

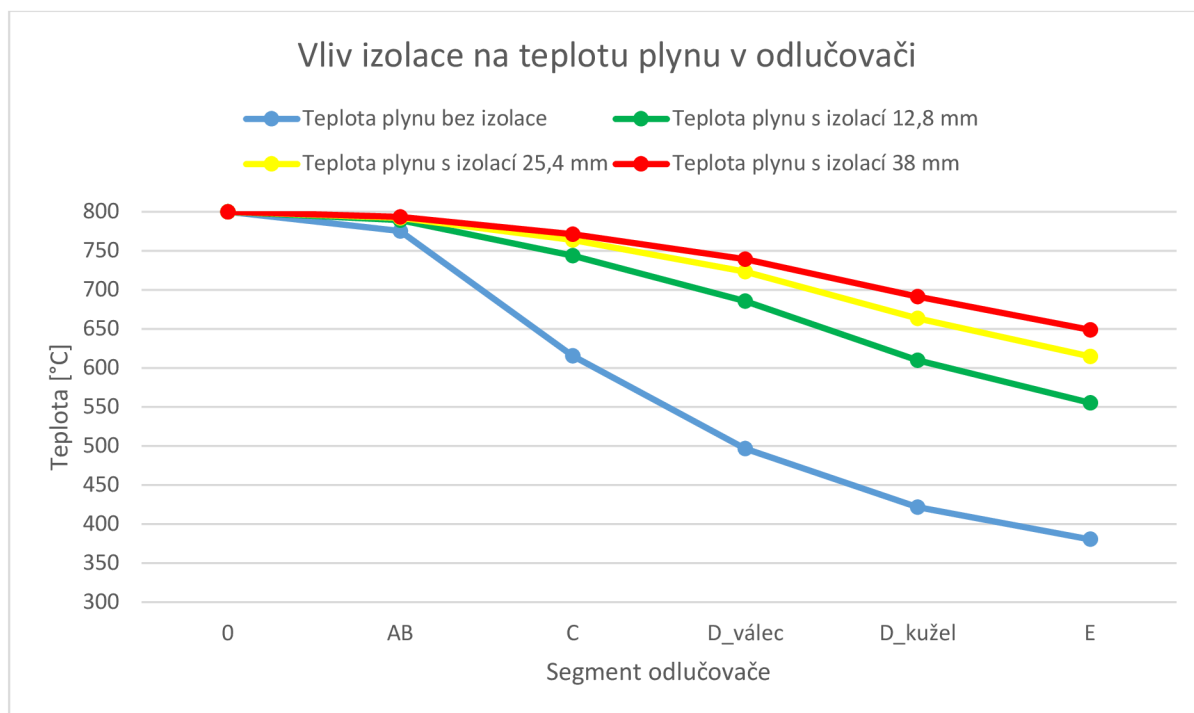
Rohože Alsiflex-1260 dosahuje klasifikační teploty 1260 °C, což je vzhledem k teplotě čištěného plynu dostačující. Součinitel tepelné vodivosti daného materiálu je při teplotě 800 °C roven 0,18 W/(m · K). [36] Emisivita keramických vláken se pohybuje v rozmezí 0,4-0,5. [37] Zvolil jsem tedy střední hodnotu – 0,45. Rohože lze zakoupit v tloušťkách 12,8 mm, 25,4 mm a 38 mm.



Obrázek 77 – Tepelná rohož Alsiflex-1260 [36]

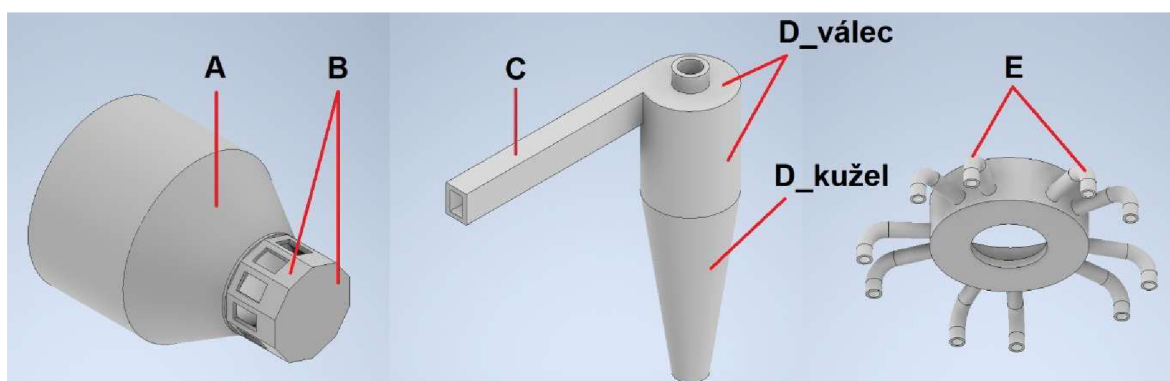
Tabulka 15 – Vliv izolační rohože na velikost tepelných ztrát

Vliv tloušťky izolační rohože na velikost tepelné ztráty			
	Tloušťka izolace	Tepelná ztráta	Výstupní teplota plynu
	[mm]	[W]	[°C]
Bez izolace	0,0	17024,1	380,7
S izolací	12,8	9929,1	555,4
	25,4	7517,8	614,8
	38,0	6141,9	648,7

