

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

**Třístupňový impaktor pro měření emisí
tuhých částic**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Červený** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **437702**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav techniky prostředí**
Studijní program: **Inteligentní budovy**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Třístupňový impaktor pro měření emisí tuhých částic

Název diplomové práce anglicky:

Three-Stage Impactor for Measuring of Solid Particles Emission

Pokyny pro vypracování:

Zhodnoťte problematiku emisí a imisí tuhých znečišťujících látek v ČR a zdůvodněte potřebu měření emisí frakcí částic PM₁₀, PM_{2,5} a PM_{1,0}. Konstrukční návrh kaskádního impaktoru pro měření emisí frakcí PM₁₀, PM_{2,5} a PM_{1,0} pro rozsah objemových průtoků vzorku plynu cca 2 až 6 m³/hod. Posuďte vliv korekce aerodynamického odporu částice na skluz na stanovení hlavních rozměrů impaktoru. Stanovte požadavky na regulaci průtoku impaktorem jako třídiče PM₁₀, PM_{2,5} a PM_{1,0} pro vzduch s nízkou vlhkostí, spaliny při spalování černého a hnědého uhlí a teplotní rozsah 0 až 200 °C.

Seznam doporučené literatury:

Hemerka J., Braniš M., Vybíral P.: Cyclones as PM₁₀ and PM_{2,5} emission measurement classifiers, Proceedings of Air Pollution XVIII, Kos, 2010, pp. 395 -406.
Marple V. A., Willeke K.: Inertial impactors - Theory, design and use, published in: Fine particles - Aerosol generation, measurement, sampling and analysis, Academic Press, New York, 1976, pp. 411 - 445.
Dlouhý T.: Výpočty kotlů a spalinových výměníků, Vydavatelství ČVUT, Praha, 1999.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Jiří Hemerka, CSc., ústav techniky prostředí FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

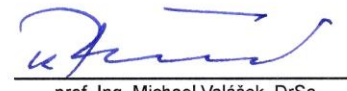
Datum zadání diplomové práce: **24.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **24.06.2019**

Platnost zadání diplomové práce:


doc. Ing. Jiří Hemerka, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce


doc. Ing. Vladimír Zmrhal, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

24.4.2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Třístupňový impaktor pro měření emisí tuhých částic“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Jiřího Hemerky, CSc., s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Broumově, dne 24. 6. 2019

.....
Ondřej Červený

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce doc. Ing. Jiřímu Hemerkovi, CSc., za odborné vedení a čas věnovaný konzultacím, rodině za psychickou a materiální podporu během celého studia a přátelům za udržování dobré nálady.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá problematikou znečištění ovzduší tuhými znečišťujícími látkami (TZL) a jejich měření. V úvodní části práce je zpracována rešerše na téma emisí a imisí v České republice. Jsou zde popsány základní právní předpisy, které se této problematice dotýkají. Dále pak vývoj a stav ovzduší se zaměřením na TZL a zdravotní rizika, která mohou tyto látky pro člověka představovat. V praktické části práce je pak popsán postup při návrhu třístupňového impaktoru a jeho konstrukční návrh. V rámci návrhu je zde zhodnocen vliv Cunninghamova součinitele na skluz. Po samotném návrhu impaktoru jsou vypočteny regulační křivky pro případy měření suchého vzduchu a spalin černého a hnědého uhlí. V této části je celkem podrobně zpracovaný výpočet vlastností (hustoty a viskozity) těchto spalin. Pro vyhodnocení měření s impaktorem jsou zde uvedeny základní vzorce pro výpočet koncentrací jednotlivých frakcí PM_x , přepočet na standardní podmínky a také chyby, které se mohou při měření vyskytnout a ovlivnit tak výsledky.

Abstract

This diploma thesis focuses on the issue of fine dust air pollution and its measurement. The thesis first provides a theoretical overview of the emissions and immissions topic in the Czech Republic. The section then presents the legal frame related to the subject. Next, the past development and the current condition of fine dust air pollution in the Czech Republic is described and the health risks related to the pollution are examined. The practical part of the thesis includes a proposal of a three stage impactor calculation and its design. The proposal also examines the way the Cunninghams' slip factor influences the design of the impactor. After that, the regulation curves are calculated for the cases when dry air and flue gasses of hard coal and lignite are measured. This part contains a rather detailed calculation method for a determination of characteristics (density and viscosity) of these flue gasses. For the evaluation of the data obtained from the measuring with the impactor, the basic equations for calculation of individual PM_x fraction concentration and conversion to standard conditions are given and also measurement uncertainties which can occur and influence the results are discussed.

Obsah

Seznam použitých symbolů	8
1. Úvod.....	10
2. Legislativa v ochraně ovzduší.....	11
2.1 Imisní limity.....	11
2.2 Emisní limity.....	12
2.2.1 Zdroje o tepelném příkonu 300 kW a nižším	14
2.3 Měření imisí.....	17
2.4 Měření emisí	18
3. Vývoj stavu ovzduší v ČR	19
3.1 Částice PM _x	20
4. Nebezpečí expozice suspendovaným částicím	24
5. Možnosti měření TZL.....	27
5.1 Gravimetrická metoda.....	27
5.2 Fotometrická metoda	28
5.3 Radiometrická metoda	29
5.4 Metoda využívající triboelektrický jev	30
6. Ekvivalentní velikost částice	31
7. Návrh třístupňového impaktoru	32
7.1 Výpočetní část návrhu	32
7.1 Poznámky ke konstrukci impaktoru	36
8. Měření a vyhodnocení	41
8.1 Regulace průtoku	44
8.1.1 Suchý vzduch.....	44
8.1.2 Spaliny uhlí.....	45
8.2 Zdroje nepřesností měření	48
8.2.1 Problematika měření u malých spalovacích zdrojů	50

9. Závěr	51
Citovaná literatura.....	52
Seznam příloh	54

Seznam použitých symbolů

C	[-]	Cunnighamův korekční součinitel na skluz
C_{PM1}	[mg/m ³]	koncentrace frakce PM ₁ v odpadním plynu
$C_{PM2,5}$	[mg/m ³]	koncentrace frakce PM _{2,5} v odpadním plynu
C_{PM10}	[mg/m ³]	koncentrace frakce PM ₁₀ v odpadním plynu
$CO_{2,act}$	[-]	skutečný obsah CO ₂ ve spalinách
$CO_{2,max}$	[-]	maximální obsah CO ₂ ve spalinách
D	[m]	průměr trysky stupně impaktoru
$D_{\check{c}}$	[m]	průměr částice
L	[m]	délka trysky stupně impaktoru
M_1	[mg]	hmotnost prachu zachycená na prvním stupni impaktoru
M_2	[mg]	hmotnost prachu zachycená na druhém stupni impaktoru
M_3	[mg]	hmotnost prachu zachycená na třetím stupni impaktoru
M_f	[mg]	hmotnost prachu zachycená na filtru impaktoru
M_v	[-]	korekční faktor pro výpočet v
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
S	[-]	vzdálenost ústí trysky od impakční plochy
Stk	[-]	Stokesovo číslo
T	[K]	termodynamická teplota
T_n	[K]	standardní termodynamická teplota
V	[m ³]	objem vzorku plynu
V	[m ³ /s]	objemový průtok impaktorem
V_n	[m ³]	objem vzorku plynu za standardních podmínek
f_n	[kg/m ³]	fiktivní vlhkost plynu za normálních podmínek
n	[-]	počet trysek stupně impaktoru
p	[Pa]	tlak vzduchu

p_{atm}	[Pa]	atmosférický tlak
p_n	[Pa]	standardní tlak vzduchu
p_{st}	[Pa]	rozdíl statického tlaku v místě odběru a atmosférického tlaku
r	[J/kg.K]	měrná plynová konstanta vzduchu
v	[m/s]	rychlost proudění ve trysce impaktoru
α	[-]	součinitel přebytku vzduchu
η	[Pa.s]	dynamická viskozita
λ	[m]	střední volná dráha molekul
ν	[m ² /s]	kinematická viskozita
ν_{mean}	[m ² /s]	střední kinematická viskozita
ρ	[kg/m ³]	hustota tekutiny
$\rho_{\check{c}}$	[kg/m ³]	hustota částice
$\rho_{d,n}$	[kg/m ³]	hustota suchých spalin za standardních podmínek
ρ_n	[kg/m ³]	hustota spalin za standardních podmínek
$\rho_{w,n}$	[kg/m ³]	hustota vodní páry za standardních podmínek
ω_d	[-]	objemový poměr suchých spalin
ω_w	[-]	objemový poměr vodní páry

1. Úvod

Tato diplomová práce se zabývá problematikou emisí tuhých znečišťujících látek a jejich měření. V České republice se sice stav ovzduší z hlediska znečištění od devadesátých let zlepšuje, ale i přesto dochází k překračování imisních limitů. Největší problémy s kvalitou ovzduší jsou na našem území v okolí Ostravy.

Motivací k tříděnému odběru TZL z odpadního plynu je fakt, že současná legislativa stanovuje emisní limity pro celkové TZL v plynu, ovšem imisní limity jsou stanoveny zvláště pro částice velikostních frakcí PM_{10} a $PM_{2,5}$. Je asi zřejmé, že emise mají přímý vliv na stav ovzduší (imise), a tak je tento „nedostatek“ v legislativě poněkud závažnější.

Výstupem této práce má tedy být návrh zařízení, třídící prachové částice v odpadním plynu na frakce PM_{10} , $PM_{2,5}$ a PM_1 . Ze zákona není povinnost měření částic PM_1 ani u imisních limitů. Měření této jemné frakce má však velký význam z hlediska jejího nebezpečí pro člověka. Čím je částice menší, tím snáz proniká dýchacím ústrojím do těla. U malých spalovacích zdrojů, kam patří i vytápění domácností, tvoří částice frakce PM_1 až 90 %_{hm}. A podle dat Českého hydrometeorologického ústavu je právě sektor lokální vytápění domácností nejvýraznějším producentem částic PM_x . Velikostní složení prachu produkovaného různými průmyslovými procesy, bylo zpracováno např. v německé studii [24], kde je u jednotlivých zdrojů uvedena celková koncentrace TZL v odpadním plynu a zároveň procentuální zastoupení frakcí PM_{10} , $PM_{2,5}$ a PM_1 .

Krom samotného konstrukčního návrhu třístupňového impaktoru je dalším úkolem určit, jak impaktor regulovat v závislosti na teplotě odpadního plynu. Tímto plynem bude suchý vzduch a spaliny černého a hnědého uhlí.

2. Legislativa v ochraně ovzduší

V současné době je hlavním právním předpisem zabývajícím se ochranou ovzduší zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší platný od 1. září 2012. Tento zákon zrušil a nahradil do té doby platný zákon č. 86/2002 Sb., jeho novely a právní předpisy na něj navazující. Zákon č. 201/2012 Sb. byl novelizován zákonem č. 64/2014 Sb., který upravil část zákona týkající se kontrolních orgánů. A dále ještě zákonem č. 87/2014 Sb., který kromě dalších, spíše formálních změn upravil požadavky pro na trh nově uváděné stacionární zdroje na kapalná nebo plynná paliva o jmenovitém tepelném příkonu 300 kW a nižším, platné od 1. ledna 2014. Od 1. ledna 2018 však vstoupily v platnost požadavky nové. [1]

K zákonu o ochraně ovzduší se váží dvě vyhlášky zabývající se imisní a emisní problematikou. Je to vyhláška č. 330/2012 Sb., která popisuje způsoby a podmínky hodnocení úrovně znečištění, tedy imisí. Vyhláška č. 415/2012 Sb. stanovuje emisní limity, tedy limity znečišťování a způsoby stanovení úrovně emisí. Tato vyhláška již byla novelizována vyhláškami č. 155/2014 Sb. a č. 406/2015. [2] [3]

Dalšími legislativními předpisy dotýkajícími se problematiky ochrany ovzduší jsou vyhláška č. 312/2012 Sb., o stanovení požadavků na kvalitu paliv používaných pro vnitrozemská a námořní plavidla z hlediska ochrany ovzduší. Novelou této vyhlášky je vyhláška č. 154/2014 Sb. Dále nařízení vlády č. 351/2012 Sb., o kritériích udržitelnosti biopaliv. A nařízení vlády č. 56/2013 Sb., o stanovení pravidel pro zařazení silničních motorových vozidel do emisních kategorií a o emisních plaketách.

2.1 Imisní limity

Imisní limit je maximální zákonem dovolená hodnota znečištění ovzduší danou látkou. Uvádějí se jako hmotnost znečišťující látky přítomné v metru krychlovém vzduchu za normálních podmínek, tj. teploty 273,15 K a tlaku 101 325 Pa. Tato hmotnostní koncentrace se určuje jako průměr z určitého měřeného časového úseku, který je pro různé látky jiný. Pro imisní limity vyhlášené pro ochranu zdraví lidí, které jsou uvedeny v tabulce č. 1, je navíc stanoven dovolený počet překročení této hodnoty v průběhu jednoho kalendářního roku. V tabulce č. 2 jsou uvedeny imisní limity vyhlášené pro ochranu ekosystémů a vegetace. Dále zákon stanovuje imisní limity pro celkový obsah znečišťující látky v částicích PM₁₀ vyhlášené pro ochranu zdravých lidí a imisní limity pro troposférický ozon. [1]

Tab. 1: Imisní limity vyhlášené pro ochranu zdraví lidí a maximální počet jejich překročení [1]

Znečišťující látka	Doba průměrování	Imisní limit	Max. počet překročení
Oxid siřičitý	1 hodina	350 $\mu\text{g.m}^{-3}$	24
Oxid siřičitý	24 hodin	125 $\mu\text{g.m}^{-3}$	3
Oxid dusičitý	1 hodina	200 $\mu\text{g.m}^{-3}$	18
Oxid dusičitý	1 kalendářní rok	40 $\mu\text{g.m}^{-3}$	0
Oxid uhelnatý	Maximální denní osmihodinový průměr	10 mg.m^{-3}	0
Benzen	1 kalendářní rok	5 $\mu\text{g.m}^{-3}$	0
Částice PM ₁₀	24 hodin	50 $\mu\text{g.m}^{-3}$	35
Částice PM ₁₀	1 kalendářní rok	40 $\mu\text{g.m}^{-3}$	0
Částice PM _{2,5}	1 kalendářní rok	25 $\mu\text{g.m}^{-3}$	0
Olovo	1 kalendářní rok	0,5 $\mu\text{g.m}^{-3}$	0

Tab. 2: Imisní limity vyhlášené pro ochranu ekosystémů a vegetace [1]

Znečišťující látka	Doba průměrování	Imisní limit
Oxid siřičitý	kalendářní rok a zimní období (1. října – 31. března)	20 $\mu\text{g.m}^{-3}$
Oxidy dusíku	1 kalendářní rok	30 $\mu\text{g.m}^{-3}$

2.2 Emisní limity

Emisní limity jsou maximální dovolené úrovně znečišťování. Stejně jako imisní limity, jsou v zákoně uvedeny jako hmotnostní koncentrace za normálních podmínek. Rozlišují se emisní limity obecné a specifické. Obecné emisní limity jsou stanoveny pro konkrétní znečišťující látky nebo jejich skupiny a jsou uvedeny v příloze č. 9 k vyhlášce 415/2012. Specifické emisní limity jsou stanoveny pro vyjmenované stacionární zdroje. Ty jsou rozděleny do 11 základních skupin, které se pak dále dělí a jsou uvedeny v příloze č. 2 k zákonu č. 201/2012 Sb. Základních 11 skupin je shrnuto v tabulce č. 3. Samotné

specifické emisní limity jsou uvedeny v příloze č. 2 k vyhlášce 415/2012 Sb. V této vyhlášce jsou krom samotných limitů sepsány i podmínky provozu těchto zařízení. Specifické emisní limity jsou nadřazeny obecným a jimi stanovené hodnoty mohou být přísnější. Obecné emisní limity jsou uvedeny v tabulce č. 4. Vzhledem k počtu vyjmenovaných stacionárních zdrojů zde nebudu uvádět všechny specifické emisní limity, ale pro příklad jsou v tabulce č. 5 k vidění specifické emisní limity pro kotle a teplovzdušné stacionární zdroje.

