VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

IMPAKTOR PRO ODBĚR JEMNÝCH ČÁSTIC

IMPACTOR FOR FINE PARTICLE COLLECTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Bc. Kateřina Paulíková**

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.**

SUPERVISOR

BRNO 2021

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Studentka:	**Bc. Kateřina Paulíková**
Studijní program:	Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	**doc. Ing. Jiří Pospíšil, 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:

Impaktor pro odběr jemných částic

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na problematiku třídění a záchytu částic využitím změny směru proudu vzduchu s jemnými částicemi. V rámci zpracování práce bude na základě provedené rešerše dostupné literatury představen princip a konstrukce impaktoru a základní výpočtové vztahy. Dále bude proveden návrh konkrétní geometrie impaktoru pro zadané parametry. V případě, že to situace dovolí, bude impaktor vyroben a jeho funkce otestována v laboratořích Energetického ústavu.

Cíle diplomové práce:

1. Stručně představit problematiku jemných částic a principu záchytu jemných částic.
2. Vytvořit zpřesněný způsob výpočtu kaskádového impaktoru.
3. Porovnání vytvořeného výpočtového postupu a parametrů komerčního impaktoru.
4. Návrh vlastního impaktoru pro zadané parametry.

Seznam doporučené literatury:

KODAD, Daniel. Impaktor pro laboratorní záchyt jemných částic [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132266.

ISO 23210:2009: Stationary source emissions — Determination of PM10/PM2,5 mass concentration in flue gas — Measurement at low concentrations by use of impactors. Dostupné z: https://www.iso.org/standard/53379.html.

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 pojednává o problematice jemných částic obsažených v ovzduší a jejich možnosti analýzy, měření a záchytu. Nejdříve jsou popsány jemné částice z hlediska velikosti a původu. Popsán je vliv jemných částic na zdravotní stav člověka. Přiblíženy jsou zde metody analýzy ovzduší a měření TZL. Další kapitola představuje legislativu emisí a imisí v České republice. Stručně jsou vysvětleny vybrané typy impaktorů. Praktická část se dělí do tří kapitol, které obsahují základní výpočtový postup a následné jeho zpřesnění, porovnání vytvořeného výpočtového postupu a parametrů komerčního impaktoru a návrh vlastního impaktoru pro zadané parametry dle vytvořeného výpočtového postupu.

Klíčová slova

Impaktor, jemné částice, emise, imise

ABSTRACT

This master thesis provides an overview of fine particles contained in the air and possibilities for their analysis, measurement and capture. In the beginning, the fine particle's size and origin is described. Then, the influence of fine particles on human health is stated. Next, methods of air analysis and fine particle's measurement are presented. Legislation for emissions and immissions in the Czech Republic is summarized. Finally the selected types of impactors are introduced. The practical part consists of three chapters. First chapter contains the fundamental calculation procedure and its subsequent refinement. In the following part the comparison of the calculation procedure with the parameters of the commercial impactor is provided. Lastly, the design of the impactor is created for the specified parameters using the developed calculation procedure.

Key words

Impactor, fine particles, emissions, immissions

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PAULÍKOVÁ, Kateřina. *Impaktor pro odběr jemných částic.* Brno, 2022. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140367. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Impaktor pro odběr jemných částic** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum Kateřina Paulíková

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu práce doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za odborné rady při zpracování tohoto tématu. Dále bych chtěla poděkovat své rodině za veškerou podporu během celého studia. A mému příteli za trpělivost, rady a podporu při psaní diplomové práce.

Obsah

ÚVOD 11
1 Problematika znečištění ovzduší 13
1.1 Jemné částice 14
1.1.1 Popis velikosti částic 15
1.1.2 Primární PM 16
1.1.3 Sekundární PM 16
1.2 Nanobezpečnost 16
1.3 Analýza ovzduší 17
1.3.1 Chromatografie 17
1.3.2 Biomonitoring kvality ovzduší 18
1.3.3 Satelitní analýza aerosolových částic 19
1.4 Metody měření TZL 20
1.4.1 Gravimetrická metoda stanovení koncentrace TZL 20
1.4.2 Frekvenční snímač hmotnosti depozitu s kmitajícím kuželíkem 22
1.4.3 Radiometrická metoda 23
1.4.4 Metoda využívající elektrické mobility 24
1.4.5 Fotometrické metody 25
2 Legislativa 27
2.1 Imisní limity 27
2.1.1 Měření imisí TZL 28
2.2 Emisní limity 29
2.2.1 Měření emisí TZL 29
3 Impaktor 30
3.1 Kaskádový impaktor 30
3.1.1 Andersenův vysokoprůtočný kaskádový impaktor 31
3.1.2 Elektrický nízkotlaký kaskádový impaktor 31
3.1.3 Sioutasův osobní kaskádový impaktor 32
3.1.4 Využití kaskádového impaktoru 32
3.2 Virtuální impaktor 33
3.2.1 Využití virtuálního impaktoru 34
4 Výpočetní vztahy 35
4.1 Základní výpočet 35
4.2 Zpřesněný výpočet 38