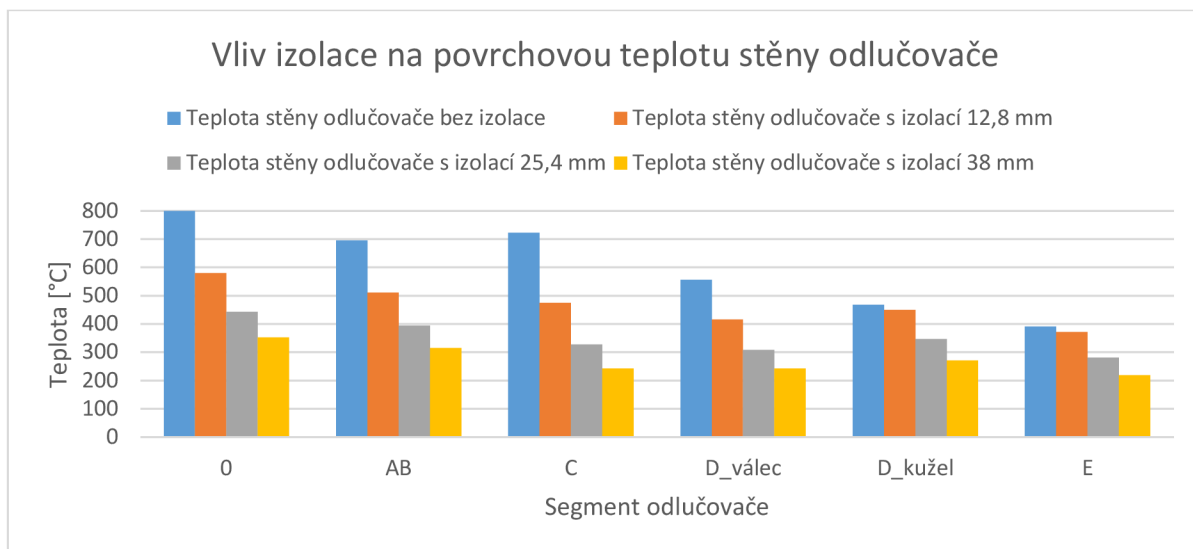


Obrázek 78 – Vliv izolace na teplotu proudícího plynu

Označení horizontální osy definuje jednotlivé části odlučovače tak, jak jimi plyn postupuje, viz obrázek níže. 0 – vstupní teplota plynu, AB – teplota plynu po průchodu rozváděcí hlavou, C – teplota plynu po průchodu tečnými nátrubky, Dv a Dk – teplota plynu po průchodu válcovou a kuželovou částí cyklónu, E konečná teplota na výstupu plynu z odlučovače.



Obrázek 79 – Segmenty odlučovače

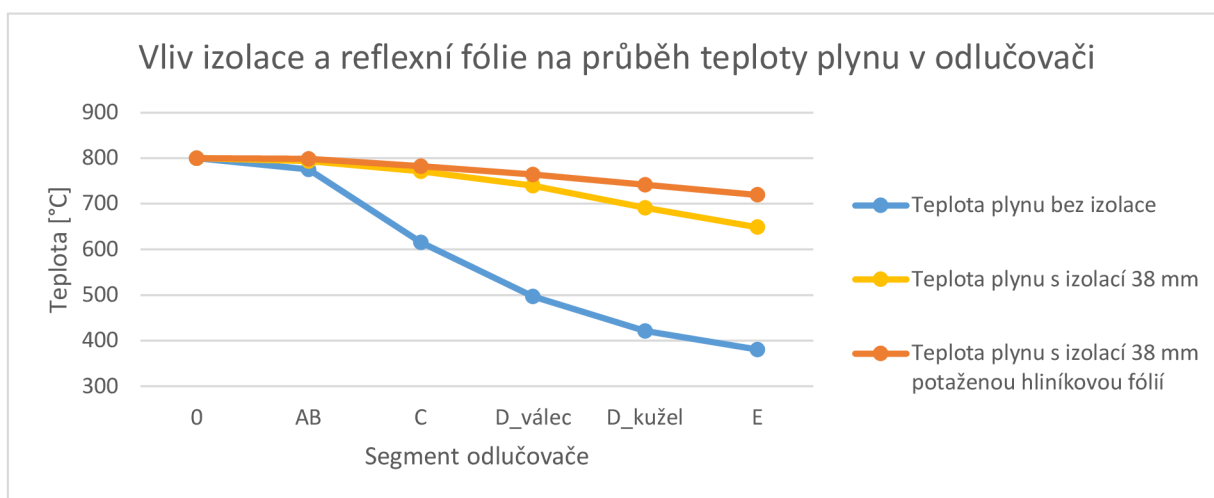


Obrázek 80 – Povrchová teplota stěny odlučovače

Při izolaci zmíněnou rohoží o tloušťce 38 mm dojde k poklesu tepelné ztráty o 64 %, jak je patrné z tabulky na předchozí straně. Dominantní složkou ponížené tepelné ztráty je stále radiace s hodnotou 3,3 kW, která se na její celkové výši podílí z takřka 54 %. Izolaci by bylo vhodné oplechovat či potáhnout reflexivní hliníkovou fólií pro snížení ztráty zářením. Vzhledem k malým rozměrům komponent a tvarové rozmanitosti odlučovače se jeví jako vhodnější užití hliníkové fólie, které jsou nabízeny ve standardních tloušťkách od 0,030 do 0,099 mm. [38] Pro odstínění odlučovače je vhodné zvolit silnější fólii o tloušťce 0,099 mm vzhledem k provozním podmínkám. Emisivita hliníkové fólie je při teplotě 100 °C rovna 0,03 a při teplotě 500 °C je 0,06. [33] Při střední povrchové teplotě stěny izolace 257 °C lze emisivitu zvolit 0,04. Změnu prostupu tepla je možné vzhledem k malému odporu fólie zanedbat.