Tab. 3: Základní dělení vyjmenovaných stacionárních zdrojů [1]

1	Energetika – spalování paliv
2	Tepelné zpracování odpadu, nakládání s odpady a odpadními vodami
3	Energetika – ostatní
4	Výroba a zpracování kovů a plastů
5	Zpracování nerostných surovin
6	Chemický průmysl
7	Potravinářský, dřevozpracující a ostatní průmysl
8	Chovy hospodářských zvířat
9	Použití organických rozpouštědel
10	Nakládání s benzinem
11	Ostatní zdroje

Tab. 4: Obecné emisní limity [3]

Název znečišťující látky	Hmotnostní tok [g/h]	Hmotnostní koncentrace [mg/m ³]
Tuhé znečišťující látky	≤2500	200
	>2500	150
Oxidy síry vyjádřené jako oxid siřičitý	>20000	2500
Oxidy dusíku vyjádřené jako oxid dusičitý	>10000	500
Oxid uhelnatý	>5000	500
Organické látky vyjádřené jako celkový organický uhlík (TOC)	>3000	150

Amoniak a soli amonné vyjádřené jako amoniak	>500	50
Sulfan	>100	10
Sírouhlík	>100	20
Chlor a jeho plynné anorganické sloučeniny vyjádřené jako HCl	>500	50
Fluor a jeho plynné anorganické sloučeniny vyjádřené jako HF	>100	10

Tab. 5: Specifické emisní limity platné od 1. ledna 2018 [3]

Druh paliva	Specifické emisní limity [mg.m ⁻³]											
	> 0,3-1 MW				> 1-5 MW				> 5-50 MW			
	SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO
Pevné palivo	-	600	100	400	-	500	50	500	1500	500	30	300
Kapalné palivo	-	130	-	80	-	130	50	80	1500	130	30	80
Plynné palivo a zkapalněný plyn	-	100	-	50	-	100	-	50	-	450	-	50

2.2.1 Zdroje o tepelném příkonu 300 kW a nižším

Mezi vyjmenovanými stacionárními zdroji chybí ty o tepelném příkonu 300 kW a nižším, což jsou výkony kotlů, se kterými se běžně setkáváme v domácnostech. Požadavky na zařízení z této kategorie nově uváděná na trh najdeme v příloze č. 10 k zákonu č. 201/2012 Sb. Jsou zde požadavky pro kotle na tuhá, kapalná a plynná paliva platné od 1. ledna 2014 a 1. ledna 2018. V příloze č. 11 jsou pak požadavky pro již pracující zařízení spalující pevná paliva a ty zde v tabulce č. 6 uvádím. [1]

Tab. 6: Minimální emisní požadavky na spalovací stacionární zdroj na pevná paliva o jmenovitém tepelném příkonu od 10 do 300 kW včetně, který slouží jako zdroj tepla pro teplovodní soustavu ústředního vytápění [1]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný příkon [kW]	Mezní hodnoty emisí		
			CO	TOC	TZL
			mg.m ⁻³		
Ruční	Biologické	≤65	5000	150	150
		>65 až 187	2500	100	150
		>187 až 300	1200	100	150
	Fosilní	≤65	5000	150	125
		>65 až 187	2500	100	125
		>187 až 300	1200	100	125
Samočinná	Biologické	≤65	3000	100	150
		>65 až 187	2500	80	150
		>187 až 300	1200	80	150
	Fosilní	≤65	3000	100	125
		>65 až 187	2500	80	125
		>187 až 300	1200	80	125

Požadavky pro zařízení na pevná paliva nově uváděná na trh od 1. ledna 2018 odpovídají požadavkům uvedeným v normě ČSN EN 303-5:2013 pro zařízení třídy 4. Jak je vidět v tabulkách č. 7, 8 a 9, tato norma rozlišuje dále třídu 3 a 5. Třídy 1 a 2 byly s jejím zavedením zrušeny. Rozdílem mezi touto normou a zákonem o ovzduší však zůstává to, že v zákoně o ovzduší jsou hodnoty uvedeny pro jmenovitý příkon zařízení, kdežto v normě jsou pro jmenovité tepelné výkony. V normě je horní hranice výkonu 500 kW na rozdíl od 300kW v zákoně. V tabulce č. 8 je označení OGC ekvivalentní s označením TOC (celkový organický uhlík) užívaném v zákoně o ochraně ovzduší a v tabulce č. 9 je prach ekvivalentní TZL (tuhé znečišťující látky). [6]

Tab. 7: Mezní hodnoty emisí pro CO u kotlů na pevná paliva dle ČSN EN 303-5:2013 [6]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí pro CO		
			třída 3	třída 4	třída 5
			mg.m ⁻³		
Ruční	Biologické	≤ 50	5 000	1200	700
		> 50 až 150	2 500		
		> 150 až 500	1 200		
	Fosilní	≤ 50	5 000		
		> 50 až 150	2 500		
		> 150 až 500	1 200		
Samočinná	Biologické	≤ 50	3 000	1000	500
		> 50 až 150	2 500		
		> 150 až 500	1 200		
	Fosilní	≤ 50	3000		
		> 50 až 150	2 500		
		> 150 až 500	1 200		

Tab. 8: Mezní hodnoty emisí pro OGC u kotlů na pevná paliva dle ČSN EN 303-5:2013 [6]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný příkon [kW]	Mezní hodnoty emisí pro OGC		
			třída 3	třída 4	třída 5
			mg.m ⁻³		
Ruční	Biologické	≤ 50	150	50	30
		> 50 až 150	100		
		> 150 až 500	100		
	Fosilní	≤ 50	150		
		> 50 až 150	100		
		> 150 až 500	100		
Samočinná	Biologické	≤ 50	100	30	20
		> 50 až 150	80		
		> 150 až 500	80		
	Fosilní	≤ 50	100		
		> 50 až 150	80		
		> 150 až 500	80		

Tab. 9: Mezní hodnoty emisí pro prach u kotlů na pevná paliva dle ČSN EN 303-5:2013 [6]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný příkon [kW]	Mezní hodnoty emisí pro prach		
			třída 3	třída 4	třída 5
			mg.m ⁻³		
Ruční	Biologické	≤ 50	150	75	60
		> 50 až 150	150		
		> 150 až 500	150		
	Fosilní	≤ 50	125		
		> 50 až 150	125		
		> 150 až 500	125		
Samočinná	Biologické	≤ 50	150	60	40
		> 50 až 150	150		
		> 150 až 500	150		
	Fosilní	≤ 50	125		
		> 50 až 150	125		
		> 150 až 500	125		

Jistý rozpor mezi zmíněnou normou a zákonem by mohl nastat díky pravidlu pro sčítání jmenovitých tepelných výkonů. Když by součet výkonů v kotelně jednoho provozovatele přesáhl 300 kW, podle zákona by se takový zdroj zařadil mezi vyjmenované stacionární zdroje s kódem 1.1 Spalování paliv v kotlích o celkovém jmenovitém tepelném příkonu od 0,3 MW do 5MW včetně. Tím pádem by pro takový zdroj podle zákona platili jiné (specifické) emisní limity než podle normy ČSN EN 303-5:2013. [6]

2.3 Měření imisí

V zákoně o ochraně ovzduší je stanoveno, že posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění se provádí pro jistá území, vymezená pro hodnocení kvality ovzduší, tzv. zóny. Dále pak pro městské aglomerace s počtem obyvatel přesahujícím 250 000. Seznam všech zón a aglomerací je uveden v příloze č. 3 k zákonu 201/2012 Sb. Posuzování úrovně znečištění se provádí měřením ve všech aglomeracích a v těch zónách, kde byla překročena horní mez pro posuzování úrovně znečištění. V zónách, kde nebyla překročena dolní mez pro posuzování úrovně znečištění se užívá modelování. A v zónách, kde je úroveň znečištění nižší, než horní mez pro posuzování se užívá kombinace stacionárního měření s modelováním nebo orientačním měřením. Síť měřících stanic má na starost Český hydrometeorologický ústav, při čemž do celkového hodnocení se zahrnují i údaje dalších autorizovaných organizací. Tato data se archivují v imisní databázi Informačního systému kvality ovzduší a ČHMÚ je každoročně zpracovává a zveřejňuje na svých webových stránkách. [1] [4]

2.4 Měření emisí

Co se zjišťování emisí týče, to je povinen provádět provozovatel zařízení, jak je popsáno v zákoně č. 201/2012 Sb. Úroveň emisí zjišťuje provozovatel:

- a) u znečišťující látky, pro kterou má stanovený specifický emisní limit nebo emisní strop, anebo, pokud mu tak stanovil prováděcí právní předpis nebo povolení v provozu
- b) u stacionárního zdroje a znečišťujících látek uvedených v příloze č. 4 zákona č. 201/2012

Emise se zjišťují primárně měřením. To probíhá v místě, za kterým již nedochází ke změnám složení odpadního plynu vypouštěného do ovzduší, nebo v místě, které je přesně definováno obsahem referenčního kyslíku. Měření může být buď kontinuální, nebo jednorázové. Jednorázové měření zajišťuje provozovatel prostřednictvím autorizované osoby. Kontinuální měření se provádí v případě provozu stacionárního zdroje uvedeného v příloze č. 4 k zákonu č. 201/2012 a provádí ho sám provozovatel. Jednou za rok je však nutné ověřit správnost tohoto měření jednorázovým měřením, provedeným autorizovanou osobou. [1]

Tam, kde z technických důvodů nelze měření provést nebo v případě stacionárních zdrojů, které vypouštějí do ovzduší těkavé organické látky a krajský úřad tak u nich svolil, se použije matematického výpočtu. [1]

3. Vývoj stavu ovzduší v ČR

V šedesátých a sedmdesátých letech minulého století bylo na území Československa působeno velké znečištění, což bylo zapříčiněno energetickým programem na bázi hnědého uhlí. Nejdříve se monitorovaly pouze tuhé znečišťující látky a oxid siřičitý, ale o pár let později se začalo i se sledováním oxidů dusíku. V této době bylo Československo, podle dat OSN, v Evropě třetí nejvíce znečištěnou zemí oxidem siřičitým. Emise prachu se začaly snižovat s instalací dvoustupňových odlučovačů a vydáním takzvaného komínového zákona, který finančními postihy reguloval množství emisí. U dětí byl v tomto období pozorován zvýšený výskyt nemocí kardiovaskulárního systému a také výskyt alergií. [16]

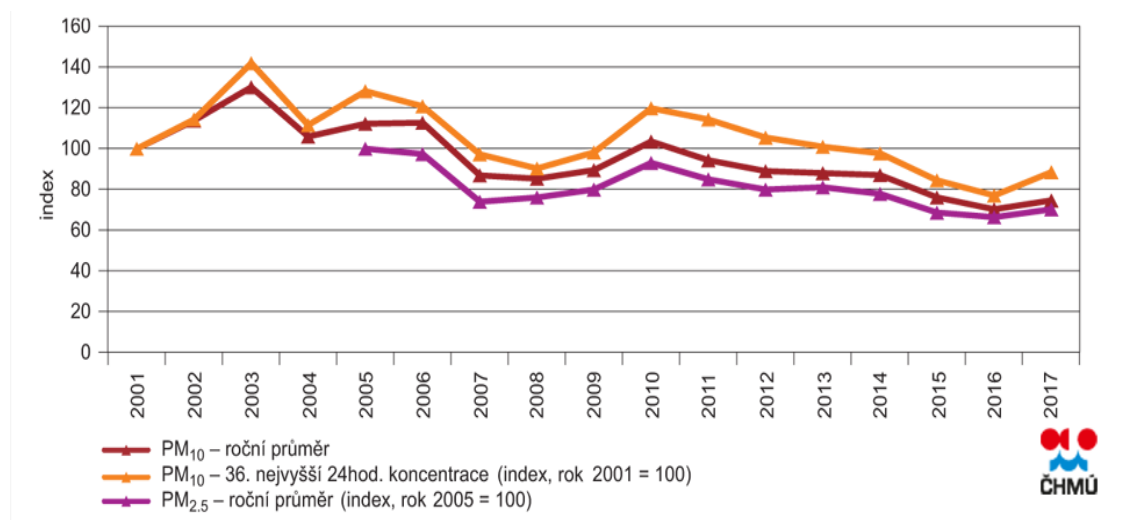
Imisní zátěž dosáhla svého vrcholu v letech osmdesátých. Byly poškozeny lesy, které musely být vykáceny. Různé studie ukazovaly na zdroje znečišťování a povědomí obyvatelstva o této problematice rostlo. V této době byl vybudován první systém regulace velkých emisních zdrojů. [16]

K významnému zlepšení imisních koncentrací došlo v 90. letech, kdy byla zavedena opatření v oblasti průmyslu a energetiky. V současnosti má stále většina imisních koncentrací znečišťujících látek klesající trend. Ten je však oproti tomu v 90. letech méně výrazný. Ovšem i přes tento klesající vývoj, byly v roce 2017 imisní limity některých látek překročeny. Mezi hlavní znečišťující látky v ČR patří částice frakcí PM₁₀ a PM_{2,5}, benzo[*a*]pyren a přízemní ozon. Emisní limity jsou překračovány ve všech krajích ČR, přičemž nejhorší stav ovzduší zůstává v oblasti kolem Ostravy, Karviné a Frýdku-Místku, kde je to způsobeno průmyslovou výrobou, dopravou a vytápěním pevnými palivy ve zdejší husté zástavbě. Překročením alespoň jednoho emisního limitu (vyjma ozonu) bylo v roce 2017 zasaženo asi 26,2 % území ČR s přibližně 62 % obyvatel. Koncentrace troposférického ozonu pak překročila imisní limit na území cca 55 % ČR s přibližně 68 % obyvatel. [7]

Ve srovnání s rokem 2016 došlo v roce 2017 celkově k mírnému zhoršení kvality ovzduší, ale z dlouhodobějšího hlediska ve srovnání s vývojem od roku 2000 lze stav imisí v roce 2017 označit za průměrný. [7]

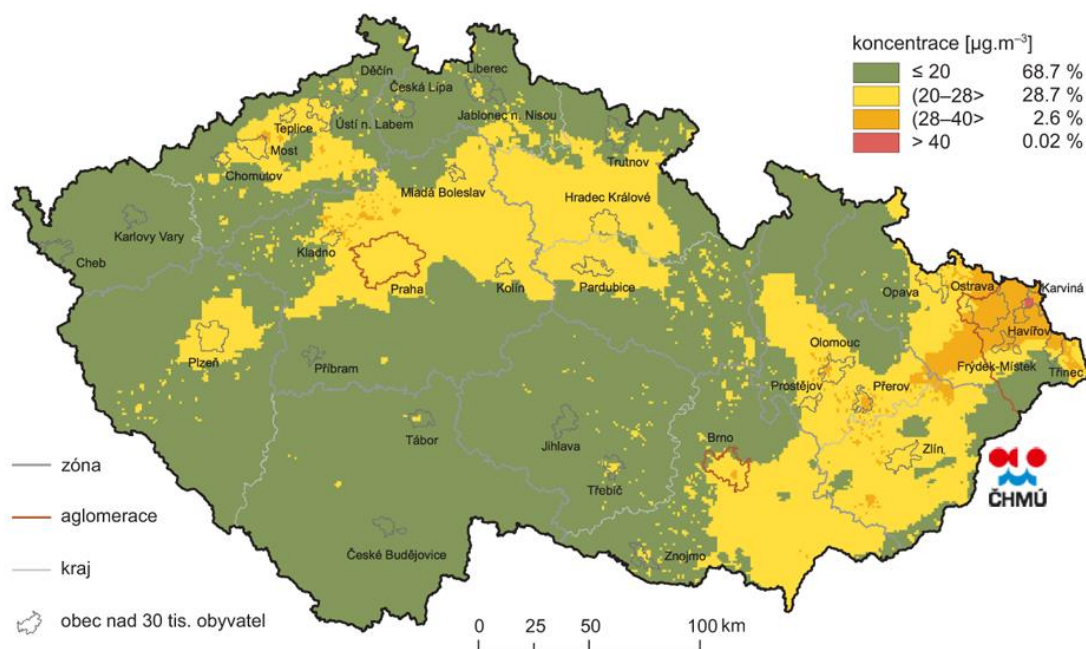
3.1 Částice PM_x

Z dat dostupných na webových stránkách ČHMÚ je vidět pozitivní vývoj koncentrace částic PM₁₀ a PM_{2,5} na území ČR. Klesající trend je viditelný od roku 2010. Až v roce 2017 nastal mírný nárůst, jak je vidět na obrázku č. 1. To bylo z velké části způsobeno nepříznivými rozptylovými podmínkami na začátku roku, kdy se na stavu ovzduší podepisuje vytápění domácností. [5]