4.2.1 Ztráta změnou rychlosti, teplotě a stlačitelností vzduchu 38
4.2.2 Ztráta nárazem na impakční plochu 41
4.2.3 Ztráta zkosením trysky na vstupu trysky 42
4.2.4 Ztráta změnou směru proudění 43
4.2.5 Ztráta třením 44
4.2.6 Celková tlaková ztráta 45
4.3 Získané hodnoty podle výpočtů 46
5 Porovnání vytvořeného výpočtového postupu a parametrů komerčního impaktoru 49
5.1 Komerční impaktor 49
5.2 Porovnání geometrie navrženého a komerčního impaktoru 49
5.2.1 Tříděná frakce PMx 49
5.2.2 Průměr a počet trysek 50
5.2.3 Tlakové ztráty 52
6 Konstrukční návrh vlastního impaktoru 53
6.1 Konstrukce pater impaktoru 54
6.2 Konstrukce podložky s impakčním materiálem 56
6.3 Konstrukce spodního a horního dílu impaktoru 57
6.4 Redukční kroužek 57
ZÁVĚR 58
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ 60
SEZNAM OBRÁZKŮ 63
SEZNAM TABULEK 64
SEZNAM ZDROJŮ 65
SEZNAM PŘÍLOH 69

ÚVOD

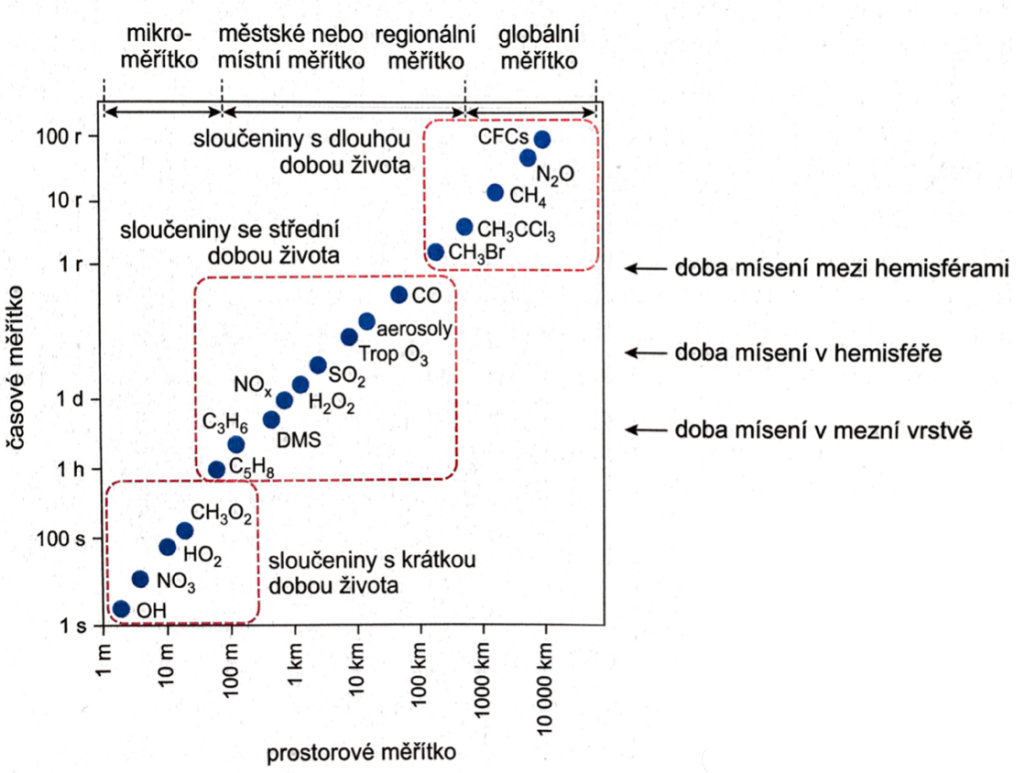
Pro udržení ochrany životního prostředí je nutné co nejpřesnější monitorování znečišťujících látek v ovzduší. Znečišťující látky, zejména z průmyslových zařízení, mají významný dopad na přírodu a zejména na lidské zdraví. Měření aerosolových částic přestavuje jednu z nejkomplikovanějších výzev analýzy ovzduší. Jedno z řešení je postupná inovace zařízení, které se nazývá impaktor. Impaktory jsou zařízení, která slouží k záchytu jemných částic a některé jsou vybaveny i měřícími segmenty, které můžou provádět přímou analýzu částic obsažených v použitých vzorcích vzduchu, které impaktorem prochází.