Užitím hliníkové fólie dojde k poklesu tepelné ztráty zářením z původních 3,3 kW na 0,3 kW a celková tepelná ztráta odlučovače je snížena takřka o polovinu, z původní tepelné ztráty izolovaného odlučovače bez fólie 6,1 kW na 3,3 kW.

Užitím uvedených opatření byla tepelná ztráta zredukována z původních 17 kW, viz tabulka 15, na 3,3 kW, tedy přibližně o 80 %.



Obrázek 81 – Vliv izolace a hliníkové reflexní fólie na teplotu proudícího plynu

## 14 Korekce teoretické odlučivosti odlučovače

Vzhledem k předpokladu teploty plynu 800 °C při výpočtu teoretické odlučivosti je nutné korigovat odlučivost vzhledem ke skutečně zjištěné teplotě plynu vstupujícího do jednotlivých buněk izolovaného a odstíněného odlučovače, která je 782 °C. Princip výpočtu je totožný jako v kapitole 7.1 – Charakteristické parametry suspenze.

- Korekce hustoty plynu, viz rovnice 7.2:

$$\rho_g = 0,332 \frac{kg}{m^3}$$

- Korekce dynamické viskozity plynu, viz rovnice 7.3: [14] [15] [16]

$$\mu_g = 3,938 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$$

- Korekce celkového průtoku plynu:

$$\dot{Q}_{g,celkem} = 179,97 \frac{m^3}{h}$$

- Průtok 1 buňkou:

$$\dot{Q}_g = 18,00 \frac{m^3}{h}$$

Tabulka 16 – Korekce provozních parametrů cyklónu Swift v paralelním uspořádání

Swift				
Průtok plynu $\dot{Q}_g$		18,00	[m <sup>3</sup> /h]	
		5	[m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /h]	
Teplota plynu		792	°C	
Hustota plynu		0,332	[kg/m <sup>3</sup> ]	
Vstupní rychlost $v_{in}$		22,83	[m/s]	
Výstupní rychlost $v_{out}$		19,43		
Max. tečná rychlost $v_{t,max}$		27,84		
Frakční odlučivosti:		Barth	Lapple	
$O_f(PM20)$		100,00	99,34	[%]
$O_f(PM10)$		100,00	97,40	
$O_f(PM5,0)$		99,95	90,34	
$O_f(PM2,5)$		95,85	70,05	
$O_f(PM1,0)$		6,15	27,23	
$O_f(PM0,5)$		0,08	8,55	
Celková odlučivost	$O_c$	92,11	88,89	[%]
tlaková ztráta:				[Pa]
Shepperd a Lapple	$\Delta p$	925,4		
Casal a Benet		291,5		
Ramachandran		781,6		
Krit. velikost částic $D_{50}$		1,63		[μm]



## ZÁVĚR

První část diplomové práce se zabývá rešerší odlučovačů tuhých částic. Jsou zde rozebrány jednotlivé odlučovací metody a jejich vhodnost použití, respektive omezení. Vzhledem k zaměření práce je podstatná část rešerše věnována cyklónům a multicyklónům. Jsou zde rozebrány základní konstrukce, načež navazují poznatky z vědeckých studií posledních let.

Ve druhé části práce jsou porovnány teoretické odlučivosti 3 základních návrhů cyklónů s tečným obdélníkovým vstupem dle běžně užívaných simplexů, a to Lapple, Stairmand a Swift. Ke stanovení odlučivosti je zde užito dvou modelů výpočtu od autorů Barth a Lapple. Dle Bartha dosahuje nejvyšší odlučivosti cyklón Swift, a to 79,5 %, zatímco dle Lappleho je to cyklón Stairmand s hodnotou 77,5 %. Tlaková ztráta daných 3 cyklónů se pohybuje v rozmezí 123-333 Pa v závislosti na modelu výpočtu. Vzhledem k nejvyšší odlučivosti cyklónu Swift dle Bartha, jehož model je považován za přesnější u cyklónů malých průtoků, byl daný cyklón vybrán jako nejvhodnější z výše uvedených.

Geometrickými úpravami vstupní a výstupních částí cyklónu bylo docíleno zvýšení teoretické odlučivosti dle Bartha na 85 % při takřka trojnásobném zvýšení tlakové ztráty, která se pohybuje v rozmezí 294-933 Pa v závislosti na modelu výpočtu. Odlučivost daného cyklónu lze dále zvýšit zapojením vícero kusů za sebe, kdy při zapojení 4 upravených cyklónů Swift o průměru 193 mm lze docílit odlučivosti takřka 89 % dle Bartha při tlakové ztrátě 1178-3734 Pa. Průtok plynu cyklónem je  $50 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$ . Druhou možností zvýšení odlučivosti je zmenšení upraveného cyklónu Swift a jejich paralelní zapojení. Při paralelním zapojení 10 cyklónů Swift o průměru 60,9 mm bylo dosaženo teoretické odlučivosti dle Bartha 92,1 % při tlakové ztrátě 294-933 Pa. Průtok plynu na buňku je při daném zapojení  $5 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$ . Odlučivost lze dále zvýšit zapojením paralelních odlučovačů do série, kdy při zapojení 3 odlučovačů lze dosáhnout odlučivosti 94,3 % dle Bartha, přičemž jsou odloučeny takřka všechny částice větší než  $2,5 \mu\text{m}$ , a to při tlakové ztrátě 883-2800 Pa. Zapojení dalších paralelních odlučovačů do série se nejeví jako vhodné, neboť takové řešení by sice vedlo ke zvýšení odlučivosti ale pouze řádově o desetiny procenta a to při vysokém nárůstu tlakové ztráty. Ze zjištěného je patrné, že paralelní odlučovač složený z buněk s tečným vstupem dosahuje oproti sériovému zapojení vyšší odlučivosti při nižší tlakové ztrátě, a tedy je vhodnější pro čištění jemnějších prachů, nicméně není schopen dosáhnout požadované odlučivosti při daném frakčním složení prachu. Jedná se ovšem o teoretickou hodnotu a bylo by vhodné odlučovač zkonstruovat a skutečnou odlučivost a tlakovou ztrátu stanovit experimentálně. Další zmenšení buněk s tečným vstupem za účelem zvýšení odlučivosti se jeví jako problematické vzhledem k náročnosti výroby a montáži, nicméně bylo by vhodné instalovat deflektory do oblasti odvodu prachu, neboť potlačují zpětné strhávání již odloučeného prachu z výsyvky. Pro další zmenšení buňky by bylo nutné zaměnit tečný vstup za axiální.