Obr. 1: Trendy vybraných imisních charakteristik PM₁₀ a PM_{2,5} [5]

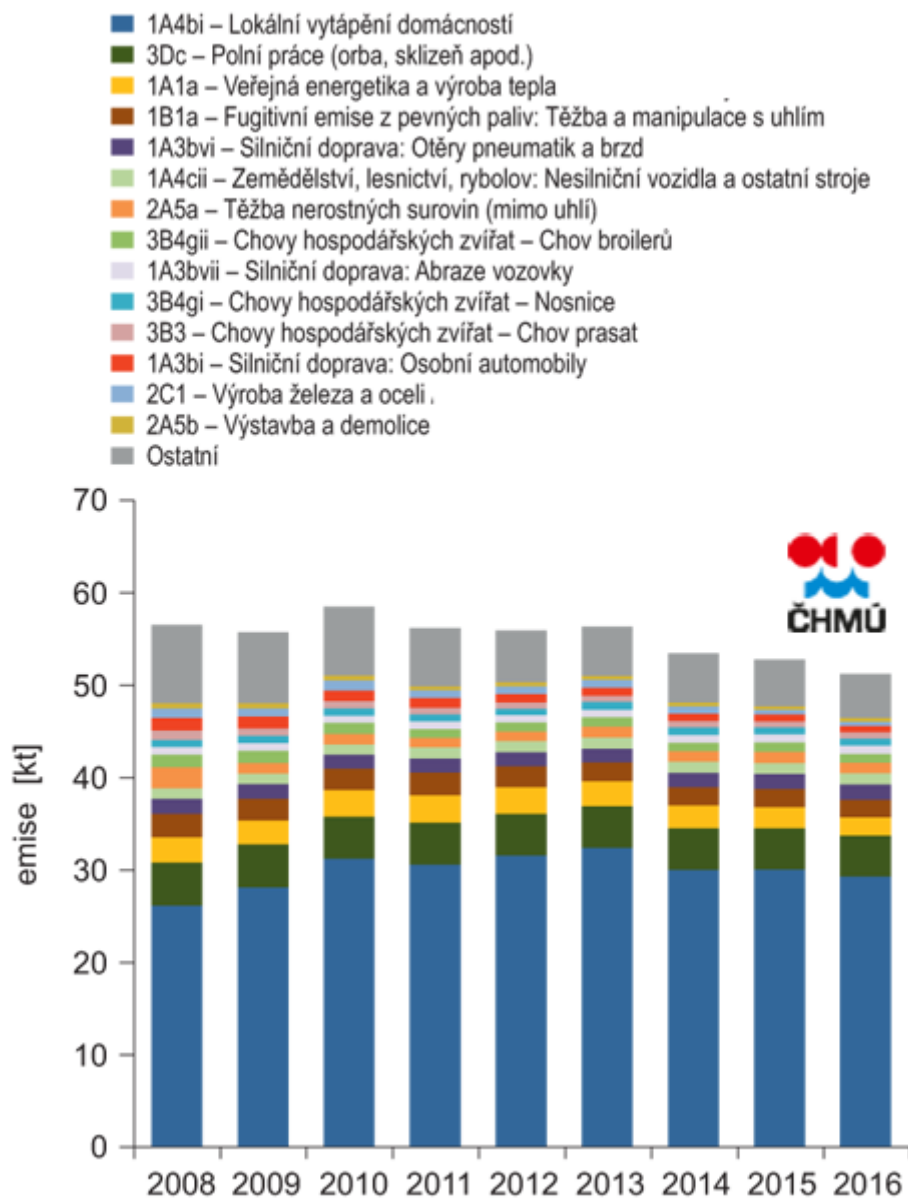
Imisní limit pro roční průměrnou koncentraci PM₁₀ byl v roce 2017 překročen na 0,02 % území ČR s přibližně 0,01 % obyvatelstva a mapa rozložení koncentrace PM₁₀ je vidět na obrázku č. 2. Limit pro průměrnou denní koncentraci PM₁₀ byl překročen na 8,3 % území ČR s přibližně 23,1 % obyvatel a limit pro průměrnou roční koncentraci PM_{2,5} byl překročen na 0,9 % území ČR, kde se to týkalo přibližně 4,9 % obyvatel. [5]



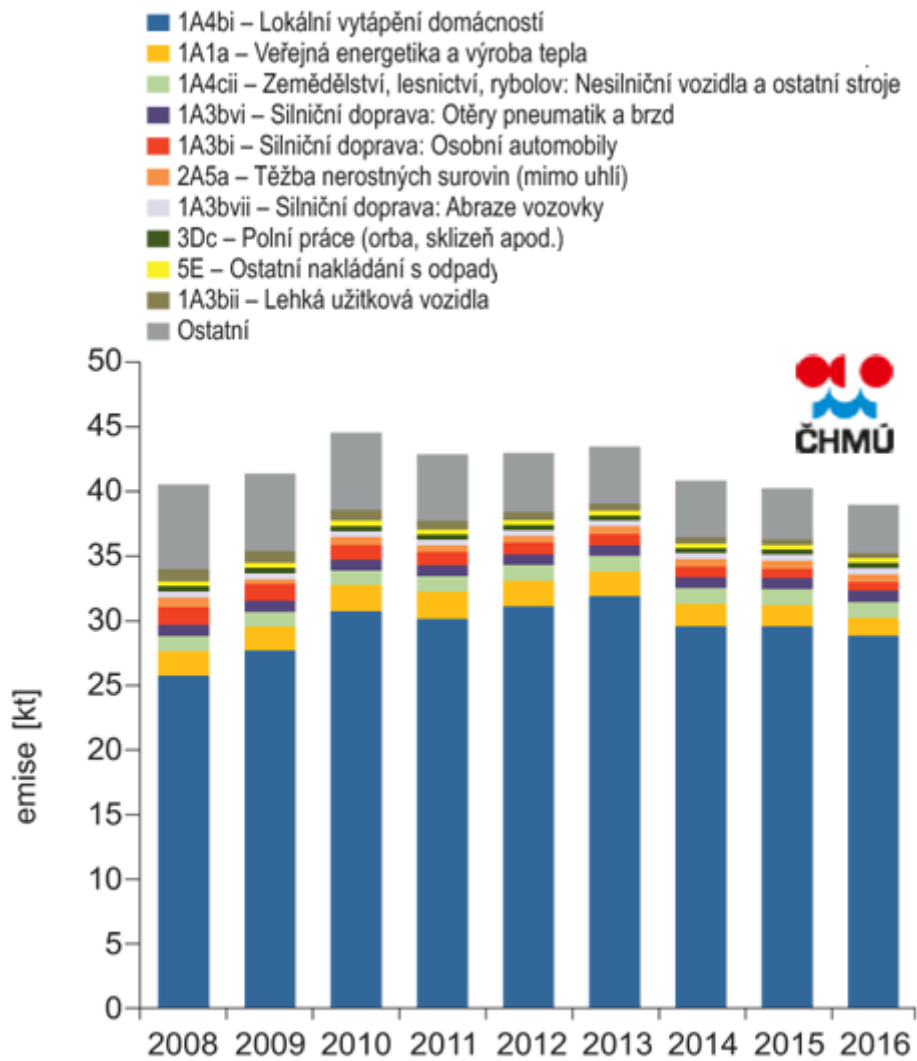
Obr. 2: Pole roční průměrné koncentrace PM_{10} v roce 2017

Co se celkových emisí PM_x na území ČR týče, ty mají klesající trend od roku 2013. Největším producentem těchto částic je dlouhodobě sektor lokální vytápění domácností, který v roce 2016 činil 57,2 % celkové produkce částic PM_{10} a 74,1 % celkové produkce částic $\text{PM}_{2,5}$. Pro člověka zvláště nebezpečné jsou částice pocházející z oblasti dopravy, kde vznikají částice o velikosti i stovek nm. V roce 2016 byl podíl produkce z této oblasti pro PM_{10} i $\text{PM}_{2,5}$ necelých 11 %. Vývoje celkových ročních emisí částic PM_{10} a $\text{PM}_{2,5}$ jsou vidět na obrázcích č. 3 a 4 i se zastoupením jednotlivých sektorů, podílejících se na jejich produkci. [5]

Imisní limity pro částice PM_1 zákon neudává, a tudíž není k dispozici tolik dat o jejich koncentraci v ovzduší. V roce 2017 tyto částice v ČR měřilo 14 stanic.



Obr 3: Vývoj celkových emisí PM₁₀ v ČR [5]



Obr. 4: Vývoj celkových emisí PM_{2,5} v ČR [5]

4. Nebezpečí expozice suspendovaným částicím

Z hlediska vlivu částice na člověka jsou nejvýznamnějšími vlastnostmi její chemické složení, velikost a tvar. Tyto vlastnosti se odvíjejí od emisního zdroje těchto částic. Do lidského těla pronikají v největší míře vdechnutím a menší míře pak kůží nebo společně s potravou. [16]

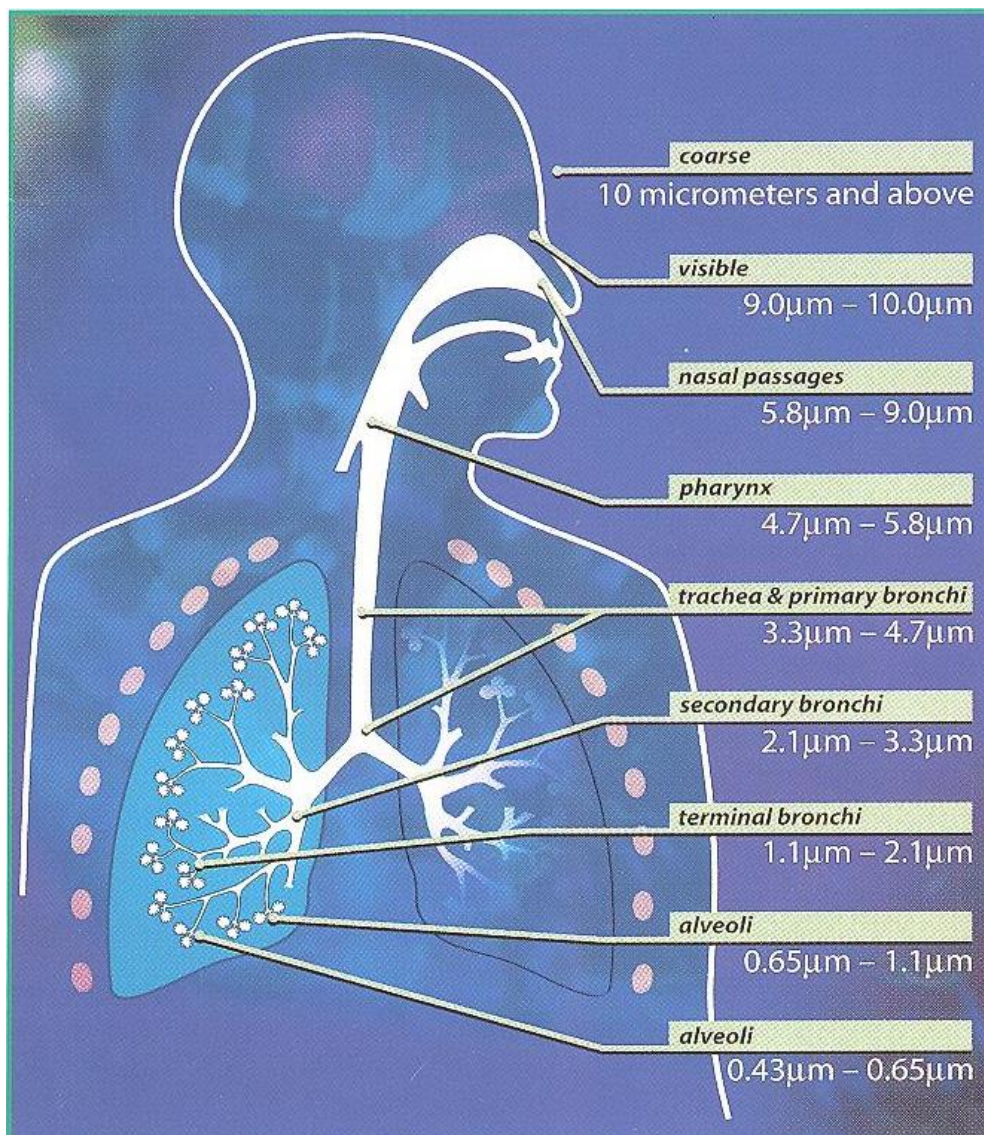
Částice frakce PM_{10} pronikají do dýchacího ústrojí a zachycují se na nosní nebo ústní sliznici. Odtud mohou být spolknuty nebo vykašlány. Částice $PM_{2,5}$ mohou pronikat do průdušek a částice PM_1 do plicních sklípků. Částice pronikající do plic jsou řádově stotisíc krát menší než buňky lidského těla a mohou pronikat skrz plicní stěnu do krevního oběhu. Mohou se pak ukládat v orgánech, kam se odplaví krevním řečištěm. Nanočástice také celkem snadno pronikají skrz nosní membránu, odkud se přes čichové a lebeční nervy mohou dostat až do centrálního nervového systému. [16]

Částice na sebe mohou vázat toxické a karcinogenní látky, které se mohou vstřebávat do tkání, na které se ukládají. Mohou pak způsobovat vážná onemocnění jako je astma nebo rakovina. Negativní vliv mohou mít částice na kardiovaskulární systém, respirační ústrojí, plodnost a také mohou mít za příčinu předčasné úmrtí. Dále mohou omezovat obranné mechanismy. [16]

Z hlediska toxicity je potřeba rozlišovat mezi chemickým složením částice a chemickými vlastnostmi. Dvě částice stejného chemického složení, ale s různými krystalickými strukturami budou mít odlišné chemické vlastnosti. Studie ukazují, že čím je větší poměr stran částice, tím je větší její toxicita a čím je větší povrchová plocha, tím je částice reaktivnější. [16]

Obranná reakce těla může spočívat například v transportu TZL z dýchacího ústrojí. Takový proces se nazývá clearance a má dvě fáze. Rychlá fáze spočívá v tom, že v tracheobronchiální části plic se TZL pomocí hlenu vytlačují pryč z dýchacích cest. Pomalá fáze spočívá v pohlcování TZL, neboli fagocytóze. [16]

Na obrázku č. 5 je zobrazeno, kam částice různých velikostí mohou proniknout pomocí dýchacího ústrojí.



Obr. 5: Pronikání částic různých velikostí do dýchacího ústrojí

Na to, kam ve skutečnosti částice pronikne, má vliv spousta faktorů. Kromě vlastností samotné částice to jsou například vlastnosti dýchacího ústrojí, způsob dýchání... Různé osoby mají různou pravděpodobnost na vdechnutí částic, jejich následné ukládání a stejně tak i reakce se mohou lišit. Norma ČSN ISO 7708 stanovuje frakce, které přibližně odpovídají frakcím pronikajícím do oblastí dýchacího ústrojí za průměrných podmínek. Je to vdechovatelná frakce, což je hmotnostní zlomek aerosolových částic, které jsou vdechnuty nosem a ústy. Dále je to extrathorakální frakce, což je hmotnostní zlomek částic, které jsou vdechnuty, ale nepronikají za hrtan. Thorakální frakce je hmotnostní zlomek částic pronikajících za hrtan. Tracheobronchiální frakce je hmotnostní zlomek částic pronikajících za hrtan, ale nepronikajících do dýchacích cest bez řasinkového

epitelu. A nakonec respirabilní frakce je hmotnostní zlomek vdechnutých částic, které pronikají do dýchacích cest, kde není řasenkový epitel. [8]

Z pozorování zdravotních účinků nanočástic TiO_2 se ukázalo, že expozice nízkým dávkám částicím o velikosti 20 nm a koncentraci 10 mg/m^3 způsobilo větší výskyt plicních nádorů než u částic o velikosti 300 nm a větší koncentraci 250 mg/m^3 . Nanočástice mají tedy větší negativní zdravotní účinky než větší částice stejného složení. K podobným závěrům dospělo více studií. [16]

Při vyšších koncentracích nanočástic je větší pravděpodobnost srážek těchto částic. Při srážkách může docházet k tomu, že se částice spojují do větších celků. Tento jev se nazývá agregace. U větších částic je fagocytóza mnohem účinnější, takže prostředí kontaminované větší koncentrací nanočástic může být pro člověka menším rizikem, než kdyby bylo kontaminované menší koncentrací stejně velkých částic. [16]

5. Možnosti měření TZL

Pro měření koncentrace TZL v plynu se dají použít různé metody a odlučovače založené na různých principech. Základní dělení měření TZL je následující [3]:

- jednorázové měření
- kontinuální měření

Tyto metody lze dále rozdělit následovně:

- gravimetrická metoda
- fotometrická metoda
- radiometrická metoda
- metoda využívající triboelektrický jev

Dále se rozlišuje extraktivní metoda, kdy se odebere vzorek plynu, který se následně vyhodnotí. A takzvaná metoda in – situ (česky „na místě“), při které je měřicí zařízení umístěno přímo do potrubí s měřeným odpadním plynem.