Hlavním cílem práce je podle vytvořeného zpřesněného výpočtu navrhnout kaskádový impaktor pro odběr jemných částic a dále provést porovnání výpočtového postupu s parametry komerčního kaskádového impaktoru DEKATI DLPI+. Výstupem práce je vytvořený zpřesněný výpočet pro 14. patrový kaskádový impaktor, včetně porovnání výpočtu a skutečné geometrie komerčního impaktoru DEKATI DLPI+. Práce obsahuje konstrukční návrh šestipatrového kaskádového impaktoru včetně výkresové dokumentace.

V první kapitole práce je představena problematika znečištění ovzduší včetně popisu jemných částic. Dále je zmíněna nanobezpečnost, a tedy i vliv znečišťujících částic v ovzduší na lidské zdraví. K monitorování částic jsou v kapitole uvedeny některé z metod analýzy ovzduší a vybrané metody sloužící k měření jemných částic. Výběr těchto metod je založen na odlišnosti jejich principu vyhodnocování. Ve druhé kapitole je popsána současná legislativa pro emise a imise v České republice. Třetí kapitola se věnuje popisu vybraných typů impaktorů a jejich využitelnosti. Výpočetní postup včetně jeho zpřesnění je zpracován ve čtvrté kapitole a poté je v páté kapitole implementován na geometrií komerčního impaktoru a je zde okomentováno srovnání výsledků. Šestá kapitola představuje konstrukční návrh impaktoru dle vytvořeného výpočtu.

1 Problematika znečištění ovzduší

Problematika znečištění ovzduší má velký dopad jak na lidské zdraví, tak i na životní prostředí. Jemné částice v ovzduší vždy byly a jsou součástí životního prostředí na této planetě. Zdroje těchto částic lze nalézt v sopečné činnosti, fotochemických reakcích, lesních požárech a v neposlední řadě se jedná o zdroje způsobené lidskou činností, které se označují pojmem antropogenní zdroje. Člověk se dle odhadů podílí na produkci aerosolů obsažených v ovzduší více než z 50 %. V Evropě je snaha o významné snížení koncentrace škodlivin, a tak za poslední desetiletí podstatně klesly emise mnoha znečišťujících látek, které se v ovzduší nachází, což nakonec vedlo k celkovému zlepšení kvality vzduchu. V období mezi rokem 2007 a 2017 došlo ke snížení celkových emisí oxidů síry (SO_x) o 54 %, oxidů dusíku (NO_x) o více než třetinu a skleníkových plynů z průmyslu a elektráren o 12 %. I přesto je koncentrace znečišťujících látek na mnoha místech vyšší, než je žádoucí. Primárně ve větších městech a více obydlených oblastech jsou normy kvality ovzduší překračovány. Pokud jsou znečišťující látky vypuštěné v jedné zemi, můžou se atmosférou šířit a ovlivnit negativně kvalitu ovzduší i v dalších zemích. Jedná se zejména o množství ozónu, oxidu uhličitého a jemných částic, jejichž překročení představuje zdravotní riziko i negativní dopad na životní prostředí. Snižovaní emisí tedy zůstává důležitým úkolem. Samotné určení kvality ovzduší je založeno na srovnávání určených limitních hodnot specifických znaků kvality ovzduší s jejich ne vždy aktuálními hodnotami, které jsou zjištěny objektivními postupy ve vzorcích vzduchu zachycených rozmanitými způsoby na vybraných měřících stanovištích. Na obrázku číslo 1.1 je uvedené prostorové a časové měřítko reakcí složek atmosféry [1][2][3][4].



Obr. 1.1 Prostorové a časové měřítko reakcí složek atmosféry [4]