Další část práce se zabývala samotným provedením daného paralelního odlučovače, který byl navržen s důrazem na rovnoměrnou distribuci plynu mezi jednotlivé buňky. Znečištěný plyn je veden vertikálně do rozváděcí hlavy, na niž navazují obdélníkové nátrubky cyklónů, které jsou vůči sobě v protichůdném uspořádání. Vyčištěný plyn je z cyklónů veden kruhovými nátrubky do společného prostoru. Jako materiál pro výrobu komponent byla s ohledem na vysokou teplotu plynu zvolena žáruvzdorná ocel třídy 17.

Závěrečná část práce se zabývá výpočtem tepelných ztrát navrženého odlučovače a volbou vhodného izolačního materiálu. Výsledná tepelná ztráta daného odlučovače bez výsyvky dosahuje 17 kW, přičemž teplota plynu poklesne při průchodu odlučovačem z původních  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  na  $380 \text{ }^\circ\text{C}$ . Při izolaci rohoží z keramických vláken o tloušťce 38 mm dojde ke snížení tepelné ztráty o 64 % na 6,1 kW a výstupní teplota plynu je  $649 \text{ }^\circ\text{C}$ . Vzhledem k vysoké ztrátě zářením je vhodné izolaci potáhnout reflexní hliníkovou fólií, díky níž je tepelná

ztráta radiací snížena ze 3,3 kW na 0,3 kW. Užitím zmíněných opatření byla celková tepelná ztráta zredukována z 17 kW na 3,3 kW, tedy o 80 %. Po izolování a odstínění odlučovače poklesne teplota plynu po průchodu odlučovačem z 800 °C na 720 °C.

Vzhledem k předpokladu teploty plynu na vstupu do cyklónů 800 °C byla provedena korekce teoretických odlučivostí paralelního odlučovače, neboť skutečná teplota plynu na vstupu do cyklónů je 782 °C. Vlivem nižší vstupní teploty plynu odlučivost paralelního odlučovače poklesne o 0,03 % dle Bartha, respektive 0,04 % dle Lappleho. Vzhledem k malému rozdílu teplot je zhoršení odlučivosti zanedbatelné.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HEMERKA, Jiří. *Odlučování tuhých částic*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1994. ISBN 80-010-2270-6.
- [2] IBLER, Zdeněk. *Technický průvodce energetika*. 1. Praha: BEN - technická literatura, 2002-2003. ISBN 80-730-0026-1.
- [3] BOZP info. *Požárně technické charakteristiky prachu a jejich význam v technické praxi* [online]. [cit. 2021-12-21]. Dostupné z: <https://www.bozpinfo.cz/pozarne-technicke-charakteristiky-prachu-jejich-vyznam-v-technicke-praxi>
- [4] BURIAN, Stanislav. Výbušnost hořlavých prachů. *Tlak info* [online]. [cit. 2021-12-21]. Dostupné z: <https://www.tlakinfo.com/t.py?t=2&i=1585&h=118>
- [5] ŠTORCH, Otakar. *Průmyslová odlučovací zařízení: určeno výzkumníkům a projektantům odlučovacích zařízení*. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957. Řada energetické literatury. ISBN 1.
- [6] Čištění plynů: *Fyzikální principy odlučování* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: [http://fzp.ujep.cz/ktv/uc\\_texty/pt3/13%20CisteniPlynu.pdf](http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/pt3/13%20CisteniPlynu.pdf)
- [7] FUNK, P. A. Dust cyclone technology. <https://www.researchgate.net/> [online]. [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Representative-dust-cyclone-designs\\_fig1\\_259101451](https://www.researchgate.net/figure/Representative-dust-cyclone-designs_fig1_259101451)
- [8] VAVRO, Karol a Peter HODŮR. *Cyklonové aparáty pre výrobné technológie a ochranu životného prostredia*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 1996. ISBN 80-227-0896-8.
- [9] KHAZAEI, Iman. Numerical investigation of the effect of number and shape of inlet of cyclone and particle size on particle separation. *Heat and Mass Transfer*. 2017, **53**(6), 2009-2016. ISSN 0947-7411. Dostupné z: doi:10.1007/s00231-016-1957-4
- [10] KIM, J. C. a K. W. LEE. Experimental Study of Particle Collection by Small Cyclones. *Aerosol Science and Technology*. 1990, **12**(4), 1003-1015. ISSN 0278-6826. Dostupné z: doi:10.1080/02786829008959410
- [11] NI KETUT, Caturwati, DWINANTO, ATTEGAR et al. Optimization high vortex finder of cyclone separator with computational fluids dynamics simulation. *MATEC Web of Conferences*. 2017, **101**, 5. ISSN 2261-236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/201710103009
- [12] WANG, Lawrence K., Norman C. PEREIRA a Yung-Tse HUNG. *Air Pollution Control Engineering*. 1. New Jersey: Humana Press Inc., 2004. ISBN 1-58829-161-8.
- [13] *Engineering ToolBox: Gases densities* [online]. 2003 [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/gas-density-d\\_158.html](https://www.engineeringtoolbox.com/gas-density-d_158.html)
- [14] *LMNO Engineering, Research, and Software: LMNO Engineering, Research, and Software* [online]. Ohio USA, 2003 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.lmnoeng.com/Flow/GasViscosity.php>
- [15] DAVIDSON, Thomas A. *A Simple and Accurate Method for Calculating Viscosity of Gaseous Mixtures: 1993*. In: . s. 12.