Extraktivní metodou je gravimetrická metoda. Nevýhodou extraktivní metody je to, že mezi odběrem a vyhodnocením vzorku v něm může dojít ke změnám. Částice se v něm mohou například shluknout. Kdybych pak z vyhodnocených dat sestavil například křivku rozložení velikostí částic dle hmotnosti, neodpovídala by reálnému rozložení v odpadním plynu.

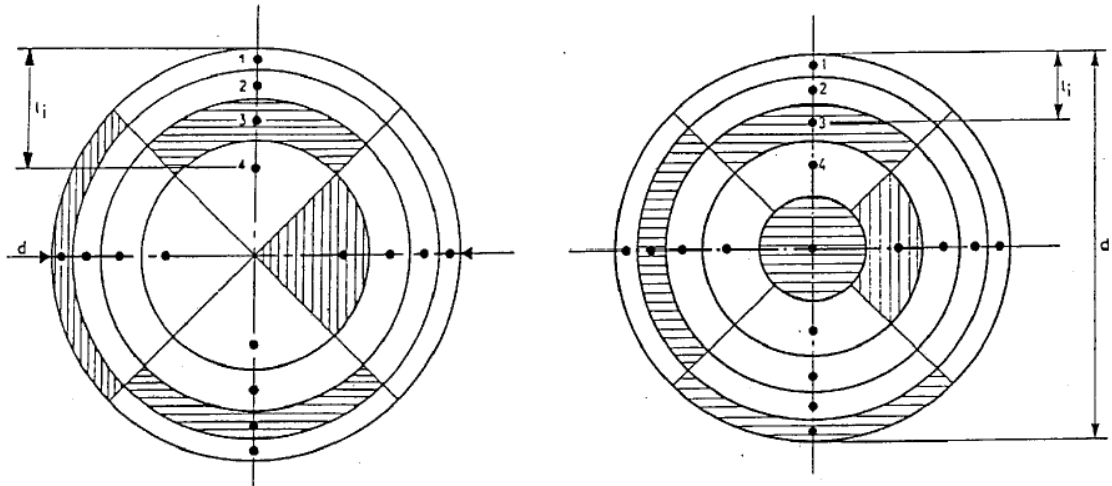
Metodou in – situ je například optická metoda. Nevýhodou této metody je to, že snímací zařízení je vystaveno podmínkám v potrubí a může se tak například zanášet jeho senzor. [12], [17]

5.1 Gravimetrická metoda

Gravimetrická metoda je základní metodou pro zjištění emisí TZL. Gravimetrickou metodou se zabývají dvě normy. První z nich je norma ČSN ISO 9096 Stacionární zdroje emisí – Stanovení hmotnostní koncentrace a hmotnostního toku tuhých částic v potrubí – Manuální gravimetrická metoda. Pro měření s nízkými koncentracemi TZL platí norma ČSN EN 13284-1 Stacionární zdroje emisí – Stanovení nízkých hodnot hmotnostní koncentrace – Manuální gravimetrická metoda.

Je to metoda, která je rozhodčí při sporech o správnosti výsledků měření. Také se používá jako kalibrační metoda pro automatické registrační přístroje pro kontinuální měření.

Odběr vzorku u gravimetrické metody probíhá pomocí sondy umístěné kolmo proti směru proudění plynu v potrubí. Průřez potrubí je rozdělen na rovnoploché oblasti, jak je vidět na obrázku č. 6. Střední hodnota měřené veličiny se pak získá jako aritmetický průměr dílčích hodnot získaných z jednotlivých bodů plochy. [12]

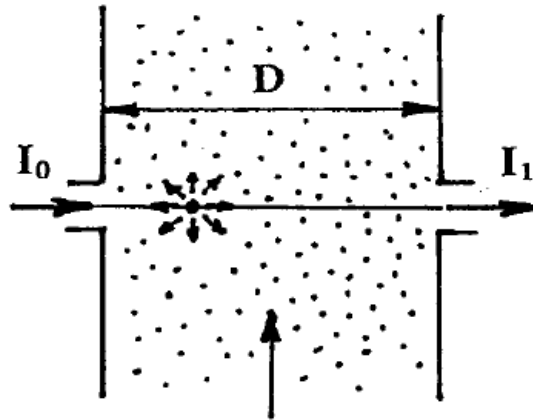


Obr. 6: Rovnoploché rozdělení kruhového průřezu [12]

5.2 Fotometrická metoda

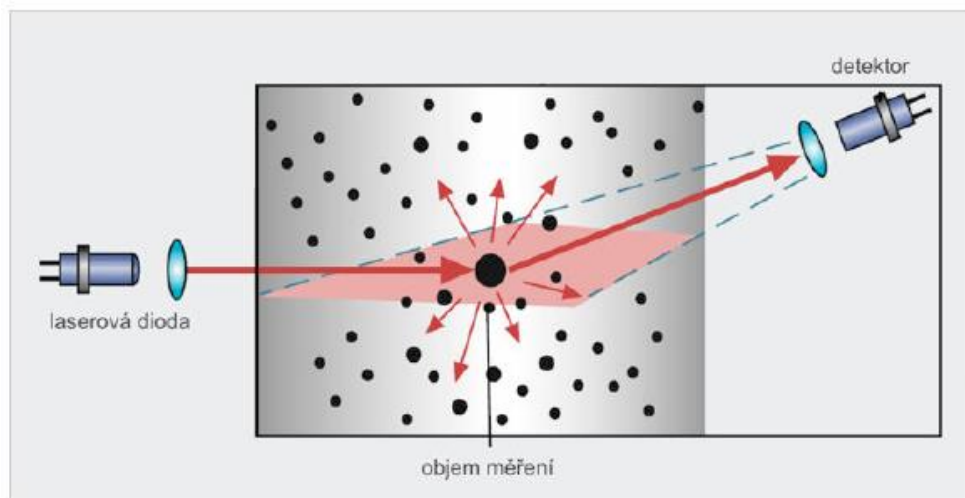
Fotometrická nebo též optická metoda využívá zeslabení elektromagnetického záření v důsledku rozptylu a pohlcení v odpadním plynu. Jedná se o metodu používanou pro kontinuální měření. Z rozdílu intenzit vyslaného a přijatého paprsku se pak stanoví koncentrace TZL. Problém u těchto zařízení je, že stanovují koncentraci po dráze paprsku a nikoli po průřezu a zároveň není přesně známý extinkční součinitel, který je pro výpočet nutný. To lze vyřešit současným gravimetrickým měřením, které umožní fotometrický přístroj oceňovat tak, aby bylo dále možné získat potřebné výsledky pouze z fotometrického měření. [12]

Prachoměr snímající transmisní paprsek, se používá při vyšších koncentracích TZL v odpadním plynu. Měří se přes celý průměr potrubí tak, že na jedné straně je vysílač a na druhé přijímač. Další možností je umístění zrcátka na druhou stranu potrubí a vysílač pak slouží zároveň i jako přijímač. Princip této metody je vidět na obrázku č. 7. [12]



Obr. 7: Princip fotometrické metody [12]

Prachoměr snímající rozptýlené světlo je citlivější a používá se proto pro měření při nízkých koncentracích. Zde nejsou vysílač a přijímač umístěny na stejné ose, ale přijímač je vychýlen ze směru hlavního paprsku a přijímá tak pouze záření, které se rozptýlilo na prachových částicích v plynu. Tento princip ukazuje obrázek č. 8. [17]

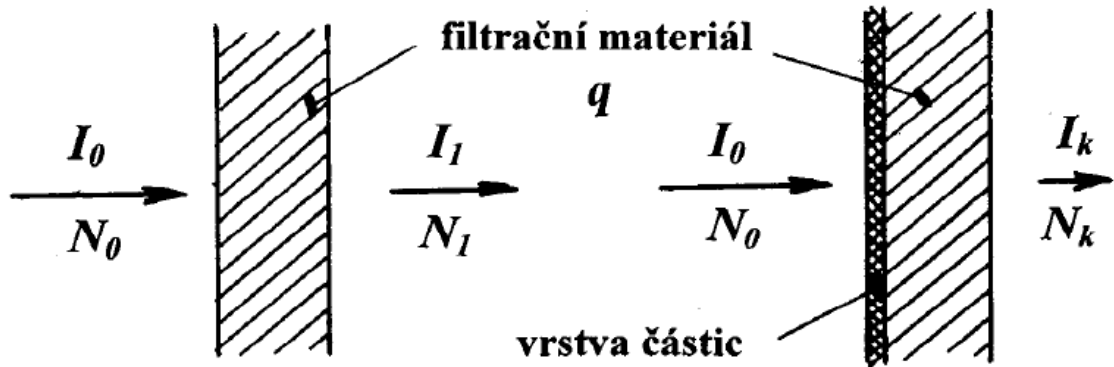


Obr. 8: Optická metoda rozptylu světla [17]

5.3 Radiometrická metoda

Tato metoda využívá, podobně jako fotometrická metoda, rozptyl a absorpci záření při průchodu materiálem. Zde se ovšem jedná o β záření (elektrony). Jedná se o kvazikontinuální měření. To proto, že měření probíhá ve dvou fázích. V první je odebírán vzorek odpadního plynu na filtr a v druhé je tento zanesený filtr vystaven β záření a měří se intenzita záření nebo počet detekovaných β částic, které přes něj projde. Pro výpočet

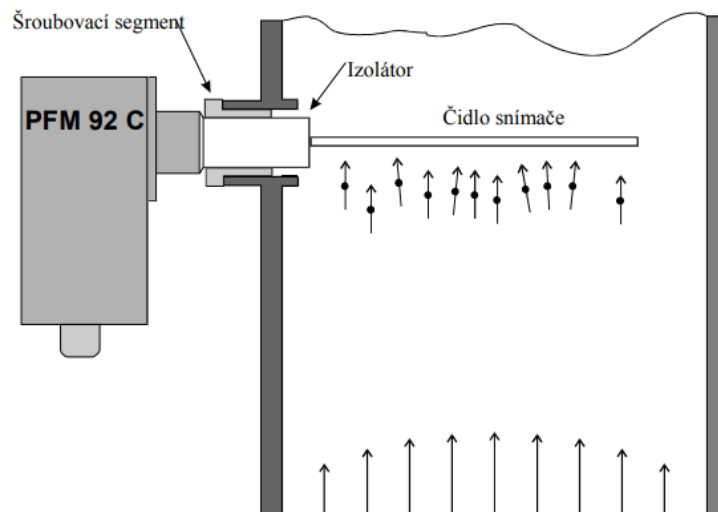
koncentrace TZL v odpadním plynu je potřeba změřit i intenzitu záření, která prochází přes neexponovaný, čistý filtr. Protože zanesení filtru můžeme ovlivnit časem expozice, je radiometrická metoda vhodná pro široký rozsah koncentrací TZL v plynu. Princip snížení intenzity, resp. počtu β částic u radiometrické metody je vidět na obrázku č. 9. [12]



Obr. 9: Změna intenzity záření, resp. počtu β částic, při průchodu čistým a zaneseným filtrem [12]

5.4 Metoda využívající triboelektrický jev

Tato metoda patří do kategorie kontinuálního in – situ měření. Měří koncentraci TZL v plynu pomocí změny náboje, kterou způsobují částice dopadající na povrch kovové sondy. Změna náboje se převádí na proudový signál, který se dále vyhodnocuje. Pro zjištění absolutní koncentrace je potřeba výstupnímu signálu přiřadit hodnoty koncentrace TZL pomocí gravimetrické metody. Výhodou této měřicí metody je rychlá odezva, jednoduchá instalace, nízká poruchovost a nepotřeba časté údržby. [18]

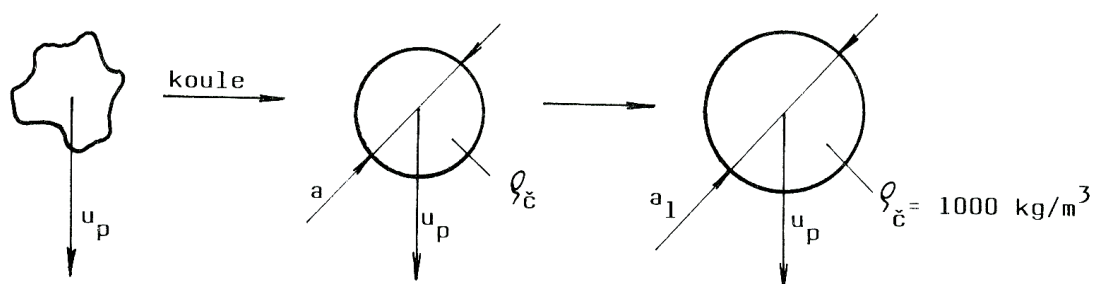


Obr. 10: Schéma triboelektrického prachoměru [18]

6. Ekvivalentní velikost částice

Mezi nejdůležitější vlastnosti částic při jejich odlučování patří jejich tvar a velikost. Tyto vlastnosti rozhodují o pohybových vlastnostech částic, které jsou určující pro odlučovací rychlosti u mechanických a elektrických odlučovačů. Velikost a tvar částice jsou dány především způsobem jejich vzniku. Podle tohoto kritéria se dělí na částice přírodní a částice vzniklé lidskou činností. Částice přírodní tvoří především kosmický prach, anorganický prach pozemského původu (vulkanická činnost, přírodní požáry, písečné bouře, eroze hornin) a organické částice jako pyl, výtrusy z hub, semena rostlin. Částice vzniklé lidskou činností jsou zejména částice vznikající při: spalování paliv, výrobě a manipulaci se sypkými materiály (cement, vápno hnojiva, mouka), výrobě a obrábění materiálů. Také v atmosféře mohou vznikat tuhé částice změnou plynných znečišťujících látek na pevné skupenství.