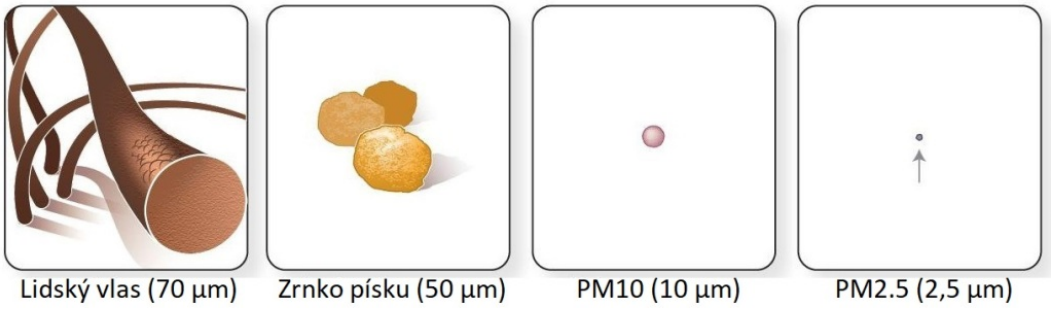
1.1 Jemné částice

Jemné částice jinak označované jako PM[1] či TZL[2] jsou směsí různorodých organických a anorganických částic pevného a kapalného skupenství rozptýlených v ovzduší o různé velikosti, tvaru, složení, optických vlastnostech a původu. Nesprávně se používá označení suspendované částice, které bylo převzato z anglického pojmenování, avšak přídavné jméno suspendovaný má v češtině jiný význam než v angličtině. Nejčastěji se pracuje s kategoriemi PM_{10}, $PM_{2,5}$ a PM_1. Jedná se o částice o aerodynamickém průměru 10 µm, 2,5 µm a 1 µm. Kategorie s ještě menším průměrem se označují jako UFP (ultrajemné částice) a NP (nanočástice), v případě UFP se jedná o hodnotu 0,1 µm a NP o 0,05 µm. Přehled kategorií na základě velikosti i s anglickým označením je uveden v tabulce číslo 1. Jemné částice se do ovzduší dostávají různými způsoby. Může se jednat o bodové, plošné či liniové zdroje. Přičemž částice představují velkou škálu částic s různými vlastnosti a výskytem. Dále PM částice lze rozdělit na primární druh částic a sekundární druh částic [4][5][6].

Tab. 1 Názvosloví částic podle velikosti [5]

Název	Průměr částic [nm]	Označení v AJ
Hrubé částice	<10 000	Coarse particles PM_{10}
Jemné částice	<2 500	Fine particles $PM_{2,5}$
Submikrometrové částice	<1 000	Fine particles PM_1
Ultrajemné částice	<100	Ultrafine particles UFP
Nanočástice	<50	Nanoparticles NP

Na následujícím obrázku číslo 1.2 je znázorněno zastoupení určitých typů částic podle velikostí, ve kterých se běžně vyskytují. Například koronavirus dosahuje velikosti 50 až 140 nm, tudíž by v porovnání znázorněném na obrázku byl několika násobně menší než částice $PM_{2,5}$ [7] .



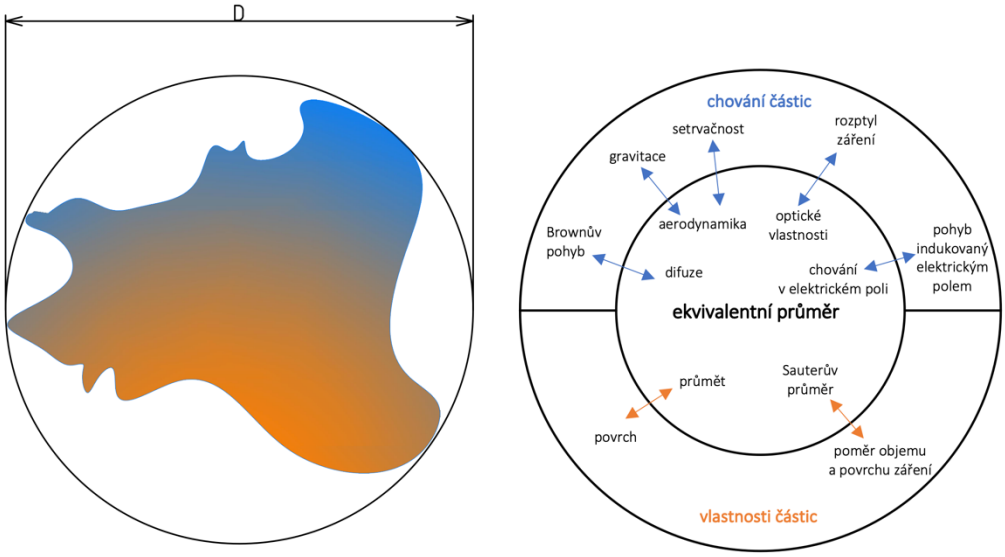
Obr. 1.2 Porovnání velikostí částic podle výskytu [47]

[1] Z anglického *particulate matter*, doslova částicová hmota. Termín používaný zejména ve zdravotnictví [1].
[2] Termín používaný v legislativě emisí