- [16] Methane - Dynamic and Kinematic Viscosity vs. Temperature and Pressure. *Engineeringtoolbox* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/methane-dynamic-kinematic-viscosity-temperature-pressure-d\\_2068.html](https://www.engineeringtoolbox.com/methane-dynamic-kinematic-viscosity-temperature-pressure-d_2068.html)
- [17] DIRGO, John a David LEITH. Cyclone Collection Efficiency: Comparison of Experimental Results with Theoretical Predictions. *Aerosol Science and Technology*. 2007, **4**(4), 401-415. ISSN 0278-6826. Dostupné z: doi:10.1080/02786828508959066
- [18] L. WANG, C. B. PARNELL, B. W. SHAW a R. E. LACEY. A THEORETICAL APPROACH FOR PREDICTING NUMBER OF TURNS AND CYCLONE PRESSURE DROP. *Transactions of the ASABE*. 2006, **49**(2), 491-503. ISSN 2151-0040. Dostupné z: doi:10.13031/2013.20404
- [19] LUCIANO, Raffaello D., Bárbara L. SILVA, Leonardo M. ROSA a Henry F. MEIER. Multi-objective optimization of cyclone separators in series based on computational fluid dynamics. *Powder Technology*. 2018, **325**, 452-466. ISSN 00325910. Dostupné z: doi:10.1016/j.powtec.2017.11.043
- [20] WANG, LINGJUAN. *Theoretical study of cyclone designs*. Administration Building, 400 Bizzell St, College Station, TX 77843, USA, 2004. Disertace. Texas A&M University.
- [21] X10CRAL13 Heat resistant steel. *Virgamet* [online]. Poland [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://virgamet.com/x10cral13-x10cral13-1-4724-x10cral12-h13js-heat-resistant-steel>
- [22] PAVELEK, CSC., Prof. Ing. Milan. *Termomechanika: Přenos tepla vedením*. FSI VUT v Brně, energetický ústav, Odbor termomechaniky a techniky prostředí.
- [23] Reynolds number. *Sciencedirect* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/reynolds-number>
- [24] *Meteo aktuality* [online]. [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://www.pocasimeteoaktuality.cz/meteorologie/atmosfericka-cirkulace/turbulence/>
- [25] *Transmission Pipeline Calculations and Simulations Manual* [online]. 2015 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: doi:10.1016/C2009-0-60912-0
- [26] Prandtl number. <https://www.engineersedge.com/> [online]. 2000 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: [https://www.engineersedge.com/heat\\_transfer/prandtl\\_number\\_13954.htm](https://www.engineersedge.com/heat_transfer/prandtl_number_13954.htm)
- [27] Carbon Monoxide - Specific Heat vs. Temperature. *Engineering ToolBox* [online]. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/carbon-monoxide-d\\_975.html](https://www.engineeringtoolbox.com/carbon-monoxide-d_975.html)
- [28] Carbon Dioxide - Specific Heat of Gas vs. Temperature. *Engineering ToolBox* [online]. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/carbon-dioxide-d\\_974.html](https://www.engineeringtoolbox.com/carbon-dioxide-d_974.html)
- [29] Methane Gas - Specific Heat vs. Temperature. *Engineering ToolBox* [online]. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/methane-d\\_980.html](https://www.engineeringtoolbox.com/methane-d_980.html)
- [30] Specific heat of Hydrogen Gas - H<sub>2</sub> - at temperatures ranging 175 - 6000 K. *Engineering ToolBox* [online]. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/hydrogen-d\\_976.html](https://www.engineeringtoolbox.com/hydrogen-d_976.html)