Protože reálné částice mají různé tvary, používají se k jejich popisu charakteristické ekvivalentní rozměry. Existuje jich celá řada a volí se podle použité měřicí metody. Při měření na principu sedimentace, což je případ impaktoru, se používá ekvivalentní velikost částice podle pádové rychlosti. Ekvivalentní částice má tedy totožnou pádovou rychlost jako částice reálná, ale nahrazuje se kulovým tvarem, jak ukazuje obrázek č. 11. Zavádí se zde také jednotná hustota částice $\rho_{\check{c}} = 1000 \text{ kg/m}^3$. [15]



Obr. 11: Ekvivalentní velikost částice dle pádové rychlosti [15]

7. Návrh třístupňového impaktoru

7.1 Výpočetní část návrhu

Návrh kaskádního impaktoru vychází z matematického modelu Virgila A. Marpla [9]. Ten se problematikou odlučování částic zabýval ve své doktorské práci. Odlučovací vlastnosti jednotlivých trysek, potažmo stupňů, jsou charakterizovány bezrozměrným podobnostním číslem Stk . Číslo bylo pojmenováno po Georgi Gabrielovi Stokesovi a nazývá se tedy Stokesovo číslo. Je definováno jako poměr setrvačného doběhu částice a charakteristického rozměru překážky. Jeho matematický zápis ukazuje rovnice (1).

$$Stk = \frac{\rho_{\xi} \cdot C \cdot D_{\xi}^2 \cdot v}{18 \cdot \eta \cdot \frac{D}{2}}, \quad (1)$$

kde:

ρ_{ξ} je hustota částice [kg/m^3]

C je Cunninghamův korekční součinitel na skluz [-]

D_{ξ} je průměr částice [m]

η je dynamická viskozita tekutiny [Pa.s]

D je průměr trysky [m]

v je rychlost proudění [m/s]

Ve vztahu (1) vystupuje rychlost proudění v . Pro další postup za tuto rychlost dosadím ze vztahu (2) tak, abych dále pracoval s objemovým průtokem místo rychlosti.

$$v = \frac{\dot{V} \cdot 4}{n \cdot \pi \cdot D^2}, \quad (2)$$

kde:

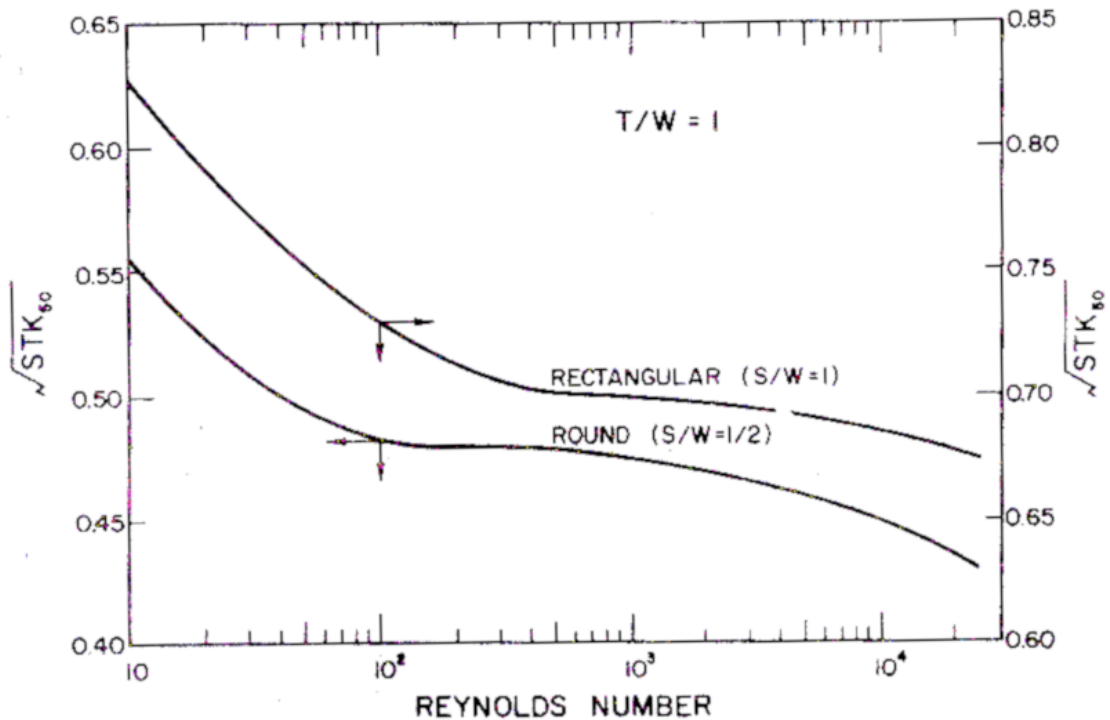
\dot{V} je objemový průtok stupněm [m^3/s]

n je počet trysek ve stupni [-]

Dosazením vztahu (2) do vztahu (1) a následnou úpravou dostanu vzorec (3), který poslouží pro výpočet průměru trysky.

$$D = \sqrt[3]{\frac{\rho_{\check{c}} \cdot \dot{V} \cdot D_{\check{c}}^2 \cdot 4 \cdot C}{9 \cdot \eta \cdot \pi \cdot n \cdot Stk}} \quad (3)$$

Jak je vidět na obrázku č. 12, Stokesovo číslo je v jistém intervalu Reynoldsových čísel přibližně konstantní. Já tedy pro zjednodušení budu uvažovat, že odmocnina ze Stokesova čísla je v intervalu $Re \in (500, 3000)$ rovna 0,474.



Obr. 12: Závislost Stk na Re

Dynamická viskozita je funkcí teploty a pro suchý vzduch je to závislost daná vztahem (4). [10]

$$\eta = 1,717 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{\frac{T}{273,15}} \cdot \frac{1 + \frac{113}{273,15}}{1 + \frac{113}{T}}, \quad (4)$$

kde:

T je termodynamická teplota vzduchu [K]

Cunninghamův korekční součinitel na skluz vypočtu pomocí rovnice (5). [10]

$$C = 1 + 2 \frac{\lambda}{D_c} \left[1,23 + 0,41 \cdot \exp \left(-0,88 \frac{D_c}{2\lambda} \right) \right], \quad (5)$$

kde:

λ je střední volná dráha molekul [m]

D_c je průměr částice [m]

Střední volná dráha molekul λ je funkcí složení plynu, tlaku a teploty. Závislost na tlaku je převažující. Protože při odběru vzorku uvažuji v impaktoru přibližně atmosférický tlak, budu pro zjednodušení pro vzduch a spaliny běžného složení uvažovat hodnotu λ konstantní o hodnotě 0,065 μm . Hodnoty Cunninghamova součinitele, pro jednotlivé stupně uvedené v tabulce č. 10, se pak budou odvíjet pouze od velikostí částic D_c . Je vidět, že zatímco u částic PM_{10} bych mohl součinitel z výpočtů vypustit, aniž bych se dopustil nějak velké chyby, u menších částic jeho hodnota roste tak, že ji nelze bez větších nepřesností zanedbat.

Tab. 10: Hodnoty Cunninghamova součinitele pro měřené frakce PM_x

PM_x [μm]	C [-]
10	1,016
2,5	1,064
1	1,160

Impaktor má pracovat v rozsahu průtoků 2 – 6 m^3/h a rozsahu teplot 0 – 200 $^\circ\text{C}$. Pro výpočet průměrů trysek tedy dosazují dynamickou viskozitu pro 100 $^\circ\text{C}$ a objemový průtok 4 m^3/h , tak abych byl na středu zadaného intervalu. Dosadím tedy tyto hodnoty do vzorce (3). Jako poslední mi zbývá do vzorce dosadit počet trysek n . Ten zvolím tak, aby Reynoldsovo číslo ve trysce vycházelo v požadovaném intervalu (500, 3000). Reynoldsovo číslo je definováno ve vztahu (5).

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\eta}, \quad (5)$$

kde:

ρ je hustota tekutiny [kg/m^3]

v je rychlost proudění [m/s]

D je průměr trysky [m]

η je dynamická viskozita [Pa.s]

Do tohoto vztahu dosadím vypočtený průměr trysky a dynamickou viskozitu. Rychlost v vypočtu pomocí vzorce (2) a hustotu vzduchu ρ , která je také závislá na teplotě, vypočtu ze stavové rovnice ideálního plynu pomocí vzorce (6).

$$\rho = \frac{p}{r \cdot T}, \quad (6)$$

kde:

p je tlak vzduchu [Pa]

r je měrná plynová konstanta a pro vzduch a má hodnotu 287,1 J/kg.K

T je termodynamická teplota vzduchu [K]

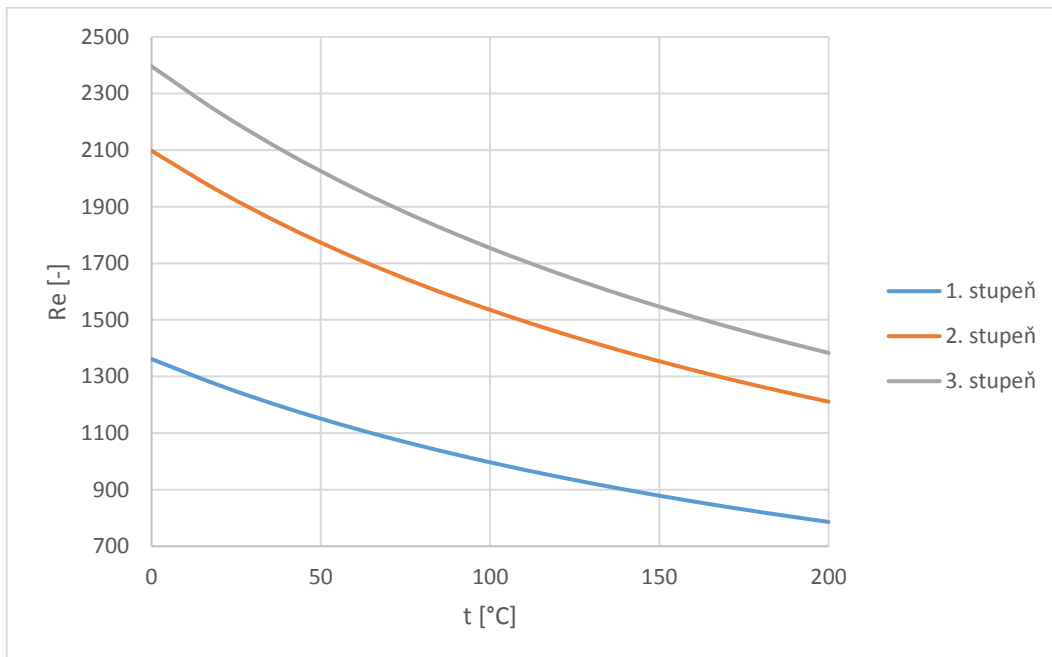
Tlak vzduchu budu uvažovat u všech stupňů 98 kPa. Zde se dopouštím zjednodušení, protože správné by bylo uvažovat tlakové ztráty na jednotlivých stupních. U impaktoru se třemi stupni by toto zjednodušení však nemělo způsobit velkou chybu.

Nyní znám vše potřebné pro výpočet průměrů a počtů trysek n tak, aby vyhovovaly požadovanému intervalu Re . Popsaným způsobem je tedy dopočítám a získávám tak hodnoty, které jsou vidět v tabulce č. 11. S ohledem na přesnost výroby jsou průměry zaokrouhleny na desetinu milimetru.

Tab. 11: Charakteristiky jednotlivých stupňů impaktoru

Stupeň	Tříděná frakce	Počet trysek	Průměr trysek [mm]
1.	PM10	8	7,5
2.	PM2,5	16	2,4
3.	PM1	30	1,1

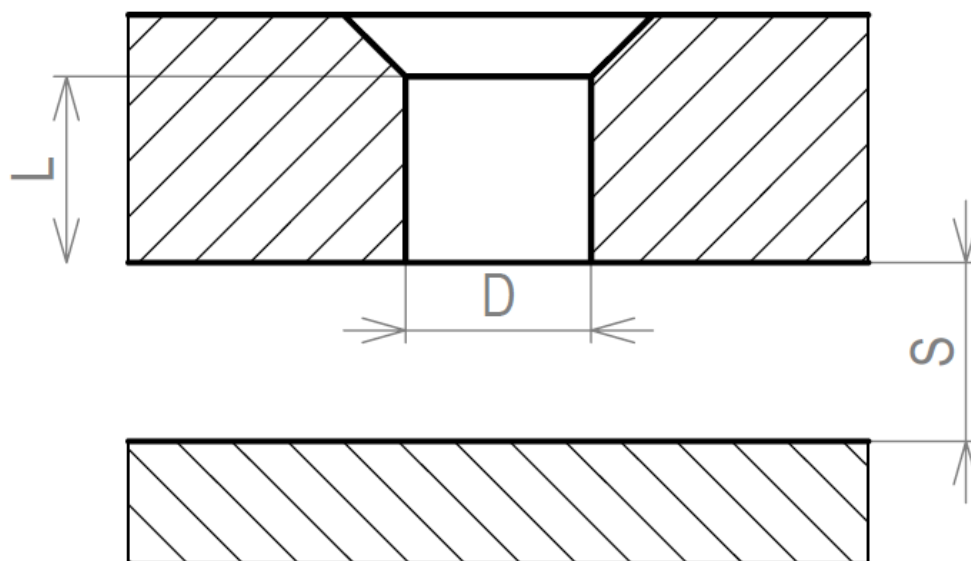
Na obrázku č. 13 je vidět, že u všech stupňů se Reynoldsovo číslo pohybuje v požadovaném intervalu (500, 3000) pro teploty 0 až 200 °C.



Obr. 13: Závislost Re ve tryskách na teplotě pro suchý vzduch

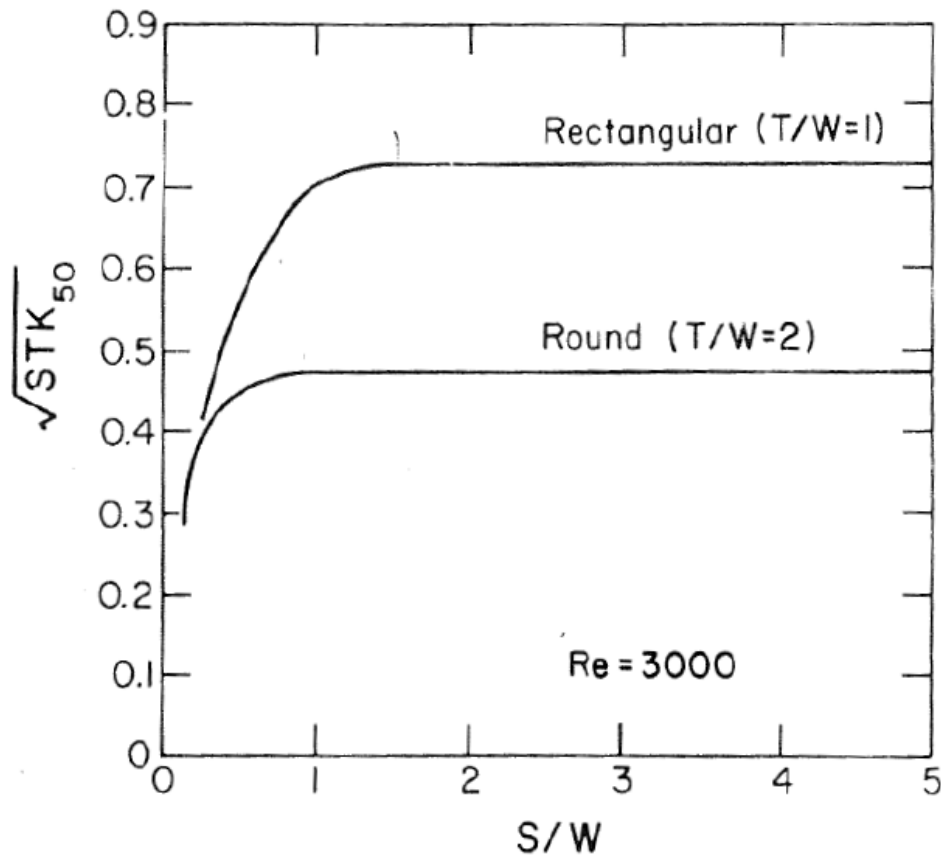
7.1 Poznámky ke konstrukci impaktoru

Při návrhu impaktoru je třeba dbát některých dalších pravidel pro správné odlučování částic a minimalizaci ztrát. Důležitá je volba rozměrů trysky, označených na obrázku č. 14.



Obr. 14: Hlavní rozměry trysky impaktoru

Na obrázku označuje L délku trysky, D průměr trysky a S vzdálenost od impakční plochy. Literatura [11] doporučuje při konstrukci použít poměr rozměrů $L/D = 1$, $S/D = 1$. Ale je možné pohybovat se v intervalech $L/D \in (1,5)$ a $S/D \in (1,2)$. Neměnnost Stokesova čísla v závislosti na poměru S/D ukazuje obrázek č. 15. Na obrázku je rozměr D označen jako W a L jako T .