1.1.1 Popis velikosti částic

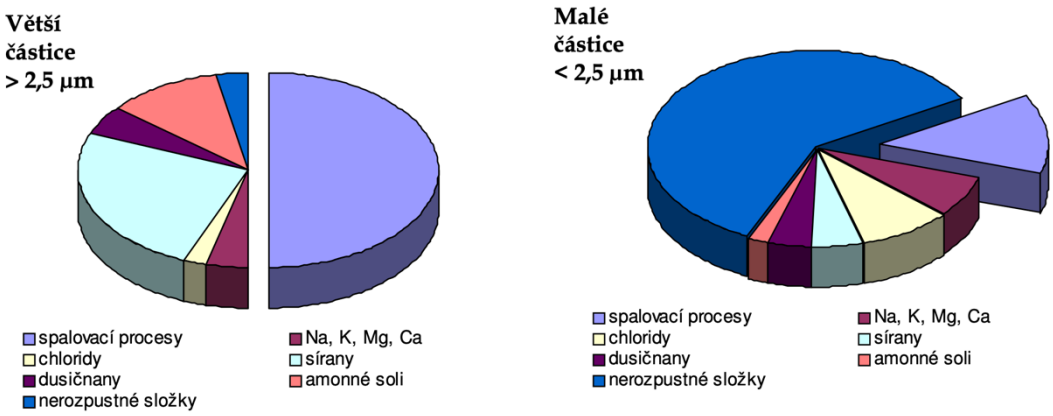
Z pohledu chování částic v atmosféře je podstatné znát jejich tvar, hustotu a velikost, kde právě velikost hraje klíčovou roli v popisu chování částic z hlediska fyzikálních zákonů. Každá částice má svůj originální a nepravidelný tvar, u kterého lze většinou stanovit klasický průměr jen velmi těžko. Pro následnou analýzu a měření dochází k zjednodušení geometrie částic. Jedno ze zjednodušení představuje použití průměru ekvivalentní kulové plochy, která je blízká aerodynamické charakteristice. Jde o vytvoření pomyslné obálky kolem částice nepravidelného tvaru. Ukázka, jakým klíčem se tvoří ekvivalentní kulová plocha, je znázorněna na obrázku číslo 1.3. Dále se v praxi se zavádí předpoklad, že všechny částice obsažené v ovzduší jsou sférické. Na základě naměřené koncentrace částic, se určí jejich měrný povrch a hmotnostní množství částic [4].

Velikost částic, jak již bylo výše zmíněno, je hlavním faktorem v oblasti fyzikálních zákonů. Pro nejmenší částice v řádu nanometrů platí zákony Brownova pohybu, tudíž při měření těchto částic se sleduje rychlost difúze, podle které se určí jejich tzv. difúzní ekvivalentní průměr. Částice o velikosti větší než 10 mikrometrů se indikují podle zákonů setrvačnosti a gravitace, kde na základě hybnosti (elektrické mobility) se měří ekvivalentní průměr elektrické mobility. Dalším typem sledování části je měření rozptylem světla, kde se používá termín optický ekvivalentní průměr. Ekvivalentní průměr je tedy velikost částice nepřímo určená pomocí fyzikálních či geometrických vlastností částice. V případě impaktoru se využívá aerodynamický ekvivalentní průměr, kde částice po takovém zjednodušení geometrie na idealizovaný kulový tvar s hustotou $\rho_č = 1000\ kg \cdot m^{-3}$ má totožnou pádovou rychlost jako reálná částice [4][8].



Obr. 1.3 Ekvivalentní průměr částice [4][8]

Složení částic je proměnné vůči různým oblastem, ale je používán tzv. model hlavních složek u městského prachu, který je vyobrazen na obrázku číslo 1.4. Na prvním koláčovém grafu je znázorněno zastoupení částic $PM_{2,5}$ a větších v němž dominuje obsah částic ze spalovacích procesů [9].



Obr. 1.4 Zastoupení konkrétních veličin podle velikosti částic [9]

1.1.2 Primární PM

Primární částice jsou emitovány do ovzduší přímo. Jejich zdroj může být antropogenní nebo přírodní. Do antropogenních zdrojů se řadí spalování paliv, technologické procesy či doprava, tudíž zdroje vzniklé lidskou činností. Mezi přírodní zdroje patří sopečná činnost, eroze půdy, emise aerosolových částic tvořených mořskou solí, lesní požáry nebo prachové bouře. Vulkanické projevy mají velmi významný podíl na množství aerosolových částic. Mimo jiné vulkanická činnost mezi lety 1991-1994 způsobila ochlazení zemského povrchu cca o 0,5 °C [1][4][9].

1.1.3 Sekundární PM

Sekundární částice vznikají až chemickými reakcemi primárních částic nebo fyzikálními procesy v ovzduší. Fyzikálním procesem může být například nukleace nebo kondenzace primárních částic v ovzduší. Sekundární částice můžou tedy vznikat v odlišných místech od zdrojů primárních částic [6][9].