- [31] Nitrogen Gas - Specific Heat vs. Temperature. *Engineering ToolBox* [online]. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/nitrogen-d\\_977.html](https://www.engineeringtoolbox.com/nitrogen-d_977.html)
- [32] Thermal conductivity of gases chart. *Https://www.engineersedge.com/* [online]. 2000 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: [https://www.engineersedge.com/heat\\_transfer/thermal-conductivity-gases.htm](https://www.engineersedge.com/heat_transfer/thermal-conductivity-gases.htm)
- [33] Emissivity chart. *Kleintools* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.kleintools.com/sites/kleintools/files/instructions/Emissivity-Chart-139697ART.pdf>
- [34] MICHEJEV, Michail Aleksandrovič. *Základy sdílení tepla*. Praha: SNTI, 1952.
- [35] Fluid flow - hydraulic diameter. *Engineeringtoolbox* [online]. 2003 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/hydraulic-equivalent-diameter-d\\_458.html](https://www.engineeringtoolbox.com/hydraulic-equivalent-diameter-d_458.html)
- [36] Rohože Alsiflex. *ProPec* [online]. 2002 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.propec.cz/rohoze-alsiflex>
- [37] JONES, J.M., P.E. MASON a A. WILLIAMS. A compilation of data on the radiant emissivity of some materials at high temperatures. *Journal of the Energy Institute*. 2019, **92**(3), 523-534. ISSN 17439671. Dostupné z: doi:10.1016/j.joei.2018.04.006
- [38] Technické izolace: Silné hliníkové fólie. *IZOLACE-INFO* [online]. 2008 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.izolace-info.cz/katalog/technicke-izolace/1368744-hlinikova-folie-99-5-p.html>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
$O_c$	Celková odlučivost	[%]
$O_{f,(i)}$	Frakční odlučivost	[%]
$\dot{M}_p$	Přiváděný hmotnostní tok prachu do odlučovače	$[kg \cdot s^{-1}]$
$\dot{M}_v$	Vypouštění hmotnostní tok prachu do ovzduší	$[kg \cdot s^{-1}]$
$C_p$	Hmotnostní koncentrace částic v přiváděném prachu	$[mg \cdot m^{-3}]$
$C_v$	Hmotnostní koncentrace částic ve vypouštěném plynu	$[mg \cdot m^{-3}]$
$\dot{V}_p$	Přiváděný objemový průtok plynu	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$\dot{V}_v$	Vypouštěný objemový průtok plynu	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$\Delta p_z$	Tlaková ztráta	[Pa]
$p_{in}$	Tlak na vstupu	[Pa]
$p_{out}$	Tlak na výstupu	[Pa]
$\xi$	Ztrátový součinitel	[–]
$v_{char}$	Střední rychlost v charakteristickém průřezu	$[m \cdot s^{-1}]$
$l$	Charakteristický rozměr	[m]
$K$	Ukazatel jakosti	$[m^3 \cdot kJ^{-1}]$
$\dot{V}$	Objemový průtok plynu	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$P$	Příkon	[W]
$\dot{Q}_g$	Objemový průtok plynu	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$\dot{V}_g$	Objemový průtok plynu	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$T_g$	Teplota plynu	[K]
$\rho_g$	Hustota plynu	$[kg \cdot m^{-3}]$
$\mu_g$	Dynamická viskozita plynu	[Pa · s]
$\rho_t$	Hustota TZL	$[kg \cdot m^{-3}]$
$c_{t,in}$	Vstupní koncentrace TZL	$[g \cdot m^{-3}]$
$c_{t,out}$	Výstupní koncentrace TZL	$[g \cdot m^{-3}]$
$w_i$	Hmotnostní zlomek prachu o dané frakci	[–]
$\varphi_i$	Objemový zlomek plynu ve směsi	[–]
$v_{ts}$	Koncová rychlost částic	$[m \cdot s^{-1}]$
$v_{ts,m}$	Koncová rychlost částic s 50% odlučivostí	$[m \cdot s^{-1}]$
$v_{in}$	Vstupní rychlost plynu do cyklónu	$[m \cdot s^{-1}]$
$v_{out}$	Výstupní rychlost plynu z cyklónu	$[m \cdot s^{-1}]$
$v_{t,max}$	Maximální tečná rychlost plynu	$[m \cdot s^{-1}]$
$h_m$	Výška střední osy cyklónu	[m]
$D_i$	Charakteristický rozměr částice	[m]
$D_e$	Průměr výstupní trouby	[m]
$B$	Průměr otvoru pro odvod tuhých částic	[m]

$H$	Celková výška cyklónu	[m]
$S$	Hloubka zapuštění výstupní trouby	[m]
$h$	Výška válcové části cyklónu	[m]
$D_c$	Průměr cyklónu	[m]
$a$	Charakteristická výška vstupní části cyklónu	[m]
$b$	Charakteristická šířka vstupní části cyklónu	[m]
$\alpha$	Rozměrový parametr	[-]
$\lambda$	Koeficient tření	[-]
$D_{50}$	Kritická velikost částic	[m]
$N$	Počet obrátek plynu v cyklónu	[-]
$N_1$	Počet obrátek ve válcové části cyklónu	[-]
$L_1$	Trajektorie plynu ve válcové části cyklónu	[m]
$N_2$	Počet obrátek v kuželové části cyklónu	[-]
$L_2$	Trajektorie plynu v kuželové části cyklónu	[m]
$n$	Počet sériově zapojených cyklónů	[-]
$\Delta H$	Geometrický parametr	[-]
$S_{in}$	Vstupní průřez	[m <sup>2</sup> ]
$S_{out}$	Výstupní průřez	[m <sup>2</sup> ]
$\dot{Q}$	Tepelný tok	[W]
$S$	Teplosměnná plocha	[m <sup>2</sup> ]
$T_{w1}$	Teplota stěny ze strany horké tekutiny	[K]
$T_{w2}$	Teplota stěny ze strany studené tekutiny	[K]
$T_l$	Teplota proudící tekutiny	[K]
$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti	[W · (m · K) <sup>-1</sup> ]
$h$	Tloušťka stěny	[m]
$L$	Délka tělesa	[m]
$\Delta T$	Rozdíl teplot	[K]
$r_2$	Vnější poloměr tělesa	[m]
$r_1$	Vnitřní poloměr tělesa	[m]
$Re$	Reynoldsovo číslo	[-]
$Nu$	Nusseltovo číslo	[-]
$Pr$	Prandtlovo číslo	[-]
$Gr$	Grashoffovo číslo	[-]
$v$	Rychlost proudění tekutiny	[m · s <sup>-1</sup> ]
$d$	Charakteristický rozměr	[m]
$\nu$	Kinematická viskozita	[m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> ]
$\alpha$	Součinitel přestupu tepla	[W · (m <sup>2</sup> · K) <sup>-1</sup> ]
$a$	Teplotní vodivost	[m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> ]
$c_p$	Měrná tepelná kapacita	[J · (kg · K) <sup>-1</sup> ]
$Y$	Teplotní objemová roztažnost	[K <sup>-1</sup> ]