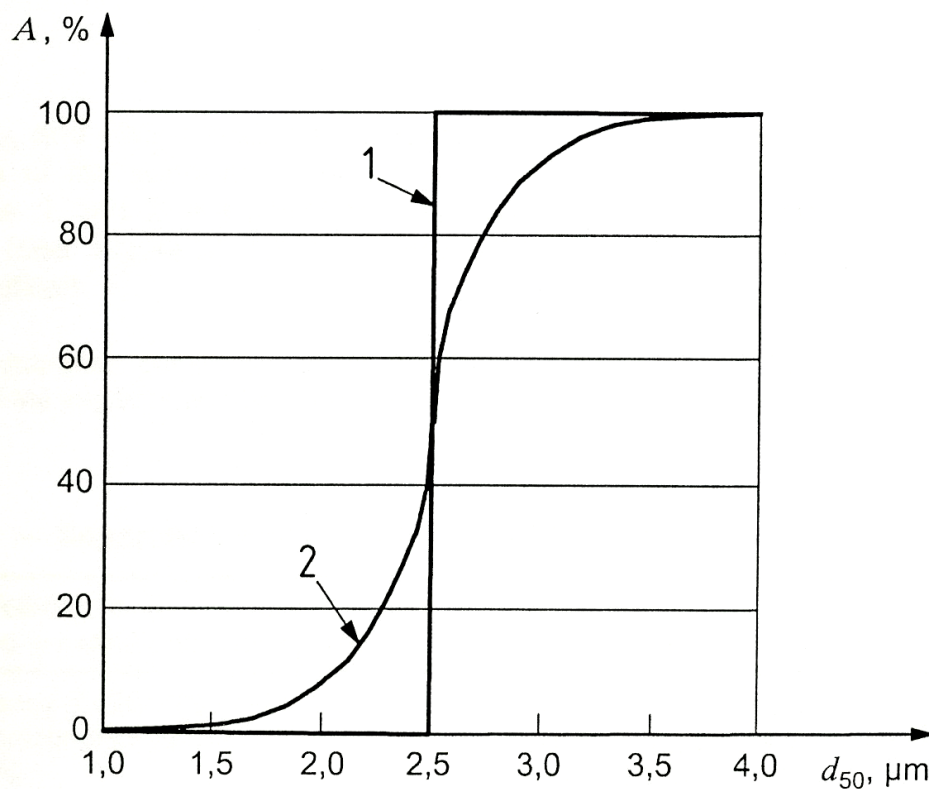
Obr. 15: Závislost Stk na poměru S/D [9]

Dále je pro zachycení maximálního množství částic nutné zajistit pod každou tryskou volnou impakční plochu o průměru alespoň $3D$.

Pod každou tryskou se snažím docílit toho, aby se proud plynu rozdělil rovnoměrně tak, že polovina bude pokračovat směrem do otvoru v ose impakční plochy a druhá polovina směrem k jejímu okraji. Docílit se toho snažím tím, že poměr ploch otvorů na okraji a v ose impakční plochy je v poměru 1:1. Předpokládám tedy trochu zjednodušeně (neuvažuji místní tlakové ztráty), že proud plynu se rozdělí ve stejném poměru, v jakém jsou plochy. Takto, v poměru 1:1, je to navrženo v prvním a druhém stupni. Ve třetím stupni je navíc další skupina otvorů, takže zde budou poměry jiné. Se stejnou premisou, aby od trysky polovina proudu směřovala k ose a polovina k okraji, se dostanu

k poměrům ploch otvorů osa:střed:okraj = 1:3:2. Impakční plochy jsou vidět na výkresech v přílohách č. 2, 3, 4.

Pro minimalizaci ztrát je též nutné navrhnout otvory v impakčních plochách tak, aby se pod nimi neodlučovaly částice podobné velikosti, jaké se mají odloučit na té dané impakční ploše. Jak je vidět na obrázku č. 16, reálná odlučovací křivka (křivka 2) se blíží 100 procentům až u částic větších přibližně 1,6 krát než je velikost částice D_{50} , na kterou je stupeň dimenzován. Můžeme tedy očekávat, že i takto veliká částice, třebaže v malém množství, projde daným stupněm a musíme předejít tomu, aby se odloučila pod impakční plochou u vstupů trysek dalšího stupně. Otvory na impakční ploše by tedy měly být navrženy tak, aby frakční účinnost 50 % pod nimi měla částice alespoň 3 krát větší, než částice, která se má odlučovat na této impakční ploše.



Obr. 16: Teoretická a reálná frakční účinnost [10]

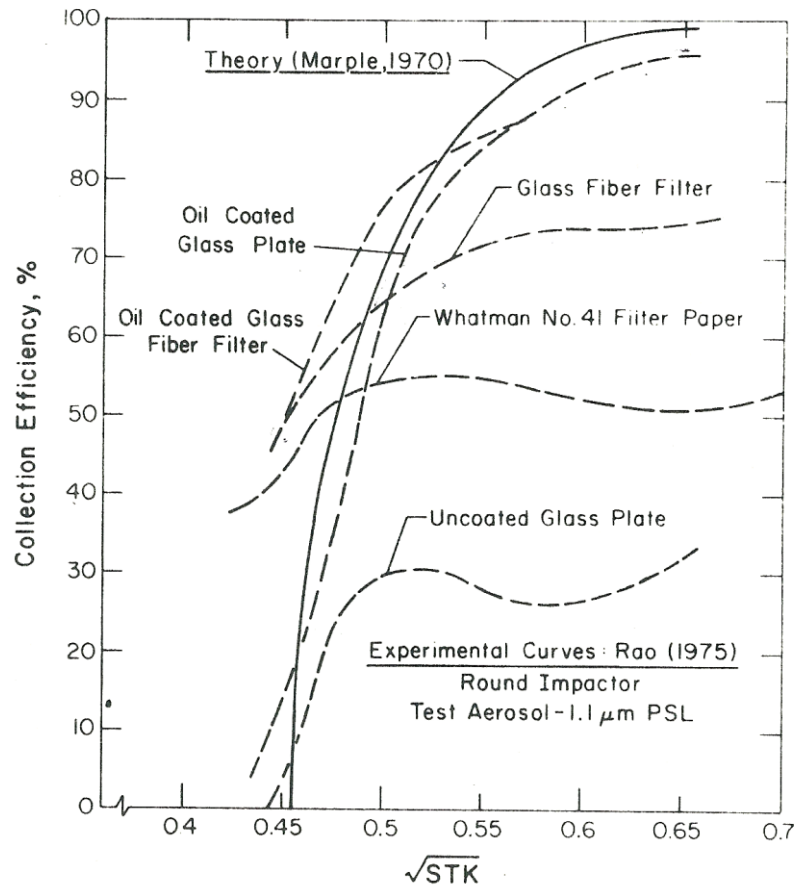
V tabulce č. 12 jsou dopočítány velikosti částic, které by se pod otvory impakčních ploch odlučovali s účinností 50 %. Ve všech případech je tato velikost dostatečná tak, aby splňovala kritérium popsané výše a tím, aby se minimalizovaly ztráty. Výpočet byl proveden vyjádřením D_c z rovnice (3).

Tab. 12: Velikosti částic odlučujících se pod otvory impakčních ploch s účinností 50 %

Impakční plocha	Otvor	Počet otvorů	Průměr otvoru [mm]	D_{ϵ} [μm]
1. stupeň	Okraj	8	13	33
	Osa	1	35	51
2. stupeň	Okraj	16	10,5	34
	Osa	1	40	64
3. stupeň	Okraj	20	5	22
	Osa	1	15,5	19
	Střed	10	8,5	20

Aby se zabránilo částicím, které dopadnou na impakční plochu, odrazit se nebo se nechat strhnout okolním proudem, je třeba impakční plochu opatřit speciálním povrchem. Obrázek č. 17 ukazuje účinnosti odloučení pro různé povrchy impakčních ploch. Nejlepší shodu s teoretickým modelem zde ukazuje skleněný povrch s olejovou vrstvou. V případě mého návrhu počítám s tenkou aluminiovou fólií potaženou vrstvou látky, která odolává teplotám 200 °C tak, aby se při měření neodpařovala a nezpůsobovala tak nepřesnosti. Takovou látkou může být např. Apiezon H, který může pracovat v intervalu teplot -10 až 240 °C. Fólie by se po konci měření odejmula a samostatně zvažila. Vážit celou kovovou impakční plochu není z hlediska potřebné citlivosti vah vhodné. Výkresy těchto folií jsou v příloze č. 5.

Za posledním stupněm impaktoru je absolutní filtr vyrobený ze skelných vláken, který by měl zachytit všechny zbylý prach v plynu. Ze spodu je podepřen sítkem.



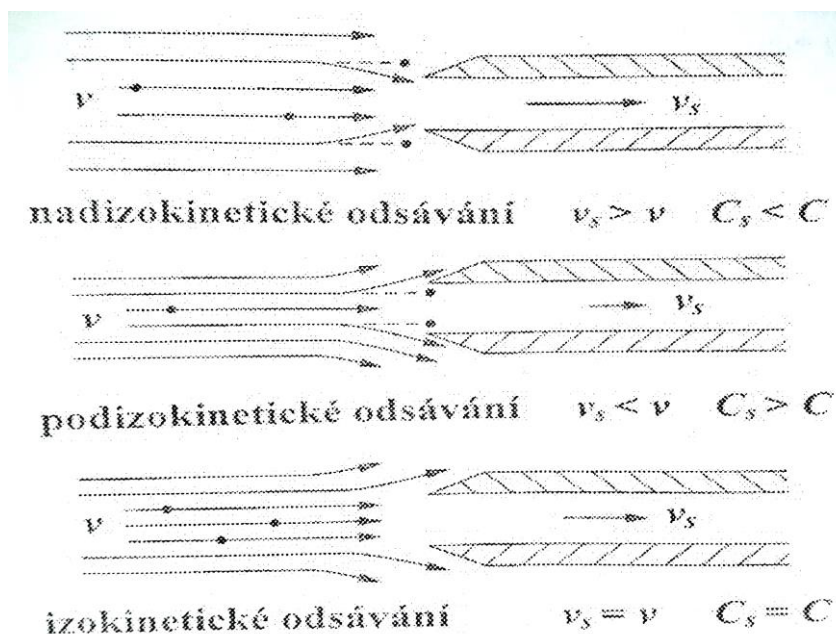
Obr. 17: Účinnosti zachycení částice pro různé povrchy impakčních ploch [9]

Vstup do impaktoru je nadimenzován pro přívodní trubku o vnitřním průměru 12 mm. Je to tak z toho důvodu, že v trubce tohoto průměru se bude rychlost proudění pohybovat při středních průtocích okolo 8 – 10 m/s. To jsou rychlosti, při kterých by nemělo docházet k odlučování částic v záhybech potrubí a zároveň ani k sedimentaci, což jsou samozřejmě jevy, které by negativně ovlivňovaly výsledky měření. Výsledný návrh sestavy impaktoru je v příloze č. 1.

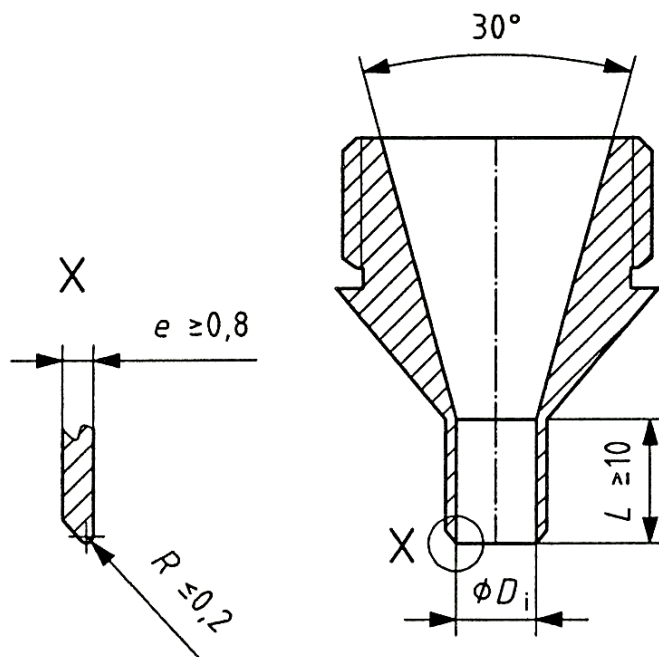
8. Měření a vyhodnocení

Odběr vzorkovacího plynu by měl být umístěn v části potrubí s ustáleným prouděním. Tedy v rovné části potrubí a v dostatečné vzdálenosti od záhybů a změn průměru. Podrobně je to popsáno v normě ČSN 83 4617. Aby byla zachována rovnost koncentrací prachu v odpadním plynu a vzorkovacím plynu, odsávání vzorku musí být nastaveno tak, aby byl odběr izokinetický. Tento problém ukazuje obrázek č. 18. Ideální hubice sondy má válcový tvar a je nekonečně tenká. Reálná hubice by měla mít tenké stěny a skosení s malým úhlem na vnitřní nebo vnější straně. Čelo sondy by mělo být mírně zaoblené. Příklad takové sondy je vidět na obrázku č. 19. Aby byl pokryt celý rozsah průtoků impaktorem a zároveň byl dodržen izokinetický odběr, je potřeba mít pro měření k dispozici celou sadu sond různých průměrů. [12]

Narozdíl od gravimetrické metody se při měření impaktorem odebírá vzorek pouze v jednom místě, přičemž se předpokládá rovnoměrné rozložení koncentrace částic po průřezu potrubí.

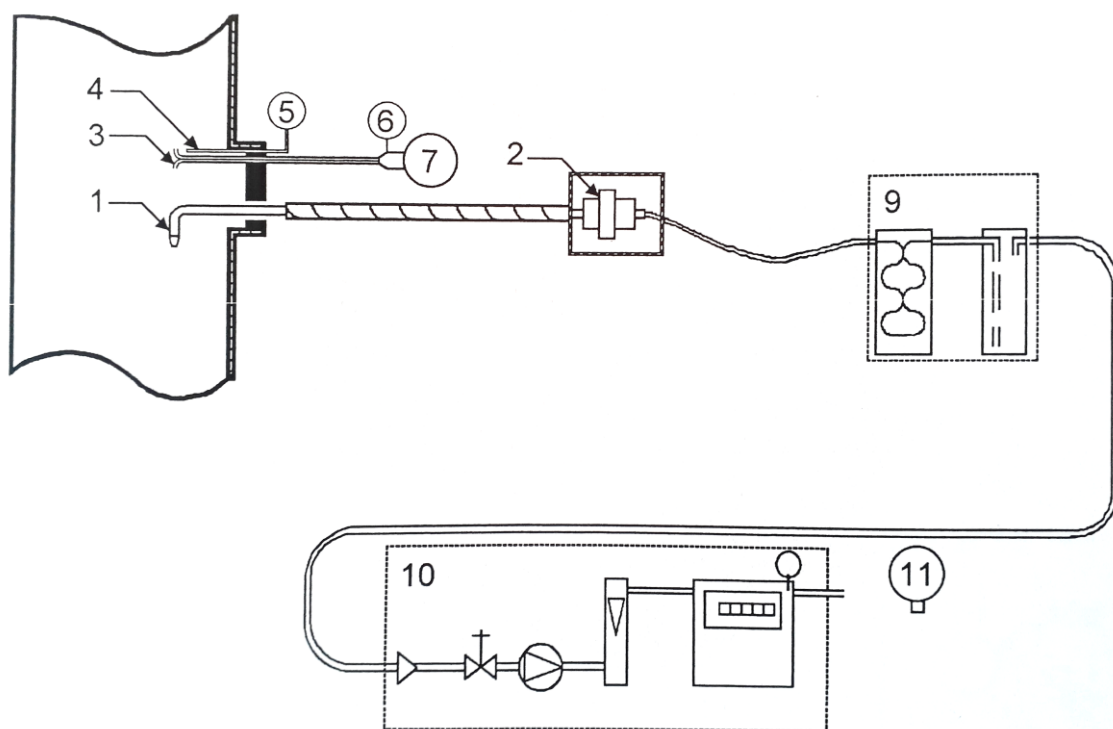


Obr. 18: Zkreslení odebraného vzorku vlivem neizokinetického odběru [12]



Obr. 19: Příklad odběrové sondy [10]

Jak může vypadat celá měřicí trať, je vidět na obrázku č.20.