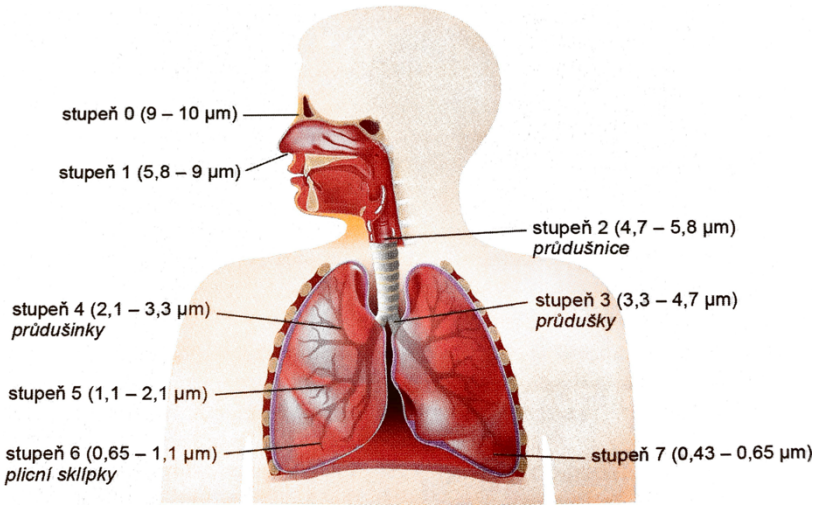
1.2 Nanobezpečnost

Atmosféra má časově proměnné složení, a tak člověk je vystaven působení různých konfigurací aerosolů, fyzikálnímu faktoru či biologické agens[3]. Škodliviny můžou vstupovat do organismu buď dýchacím ústrojím, zažívacím ústrojím, kůží a viditelnými sliznicemi. Nejčastěji se do těla dostávají dýchacím ústrojím, přičemž dospělý člověk ventiluje přibližně 20 m^3 vzduchu denně. Negativní zdravotní účinky závisí na době zadržení částic v dýchacím ústrojí, kde můžou způsobit změnu morfologie i omezení funkce řasinkového epitelu. Tyto změny umožňují snadnější výskyt infekce. Při náhlém zvýšení koncentrace částic PM_{10} dochází k zvýraznění obtíží u astmatiků a k celkovému zvýšení incidence[4]. Při dlouhodobém výskytu těchto škodlivin byla zjištěna i vyšší mortalita. Epidemiologické studie uváděných WHO[5] naznačují, že v oblastech s vysokou imisní zátěží pravděpodobná délka života může klesnout o více než

[3] mikroorganismus, a to bakterie, virus nebo houba, v přírodním nebo modifikovaném stavu, ve formě izolované živé kultury nebo substrátu obsahujícího živý materiál, který byl záměrně naočkován nebo nakažen touto kulturou [42]
[4] Počet nových onemocnění za období [43]
[5] z anglického *World Health Organization*, doslova Světová zdravotnická organizace

rok v porovnání s místy s nízkou imisní zátěží. A odhadem kvůli tomuto znečištění umírá předčasně asi 7 miliony lidí ročně podle údajů z roku 2018 dle WHO [1][4][9].

Velikost a tvar těchto škodlivých částic jsou hlavními ovlivňujícími faktory pro šíření a usazovaní v lidském těle. Taktéž záleží na depozičních plochách a množství vzdechnutých částic. Hrubší částice ve velikosti $PM_{2,5\text{-}10}$, které jsou inhalovány dýchacími cestami, jsou nejčastěji usazovány v horních dýchacích cestách a můžou se vyskytnout i v průduškách. Zatímco jemné částice o velikosti $PM_{0,1\text{-}2,5}$ putují hlouběji do plicních sklípků, kde můžou dále uvolňovat rozpustné polutanty, které mají značný význam na zdravotní stav člověka. Usazení částic v dýchací soustavě je znázorněno na obrázku číslo 1.5. Během celého života člověka se do plic usadí nemalé množství částic. Dýchací cesty však mají velmi důležitou samočistící schopnost. Jde o existenci řasinkového epitelu, který je pokrytý tenkou vrstvou hlenu. Vlnění řasinkového epitelu, které dosahuje počtu až 1000krát za minutu, způsobuje pohyb hlenu směrem k hltanu. V hltanu pak může dojít k vykašlání či spolknutí. Tato funkce je snižována, při rostoucím množstvím usazovaných částic v dýchacích cestách [10][11][12].