$g$	Tíhové zrychlení	$[m \cdot s^{-2}]$
$E$	Hustota zářivého toku	$[W \cdot m^{-2}]$
$\sigma$	Stefan-Boltzmannova konstanta	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$
$T$	Teplota povrchu zářiče	$[K]$
$T_o$	Teplota okolí	$[K]$
$\varepsilon_z$	Emisivita zářiče	$[-]$
$S_z$	Plocha zářiče	$[m^2]$
$\lambda_g$	Tepelná vodivost plynu	$[mW \cdot (m \cdot K)^{-1}]$
$S_{A,1}$	Vnitřní povrch dýzy	$[m^2]$
$S_{A,2}$	Vnější povrch dýzy	$[m^2]$
$r_{A,IN}$	Poloměr dýzy na vstupu	$[m]$
$r_{A,OUT}$	Poloměr dýzy na výstupu	$[m]$
$D_A$	Průměr ekvivalentního válce	$[m]$
$R_g$	Odpor plynu	
$R_t$	Odpor tělesa	$[\frac{m \cdot K}{W}]$
$R_{vz}$	Odpor vzduchu	
$\dot{Q}_p$	Ztráta tepla prostupem	$[W]$
$T_{vz}$	Teplota vzduchu	$[K]$
$T_w$	Teplota stěny	$[K]$
$\dot{Q}_r$	Ztráta tepla radiací	$[W]$



## SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obrázek 1 – Feretův a Martinův průměr [1]  
Obrázek 2 – Úbytek materiálu vlivem abraze v závislosti na úhlu dopadu:  
a) měkký materiál b) tvrdý a křehký materiál [1]  
Obrázek 3 – Adhezni napětí na rozhraní fází a krajní úhel  $\alpha$  [1]  
Obrázek 4 – Závislost vzrůstu tlaku v čase při výbuchu [1]  
Obrázek 5 – Závislost frakční odlučivosti odlučovačů na velikosti částic [1]  
Obrázek 6 – Přibližná mez odlučivosti PMO [5]  
Obrázek 7 – Výsledná sedimentační rychlost částice  $V_s$  [6]  
Obrázek 8 – Schéma lamelového odlučovače [1]  
Obrázek 9 – Schéma žaluziového odlučovače s rovinnou mříží [1]  
Obrázek 10 – Základní provedení vírových odlučovačů dle trajektorie proudění [1]  
Obrázek 11 – Vliv turbulencí na koncentraci prachu v plynu [5]  
Obrázek 12 – Stavba cyklónů s tečným, spirálovým a šroubovitým vstupem [1]  
Obrázek 13 – Cyklón se šroubovitým víkem a jeho frakční odlučivost při průměru 3700 mm [5]  
Obrázek 14 – Davidsonův cyklón D-9a o průměru 2300 mm a jeho frakční odlučivost [5]  
Obrázek 15 – Suché mechanické cyklóny LIOT: vlevo typ B, vpravo typ H [5]  
Obrázek 16 – Butakovův cyklón: vlevo původní návrh, vpravo upravená verze [5]  
Obrázek 17 – Hartmannův cyklón [5]  
Obrázek 18 – Van Tongerenovy odlučovače: vlevo dvojitý odlučovač, vpravo cyklón s prachovou kapsou [5]  
Obrázek 19 – Vliv délky zapuštění výstupní trouby a závislost celkové odlučivosti cyklónu na koncentraci prachu v plynu u cyklónu s prachovou kapsou a bez ní [5]  
Obrázek 20 – Van Tongerenův cyklón se šroubovitým žlábkem [5]  
Obrázek 21 – Princip Feifelova cyklónu [5]  
Obrázek 22 – Cyklón Korsá [5]  
Obrázek 23 – Skupinové zapojení cyklónů Korsá [5]  
Obrázek 24 – Schéma oběžného proudění v buňkách [5]  
Obrázek 25 – Bateriový odlučovač CG-1 a jeho frakční odlučivost při dvou buňkách o průměru 150 mm [5]  
Obrázek 26 – vlevo: Buňka odlučovače Prat-Daniel, vpravo: Frakční odlučivost odlučovače Prat-Daniel s buňkami o průměru 150 mm [5]  
Obrázek 27 – Možnosti konstrukčního provedení bateriového odlučovače Prat-Daniel [5]  
Obrázek 28 – Bateriový odlučovač Feifel [5]  
Obrázek 29 – Bateriový odlučovač VTI – konstrukce a frakční odlučivost [5]  
Obrázek 30 - Bateriový odlučovač Schicht [5]  
Obrázek 31 – Bateriový odlučovač Sirocco – konstrukce a frakční odlučivost [5]  
Obrázek 32 – Buňka bateriového odlučovače Dunlab II ES-2 [5]  
Obrázek 33 – Optimalizace konstrukce cyklónů pro dosažení vyšší účinnosti [7]  
Obrázek 34 – Základní rozměry běžně používaných cyklónů [7]  
Obrázek 35 – Velikost tečných rychlostí v simulovaných modelech [9]  
Obrázek 36 – Vliv konstrukce vstupních nátrubků na frakční odlučivost [9]  
Obrázek 37 – Rozměry cyklónu [10]  
Obrázek 38 – Frakční odlučivosti měřených cyklónů pro různé průtoky:  
(o) 18.4 l/min; (□) 12.4 l/min; (Δ) 8.8 l/min. [10]  
Obrázek 39 – Rotoklon se lžičkovitými lopatkami (vlevo) a se žlábkem (vpravo) [5]  
Obrázek 40 – vlevo: Sprchová věž, vpravo: Sprchová komora [1]