Obr. 20: Příklad vzorkovacího systému – hubice sondy (1), odlučovač částic (2), Prandtlova trubice (3), teplotní čidlo (4), měřidlo teploty (5), měření statického tlaku (6), měření diferenčního tlaku (7), chladičí a sušící zařízení (9), sací jednotka (10), tlakoměr (11) [19]

Po ukončení odběru vzorku se prach zachycený na jednotlivých stupních impaktoru zváží. Získáme tak hmotnosti z jednotlivých stupňů M_1 , M_2 , M_3 a hmotnost prachu na konečném filtru M_f . Pro výpočet koncentrací jednotlivých frakcí v odpadním plynu se použijí vzorce (8) až (11). [2]

$$C_{PM1} = \frac{M_f}{V_n}, \quad (8)$$

kde:

V_n je objem vzorkovacího plynu přepočtený na standardní podmínky [m^3]

Obdobně pro koncentraci $PM_{2,5}$ bude platit následující vzorec:

$$C_{PM2,5} = \frac{M_f + M_3}{V_n}. \quad (9)$$

A pro koncentraci PM_{10} následující vzorec:

$$C_{PM10} = \frac{M_f + M_3 + M_2}{V_n}. \quad (10)$$

Objem vzorkovacího plynu přepočtený na standardní podmínky se vypočte podle rovnice (11).

$$V_n = V \frac{T_n(p_{atm} + p_{st})}{p_n \cdot T \left(1 + \frac{f_n}{\rho_{w,n}}\right)}, \quad (11)$$

kde:

V je skutečný (naměřený) objem vzorkovacího plynu [m^3]

T_n je standardní teplota 273,15 K

p_{atm} je atmosférický tlak [Pa]

p_{st} je rozdíl statického tlaku v místě odběru a atmosférického tlaku [Pa]

p_n je standardní tlak 101 325 Pa

T je teplota odebíraného vzorku plynu [K]

f_n je fiktivní vlhkost plynu za normálních podmínek [kg/m^3]

$\rho_{w,n}$ je hustota vodní páry za standardních podmínek a má hodnotu 0,804 kg/m^3

Celkovou koncentraci TZL bych analogicky získal tak, že bych k čitateli ve vzorci (10) přičetl ještě M_1 (případně i hmotnost prachu odloučenou v předodlučovači). Tato celková koncentrace se pak dá porovnat s předepsanými emisními limity pro zdroj, na kterém bylo měření provedeno. Odebrané vzorky poté také mohou projít chemickým rozbořením, kvůli zjištění přítomných nebezpečných látek. Emisní limity se sice chemickým složením TZL nezabývají, ty imisní ovšem stanovují limit pro obsah arsenu, kadmia, niklu a benzo[*a*]pyrenu v částicích PM_{10} . Není tedy úplně scestné se přítomností těchto látek (a samozřejmě i jiných škodlivých látek) v emisích TZL zabývat, neboť v atmosféře se emise rozptylem a dálkovým transportem stávají imisemi.

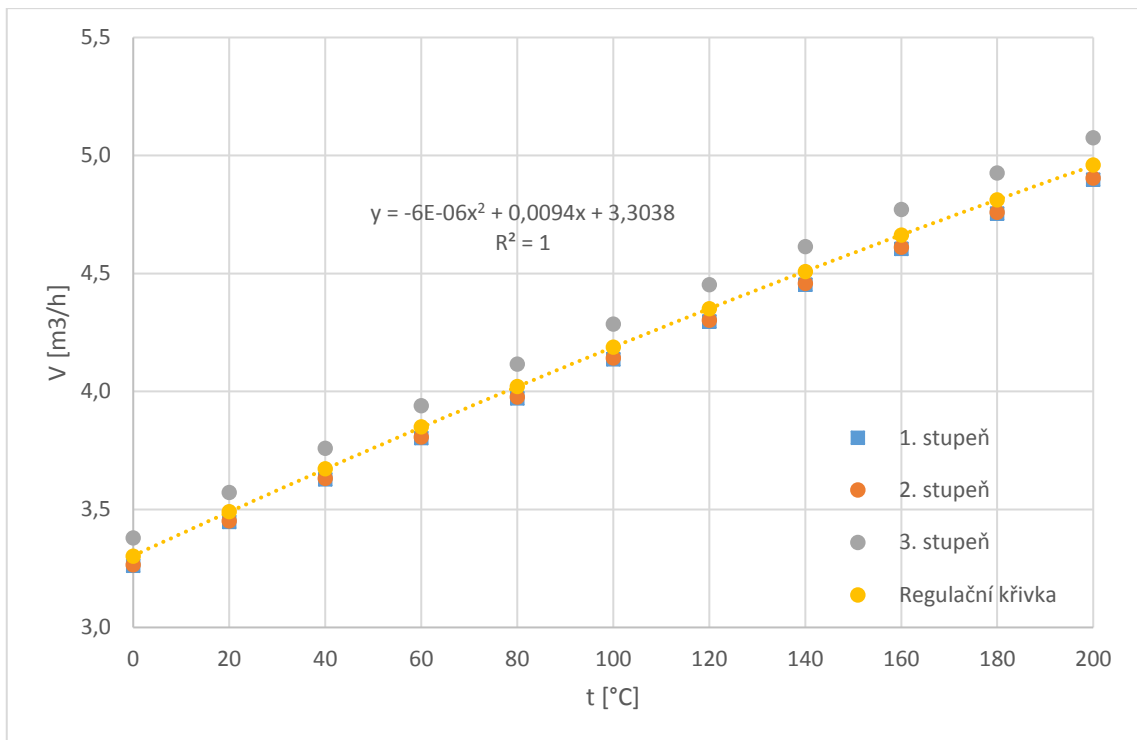
8.1 Regulace průtoku

8.1.1 Suchý vzduch

Impaktor má pracovat v teplotním intervalu 0 až 200 °C. Jak již bylo popsáno, návrh celého impaktoru počítá s konstantním Stokesovým číslem. Jelikož v definici Stk v rovnici (1) vystupuje dynamická viskozita, která je teplotně závislá, bude potřeba regulovat rychlost v tak, aby se hodnota Stk nezměnila. Použiji zde rovnici (3), ve které mi už místo rychlosti v jednotlivých tryskách vystupuje celkový objemový průtok stupněm, a vyjádřím z ní \dot{V} . Získám tak rovnici (12).

$$\dot{V} = \frac{D^3 \cdot 9 \cdot \eta \cdot n \cdot \pi \cdot Stk}{D_c^2 \cdot \rho_c \cdot C \cdot 4} \quad (12)$$

Jak závisí dynamická viskozita suchého vzduchu na teplotě, bylo již uvedeno v rovnici (4). Dosazením získám závislosti zobrazené na obrázku č. 21.



Obr. 21: Závislost průtoku suchého vzduchu na teplotě

To, že se body všech tří stupňů dokonale nepřekrývají, je způsobeno zaokrouhlením vypočtených průměrů trysek na desetinu milimetru. Z toho důvodu je v grafu zobrazena i regulační křivka, podle které by se průtok impaktorem řídil. Tato křivka byla získána jako aritmetický průměr hodnot všech tří stupňů. Jde o polynom druhého stupně s koeficientem determinace $R^2 = 1$, což znamená, že tato křivka prokládá vypočtené body dokonale přesně.

8.1.2 Spaliny uhlí

V případě měření odpadního plynu ze spalování uhlí použijí opět rovnici (12). Ovšem závislost dynamické viskozity budu muset vypočítat jiným způsobem než v případě suchého vzduchu. Abych získal dynamickou viskozitu, určím nejdříve kinematickou viskozitu a hustotu spalin. Pro hustotu spalin je nejdříve potřeba spočítat jejich hustotu za standardních podmínek. K tomu poslouží rovnice (13). [13]

$$\rho_n = \rho_{d,n} \cdot \omega_d + \rho_{w,n} \cdot \omega_w, \quad (13)$$

kde:

$\rho_{d,n}$ je hustota suchých spalin za standardních podmínek [kg/m^3]

ω_d je objemový poměr suchých spalin [-]

$\rho_{w,n}$ je hustota vodní páry za standardních podmínek a má hodnotu 0,804 kg/m³

ω_w je objemový poměr vodní páry ve spalinách [-]

Hustota suchých spalin za normálních podmínek se dá přesně určit pomocí stechiometrických rovnic spalování nebo výpočtem se znalostí přesného složení suchých spalin. S ohledem na fakt, že $\rho_{d,n}$ závisí především na přebytku spalovacího vzduchu, vyjádřeného koeficientem α , který ovlivňuje obsah CO₂ ve spalinách, se dá tato hustota zjednodušeně vyjádřit v závislosti pouze na obsahu CO₂. Pro případ hnědého uhlí tedy použiji vztah (14) a pro černé uhlí vztah (15). [13]

$$\rho_{d,n} = 1,293 + 0,004938 \cdot CO_{2,act} \quad (14)$$

$$\rho_{d,n} = 1,293 + 0,004929 \cdot CO_{2,act} \quad (15)$$

Obsah oxidu uhličitého ve spalinách $CO_{2,act}$ získám z následujícího vzorce:

$$CO_{2,act} = \frac{CO_{2,max}}{\alpha} \quad (16)$$

Obsah CO_{2,max} ve spalinách je při spalování hnědého uhlí 0,1915 a při spalování černého uhlí 0,1880. Podle literatury [13] se při reálných podmínkách dosáhne hraničních hodnot u hnědého uhlí pro rozsah součinitele přebytku vzduchu α od 1,2 do 2 a poměru vodních par ve spalinách ω_w od 0,1 do 0,25. U černého uhlí je rozsah součinitele α stejný, ale ω_w bude v rozsahu 0,08 až 0,15. Výpočtem průtoků pro tyto hodnoty tedy dostanu pásmo, ve kterém se budou pohybovat i průtoky spalin jiného složení. Nyní znám vše potřebné k výpočtu ρ_n a mohu tedy dopočítat reálnou hustotu spalin podle rovnice (17). [5]

$$\rho = \rho_n \frac{p}{p_n} \cdot \frac{T_n}{T} \quad (17)$$

Pro výpočet dynamické viskozity budu dále potřebovat kinematickou viskozitu spalin, kterou získám z rovnice (18). [13]

$$v = M_v \cdot v_{mean}, \quad (18)$$

kde:

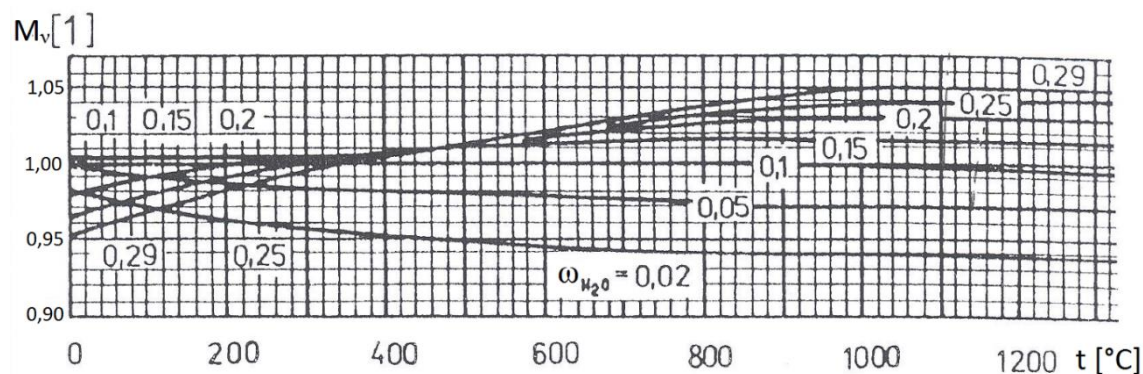
M_v je korekční faktor kinematické viskozity [-]

v_{mean} je střední kinematická viskozita [m^2/s]

Střední kinematická viskozita v_{mean} je hodnota pro složení spalin $\omega_w = 0,11$ a $CO_{2,mean} = 0,13$. Její závislost na teplotě je dána vztahem (19). [13]

$$v_{mean} = (10^{-4} \cdot t^2 + 0,0795 \cdot t + 11,9) \cdot 10^{-6} \quad (19)$$

Korekční faktor M_v je závislý na obsahu vodní páry ve spalinách a na teplotě a lze ho odečíst z diagramu na obrázku č. 22.

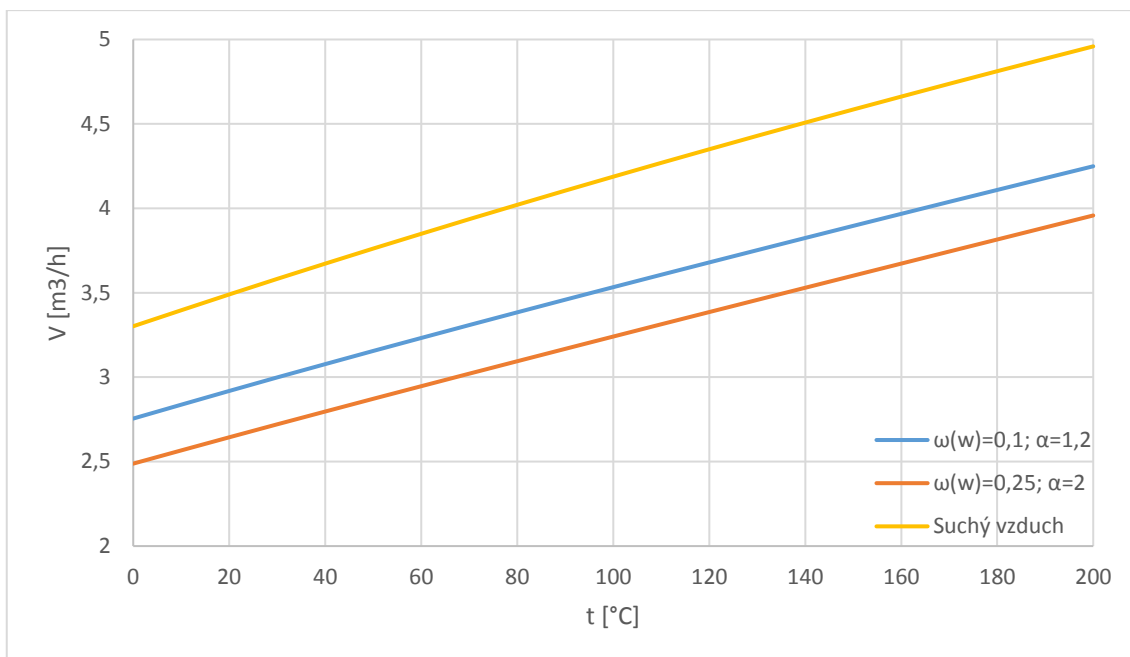


Obr. 22: Diagram pro odečet M_v [14]

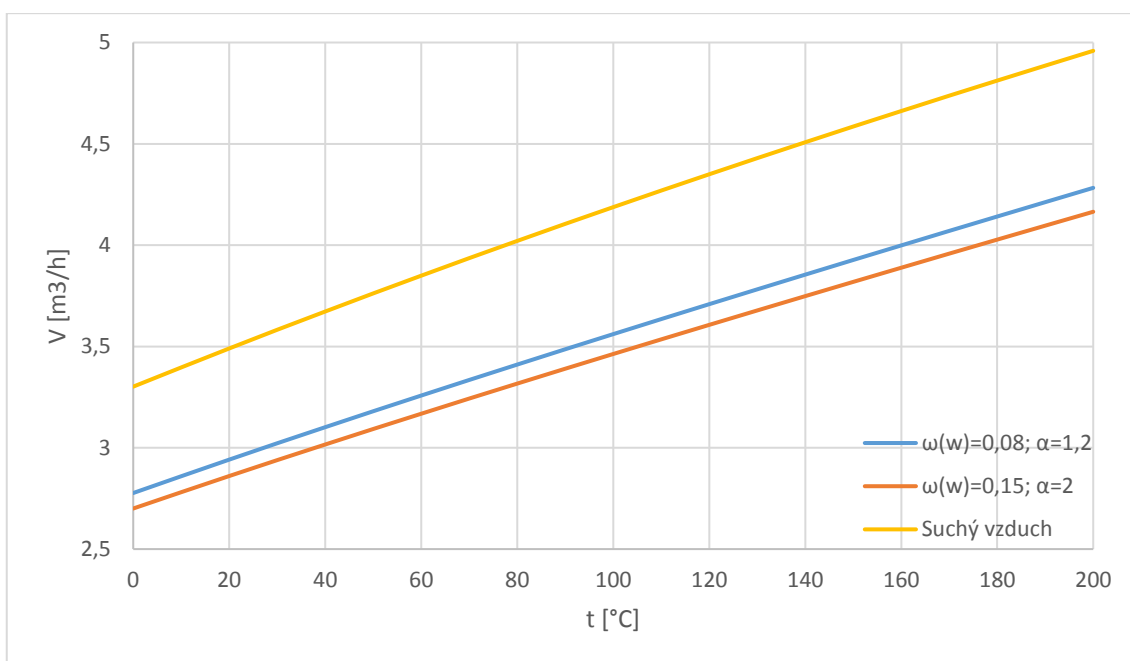
Nyní znám hustotu i kinematickou viskozitu spalin a mohu z rovnice (20) vypočítat dynamickou viskozitu spalin.

$$\eta = v \cdot \rho \quad (20)$$

Dosazením do rovnice (12) pak dostávám závislost průtoku spalin na teplotě pro hnědé uhlí (obrázek č. 23) a černé uhlí (obrázek č. 24).