Obr. 1.5 Schéma ukládání částic v lidském těle [4]

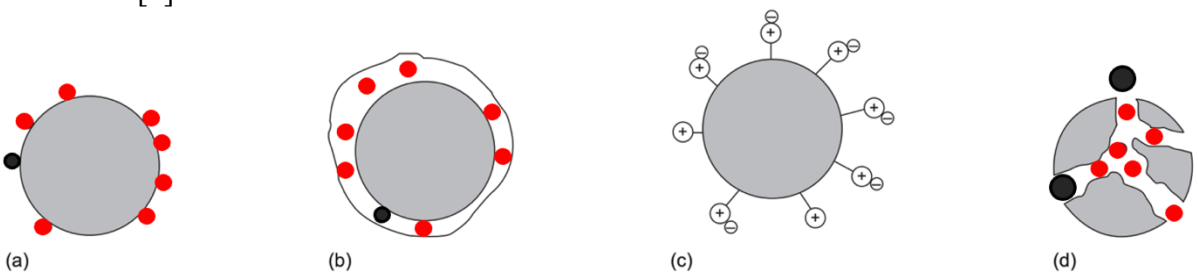
1.3 Analýza ovzduší

Analýza ovzduší patří mezi poměrně mladé vědní obory. Jelikož pozornost na vznikající škodliviny nebyla kladena v době velkého rozmachu výrobních technologií, tak do ovzduší putovalo velké množství jemných částic. Pro zjištění dopadů jednotlivých částic na určité skutečnosti je nutné znát jejich složení. Existuje tedy řada laboratoří a výzkumných institucí, které se analýzou ovzduší zabývají a využívají různých metod. V této práci jsou uvedeny tři metody. Chromatografie, biomonitoring kvality a satelitní analýza aerosolových částic. Každá z metod funguje na rozdílném principu a všechny typy budou popsány v následující části [4].

1.3.1 Chromatografie

V analýze ovzduší má významné zastoupení u jednorázových technik analýzy díky schopnosti oddělit malé množství analytu od matrice vzorku a následné jejich identifikace v rozumné míře nejistoty. Chromatografie je separační technikou pro rozbor složitějších směsí v ovzduší a využívá u ní primárně sloupcové chromatografie. Adsorpční, rozdělovací, iontová a gelová

chromatografie je znázorněna na obrázku číslo 1.6. Částice označené červeně jsou zadržovány větší silou než částice černé barvy, přičemž šedá část představuje fázi, která je vždy stacionární [4].



Obr. 1.6 Chromatografie a) Adsorpční b) Rozdělovací c) Iontová d) Gelová [13]

Princip adsorpční separace je dán vlivem fyzikální nebo chemické sorpce, při které se molekuly analytu hromadí na pevné stacionární fázi. U chromatografie rozdělovací je použit tenký film kapalné či pseudokapalné látky, který absorbuje molekuly analytu. Následně se molekuly přiřadí do stacionární nebo mobilní fáze podle konstanty specifické pro určitý typ molekuly. Konstanta se označuje jako distribuční konstanta. Mechanismus separace iontovou chromatografií spočívá v použití pevného nosiče, který má v sobě zabudované funkční aniontové nebo kationtové skupiny. Roztok elektrolytu obsahující iontové složky prochází chromatografickou kolonou, kde jsou zadržovány iontové složky pomocí elektrostatických sil. Pojem chromatografická kolona označuje situaci, kdy je vzorek vnesen na počátek kolony, následně je unášen proudem mobilní fáze a jednotlivé části ze vzorku se průběžně oddělují do té doby, než dojde k úplnému oddělení. Poslední zmíněný typ chromatografie je gelový, při němž dochází díky hydrodynamickému objemu k separaci složek. Ideálním výsledkem chromatografického rozboru je dokonalá separace jednotlivých analytů [4][13].

1.3.2 Biomonitoring kvality ovzduší

Počátek snahy o biomonitoring prostředí byl zaznamenán již v 19. století, kdy se jednalo především o hodnocení charakteristik rostlinných organismů. Pro označení organismu, který je schopen podat informace o kvalitě prostředí, je použit pojem bioindikátor. Výběr vhodných rostlin proběhl pod záštitou IAEA[6] ve společném projektu 14 zemí. Dle výsledků studie nižší rostliny mohou být bioindikátory kvality ovzduší ve velkých geografických celcích a v některých případech i v okolí bodových zdrojů. V případně nižších rostlin se mluví převážně o mechu či lišejníku. Lišejníky jsou vysoce citlivé na částice znečišťující ovzduší, obzvlášť na koncentrace SO_2. Citlivost je také i na toxické kovy, halogeny a radioaktivní spad. V tropických a subtropických oblastech je vhodným bioindikátorem jednoděložná bryofytická rostlina z rodu Tilandsie z čeledi bromélievitých.