- Obrázek 41 – Odlučovač se skrápěnou pohyblivou vrstvou [1]  
Obrázek 42 - Hladinový odlučovač s tečným přívodem plynu [1]  
Obrázek 43 – zleva: Odlučovač se smáčenými stěnami,  
vířníkový odlučovač a pěnový odlučovač [1]  
Obrázek 44 - Proudový odlučovač a možnosti přívodu kapaliny do Venturiho trubice [1]  
Obrázek 45 –vlevo: základní rozdělení Elektrostatických odlučovačů;  
vpravo: závislost výboje na poloměru nabíjecí elektrody [1] [5]  
Obrázek 46 – Závislost celkové odlučivosti EO na: a) přiváděném proudu při různých intervalech oklepávání; b) rychlosti plynu při různých intervalech oklepávání; c) rychlosti plynu při rozdílných koncentracích prachu [5]  
Obrázek 47 – vlevo: Závislost celkové odlučivosti na zanesení filtrační vrstvy; vpravo: průběh tlakové ztráty a celkové odlučivosti se zanesením filtrační vrstvy [1]  
Obrázek 48 – vlevo: kruhový hadicový filtr se zpětným proplachem;  
vpravo: řadový hadicový filtr s pulsním profukem [1]  
Obrázek 49 – Kapsový filtr s regenerací zpětným proplachem;  
komory A, B, C jsou v provozu, komora D je čištěna [1]  
Obrázek 50 – vlevo: Dvoustupňový odlučovač se zrnitou vrstvou [1]  
Obrázek 51 – Základní rozměry cyklónu Lapple [12]  
Obrázek 52 – Základní rozměry cyklónu Stairmand [12]  
Obrázek 53 – Základní rozměry cyklónu Swift [12]  
Obrázek 54 – Geometrická podobnost cyklónů pro daný průtok dle simplexů  
Obrázek 55 – Teoretická odlučivost jednotlivých variant cyklónů dle Bartha  
Obrázek 56 – Schéma sériového zapojení cyklonového odlučovače [19]  
Obrázek 57 – Vliv změny geometrie na odlučivost cyklónu Swift  
Obrázek 58 – Závislost teoretické odlučivosti dle Bartha na počtu cyklónů Swift v sérii  
Obrázek 59 – Závislost teoretické odlučivosti dle Lappleho na počtu cyklónů Swift v sérii  
Obrázek 60 – Schéma paralelního zapojení upravených cyklónů Swift  
Obrázek 61 – Model upraveného cyklónu Swift o vnitřním průměru 60,9 mm  
Obrázek 62 – Základní rozměry buňky o průměru 60,9 mm  
Obrázek 63 - Vliv geometrie na změnu tlakové ztráty cyklónu Swift  
Obrázek 64 – Výsledné křivky odlučivosti jednotlivých variant dle Bartha  
Obrázek 65 – Výše tlakových ztrát jednotlivých variant  
Obrázek 67 – Konstrukční rozměry cyklónu  
Obrázek 68 – Model rozváděcí hlavy  
Obrázek 69 - Rozměry rozváděcí hlavy  
Obrázek 70 – Rozměry armatury pro odvod plynu  
Obrázek 71 – Model armatury pro odvod plynu  
Obrázek 72 –Rozměry výsyvky  
Obrázek 73 - Model výsyvky  
Obrázek 74 – Přenos tepla vedením rovinnou a válcovou stěnou [22]  
Obrázek 75 - Laminární a turbulentní proudění [24]  
Obrázek 76 – Model rozváděcí hlavy  
Obrázek 77 – Tepelná rohož Alsiflex-1260 [36]  
Obrázek 78 – Vliv izolace na teplotu proudícího plynu  
Obrázek 79 – Segmenty odlučovače  
Obrázek 80 – Povrchová teplota stěny odlučovače  
Obrázek 81 – Vliv izolace a hliníkové reflexní fólie na teplotu proudícího plynu

## **SEZNAM TABULEK**

- Tabulka 1 – Charakteristické rozměry cyklónů [10]
- Tabulka 2 – Hodnoty zjištěné během simulace vlivu hloubky zapuštění na odlučivost [11]
- Tabulka 3 – Základní parametry suspenze
- Tabulka 4 - Numericky stanovené trajektorie pro různé modely cyklónu [18]
- Tabulka 5 – Návrhy základních variant cyklónů
- Tabulka 6 – Vliv úpravy geometrie cyklónu Swift na jeho odlučivost
- Tabulka 7 – Změna odlučivosti cyklónu Swift při sériovém zapojení
- Tabulka 8 – Provozní parametry a rozměry cyklónu Swift pro paralelní zapojení
- Tabulka 9 – Zvýšení odlučivosti zapojením více paralelních odlučovačů za sebe
- Tabulka 10 – Parametry pro výpočet tepelných ztrát
- Tabulka 11 – Tepelné ztráty rozváděcí hlavy
- Tabulka 12 – Tepelné ztráty příváděcích nátrubků
- Tabulka 13 – Tepelné ztráty cyklónů
- Tabulka 14 – Tepelné ztráty odvodních trub
- Tabulka 15 – Vliv izolační rohože na velikost tepelných ztrát
- Tabulka 16 – Korekce provozních parametrů cyklónu Swift v paralelním uspořádání

## **SEZNAM PŘÍLOH**

- 1      Cyklón s levým vstupem
- 2      Cyklón s pravým vstupem
- 3      Rozváděcí hlava
- 4      Výsypka
- 5      Odvod plynu
- 6      Sestava paralelního odlučovače