Obr. 23: Závislost průtoku spalin hnědého uhlí na teplotě



Obr. 24: Závislost průtoku spalin černého uhlí na teplotě

8.2 Zdroje nepřesností měření

Při měření impaktorem standardně dochází ke ztrátám částic. Některé částice se neodloučí tak, jak teorie předpovídá. Jiné se se usadí na vnitřních stěnách impaktoru. Podle literatury [20] jsou ztráty tím větší, čím větší je velikost částice. Z toho důvodu bych při měření impaktorem navrženým v této práci doporučil použít předodlučovač navržený na odběr

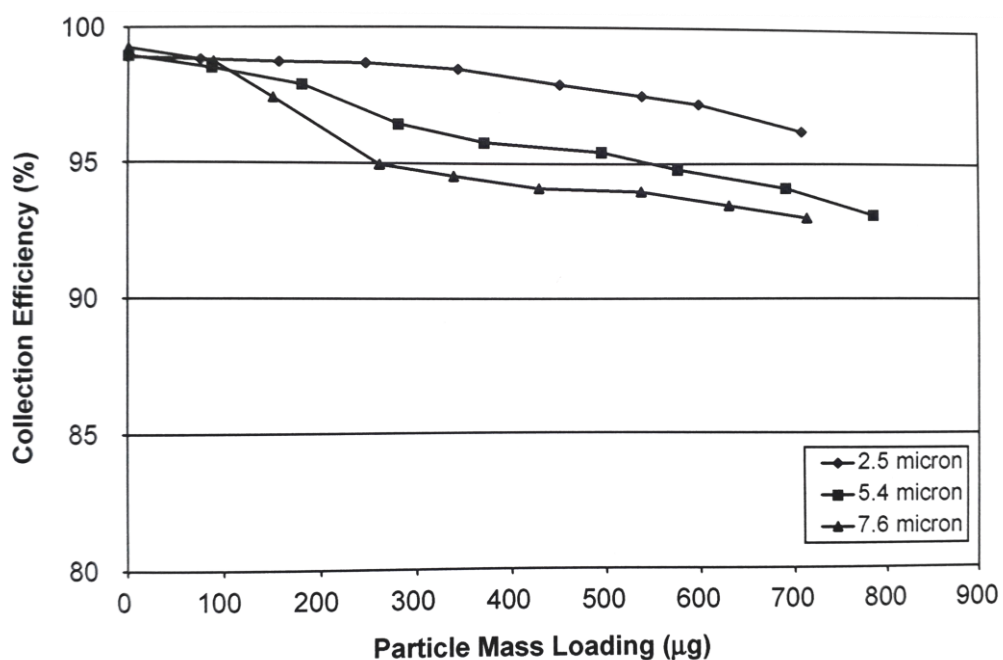
částic velikosti okolo 15 μm . Tím by se měly omezit ztráty částic na stěnách impaktoru v prostotu nad tryskami prvního stupně. Kdyby předodlučovač použit nebyl a ztráty nad prvním stupněm by byly nezanedbatelné, přičetl by se tento prach k prvnímu stupni.

Jak se ukázalo u grafu regulační křivky na obrázku č. 21, nepřesnost může způsobit také kvalita výroby trysek. Z hlediska výroby bych také doporučil v místech, kudy v impaktoru proudí plyn, dobře srazit hrany a povrchy zde udělat maximálně hladké.

Další nepřesnosti mohou být zapříčiněny nesprávným určením vlastností odpadního plynu. Může se jednat o tyto vlastnosti [21]:

- statický tlak plynu
- dynamický tlak plynu
- teplota plynu
- složení plynu (což má vliv na určení dynamické viskozity)

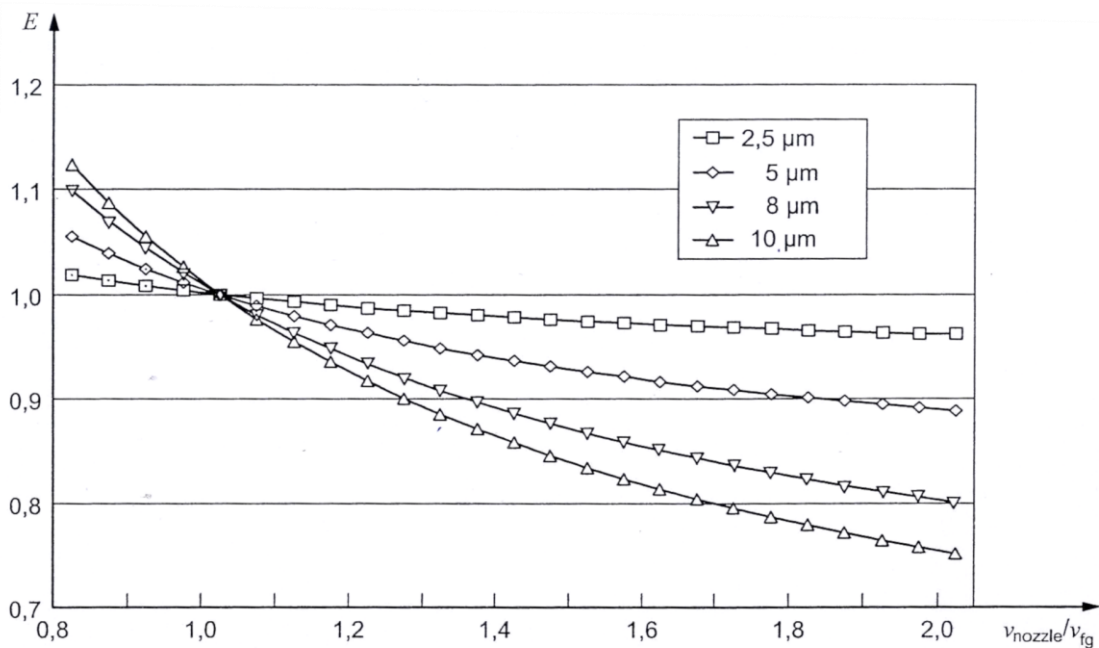
Dále může vzniknout nepřesnost při samotném odlučovacím procesu, kdy může částice při dopadu od impakční plochy odskočit a pokračovat dál s proudem. Také se může stát, že již odloučená částice se uvolní zpět do proudu plynu. Na to má vliv množství již zachycených částic, jak ukazuje graf na obrázku č. 25. Z grafu plyne, že příliš dlouhá doba odběru vzorku, a tedy zanesení impakčních ploch, může negativně ovlivnit výsledek měření.



Obr. 25: Závislost účinnosti záchytu částic na množství již zachycené hmoty pro stupeň PM1 [22]

8.2.1 Problematika měření u malých spalovacích zdrojů

Při měření spalin malých zdrojů se výrazněji projevují tzv. periody spalování, které jsou dány přísunem paliva. Ty způsobují, že za kotlem je proměnlivá teplota a rychlost spalin. U malých spalovacích zařízení se používá gravimetrická metoda, která vyžaduje izokinetický odběr vzorku. To samozřejmě narušuje nestálá rychlost spalin za kotlem. Řešením může být použití odběru vzorku se zředěním namísto přímého odběru. Na obrázku č. 26 je vidět, jak neizokinetika ovlivňuje efektivitu odběru částic různých velikostí. [24]



Obr. 26: Teoretická závislost efektivity odběru na poměru rychlosti v odběrové hubici a spalin v potrubí [10]

Impaktor je určen pro nízké koncentrace TZL v plynu. Použití zředovacího zařízení tedy navíc vyřeší i problém s vysokou koncentrací TZL ve spalinách, která způsobuje rychlé zanesení filtru a impakční ploch, což není z hlediska minimální potřebné doby měření vhodné. Také se zředěním docílí nižší teploty spalin, díky čemuž některé plynné znečišťující látky zcondenzují na prachových částicích. Naměří se tak větší koncentrace TZL než při měření bez zředění. Je to ale blíže chování odpadního plynu vypuštěného do atmosféry. [24]

9. Závěr

V úvodní, rešeršní části práce byla popsána česká legislativa týkající se ochrany ovzduší. Hlavním právním předpisem je v této oblasti od roku 2012 zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší a vyhlášky na něj navazující. Jak bylo zmíněno již v úvodu, je zajímavé, že imisní limity jsou stanoveny zvlášť pro frakce PM_{10} a $PM_{2,5}$ a emisní limity jen pro celkovou koncentraci TZL. Z kapitoly o zdravotních rizicích vyplývá, že čím menší je částice, tím větší nebezpečí pro člověka představuje, a tudíž má význam zabývat se měřením frakce PM_1 a případně i ještě jemnějších frakcí. Z grafických ročenek Českého hydrometeorologického ústavu je vidět, že problém znečištění ovzduší TZL je u nás stále aktuální i přesto, že trend koncentrací těchto látek je z dlouhodobého hlediska klesající. Největší problémy se znečištěním ovzduší jsou na našem území v okolí Ostravy, Karviné a Frýdku-Místku.

V praktické části byl pak navržen třístupňový impaktor pro tříděný odběr frakcí PM_{10} , $PM_{2,5}$ a PM_1 . Při jeho dimenzování jsem použil matematický model Virgil A. Marpla [9]. V rámci tohoto návrhu bylo mým úkolem posoudit vliv Cunninghamova korekčního součinitele na skluz. Ukázalo se, že jeho vliv roste s jemností částice. U frakce PM_{10} jsem jeho hodnotu stanovil na 1,016, u $PM_{2,5}$ na 1,064 a u frakce PM_1 na 1,160. U PM_1 je jeho vliv na stanovení Stk poměrně výrazný a minimálně u této frakce považuji za nutné s ním počítat. Výkres sestavy impaktoru a detailnější výkresy jednotlivých stupňů jsou v přílohách této práce.

Pro měření s impaktorem bylo mým dalším úkolem získat regulační křivky pro případy měření suchého vzduchu, spalin černého uhlí a spalin hnědého uhlí. Zadaný rozsah teplot a průtoků impaktorem byl $0 - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $2 - 6\text{ m}^3/\text{hod}$. Na obrázku č. 21 je závislost získaná pro suchý vzduch. Jsou zde vidět závislosti vypočtené zvlášť pro všechny tři stupně. Tyto závislosti se liší kvůli zaokrouhlení vypočtených průměrů trysek na desetinu milimetru, a z toho důvodu je v grafu také regulační křivka získaná jako aritmetický průměr všech tří stupňů. U spalin uhlí jsem počítal průtoky pro mezní hodnoty složení spalin, ve kterých se běžně tyto spaliny pohybují. Získal jsem tak pásmo hodnot, které by mělo pokrývat spaliny vlastností (složení), se kterými je možné se v praxi setkat. Tyto závislosti jsou na obrázcích č. 23 a 24.

Citovaná literatura

- [1] Zákon o ochraně ovzduší. In: 201/2012. číslo 201. Dostupné také z: https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/SearchResult.aspx?q=201/2012&typeLaw=zakon&what=Cislo_zakona_smlouvy
- [2] Vyhláška. In: 330/2012. číslo 330. Dostupné také z: https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/SearchResult.aspx?q=330/2012&typeLaw=zakon&what=Cislo_zakona_smlouvy
- [3] Vyhláška. In: 415/2012. číslo 415. Dostupné také z: https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/SearchResult.aspx?q=415/2012&typeLaw=zakon&what=Cislo_zakona_smlouvy
- [4] Imisní monitoring [online]. [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/imisni_monitoring
- [5] Grafická ročenka 2017 [online]. [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/17groc/gr17cz/IV1_PM_CZ.html
- [6] HEMERKA, Jiří. Malé spalovací zdroje a ochrana ovzduší. *Vytápění větrání klimatizace*. 2014, **23**(2). ISSN 1210-1389.
- [7] *Vychází publikace o znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2017* [online]. [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/tiskove_zpravy/2018/TISKOVA_ZPRAVA_dlouha_MS_LV_obr.doc
- [8] ČSN ISO 7708. *Kvalita ovzduší - Definice velikostních frakcí částic pro odběr vzorků k hodnocení zdravotních rizik*. 1998.
- [9] MARPLE, Virgil A. a Klaus WILLEKE. *Inertial impactors: theory, design and use*. Published in: *Fine particles: Aerosol generation, measurement, sampling and analysis*. Academic press, New York, 1976, , 411-446.
- [10] ČSN EN ISO 23210. *Stacionární zdroje emisí - Stanovení hmotnostní koncentrace frakce PM10/PM2,5 v odpadním plynu - Stanovení nízkých koncentrací pomocí impaktorů*. 2010.
- [11] NEWTON, G. J., O.G. RAABE a B.V. MOKLER. Cascade impactor design and performance. *Journal of aerosol science*. 1977, (8), 339-347.
- [12] HEMERKA, J. a P. VYBÍRAL. *Základy ochrany ovzduší*. Nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 987-80-01-03922-9.

- [13] HEMERKA, J., M. BRANIŠ a P. VYBÍRAL. Cyclones as PM10 and PM2,5 emission measurement classifiers. *Proceedings of Air Pollution XVIII*. 2010, , 395-406.
- [14] DLOUHÝ, T. *Design of boilers and flue gases heat exchangers*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999.
- [15] HEMERKA, J. *Odlučování tuhých částic*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1994. ISBN 80-01-01088-0.
- [16] DRASTICHOVÁ, V. *Měření emisí ultrajemných částic z malých spalovacích zařízení se zřetelem na nové poznatky z výzkumu bezpečnosti nanočástic*. Ostrava, 2015. Disertační práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [17] KUBESA, P. *Návrh zařízení pro izokinetický odběr TZL z malých spalovacích zařízení*. Ostrava, 2011. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [18] Levelexpert.cz [online]. 2007 [cit. 2019-06-04]. LEVEL INSTRUMENTS CZ - LEVEL EXPERT. Dostupné z WWW: <<http://www.levelexpert.cz/produktydetail.php?kod=40&kategorie=3>>.
- [19] ČSN EN 13284-1. *Stacionární zdroje emisí - Stanovení nízkých hodnot hmotnostní koncentrace prachu - Manuální gravimetrická metoda*. 2001.
- [20] JOHN, A. C., T. A. J. KUHLBUSH, H. FISSAN, G. BRÖKER a K.-J. GEUEKE. Development of a PM10/PM2,5 Cascade impactor and in-stack measurements. *Aerosol Science and Technology*. 2003, (37), 694-702.
- [21] BURDA, M. *Návrh kaskádního impaktoru*. Praha, 2013. Bakalářská práce. ČVUT.
- [22] MISRA, Ch., M. SINGH, S. SHEN, C. SIOUTAS a P. M. HALL. Development and evaluation of a personal cascade impactor sampler (PCIS). *Journal of Aerosol Science*. 2002, (33), 1027-1047.
- [23] KUBESA, P., J. HORÁK, K. KRPEC, F. HOPAN, Z. JANKOVSKÁ a L. MARTINÍK. *Emise prachu z malých spalovacích zařízení na tuhá paliva a metody jejich stanovení* [online]. 4.2.2013 [cit. 2019-06-06]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/9536-emise-prachu-z-malych-spalovacich-zarizeni-na-tuha-paliva-a-metody-jejich-stanoveni>
- [24] EHRlich, C., G. NOLL, W.-D. KALKOFF, G. BAUMBACH a A. DREISEIDLER. PM10, PM2,5 and PM1 - Emissions from industrial plants - Results from measurement programmes in Germany. *Atmospheric Environment*. 2007, (41), 6236-6254.

Seznam příloh

1. Výkres sestavy navrženého impaktoru
2. Výkres dílů prvního stupně impaktoru
3. Výkres dílů druhého stupně impaktoru
4. Výkres dílů třetího stupně impaktoru
5. Výkres aluminiových impakčních folií
6. Kusovník sestavy impaktoru