Při biomonitoringu se sleduje z dlouhodobého hlediska výskyt nebo absence zmíněných mechů či lišejníků. Další možností je analýza množství znečišťujících částic v rostlinné tkáni. Jedná se například o množství toxických kovů v mechorostech. Poslední možností, jak lze určit hodnotu znečištění, je posouzení zdraví sledovaných rostlin tabáku. I pro biomonitoring venkovního ovzduší je vydaná evropská norma ČSN EN 16413 a norma ČSN EN 16789 [4].

V případě využití lišejníků je uplatnění této metody v praxi omezené, kvůli neobjektivnímu posuzování aktuálního stavu znečištění a jeho náročnosti. U metody využívající pozorování

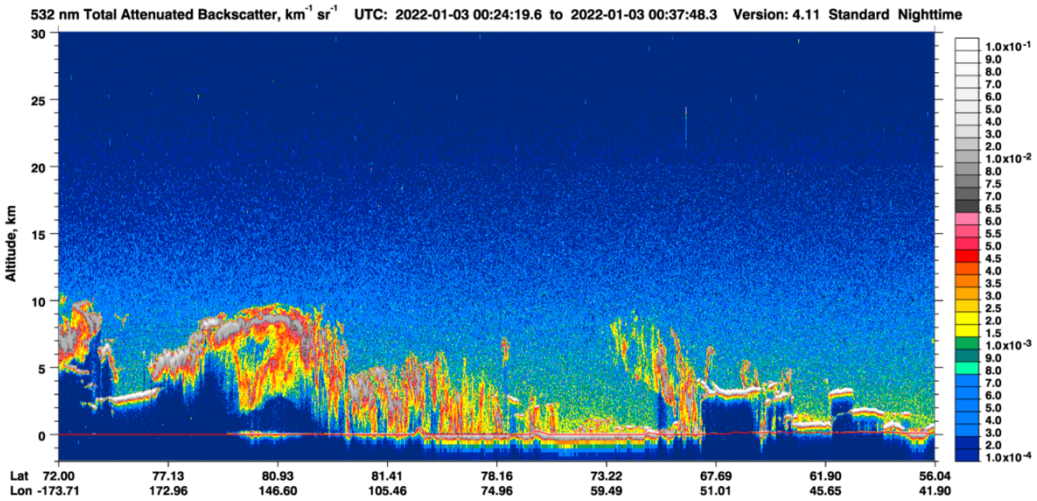
[6] z anglického *International Atomic Energy Agency*, přeloženo jako Mezinárodní agentura pro atomovou bezpečnost

kvality listů tabákové rostliny našla vyšší uplatnění ve všech oblastech světa. Zkoumání rozsahu znečištění na tabákových listech je znázorněno na obrázku číslo 1.7 [4].

Obr. 1.7 Analýza biomonitoringem z tabákových listů [4]

1.3.3 Satelitní analýza aerosolových částic

Provedení satelitní analýzy aerosolových částic začíná cca 700 až 800 km nad povrchem Země. Sledování probíhá různými způsoby. Satelitní analýza především sleduje vlastnosti minoritních plynných složek a aerosolových částic. Analýza je možná i satelitním sledování oblaků, podle nichž lze posoudit stav troposféry. Satelitní sledování se může pohybovat v různých časových měřítkách. Dlouhodobé sledování změny složení atmosféry nebo krátkodobé regionální studie. U obou typů pozorování se využívá družicových snímků Země a následné spektrometrické analýzy atmosféry s velkou škálou vlnových délek. Na oběžnou dráhu v roce 2006 byla uvedena družice CALIPSO, kterou NASA vybavila lidarem[7] s dvojicí diod buzených lasery. Lasery vysílají svazek paprsků o určité frekvenci a o určité jmenovité energii pulzů. Část energie pulzů prochází tzv. nelineárními krystaly, které zdvojnásobí vstupující frekvenci záření. Záření vstupuje do lidaru, kde se zachycuje pomocí beryliového teleskopu a na dichroickém zrcadle se rozděluje na složky vlnových délek. Různé vlnové délky se poté analyzují jinými zařízení. Příklad výsledků dosažených družicí CALIPSO je vyobrazen na obrázku číslo 1.8 [4].



Obr. 1.8 Výškový profil početní koncentrace aerosolových částic zaznamenaný lidarem v noci 3.1.2022 [48]

[7] Lidar je senzor či skupina senzorů, která zvládne mapovat blízké a vzdálené objekty a povrch [44]

1.4 Metody měření TZL

Co nejpřesnější měření škodlivých částic a nečistost v ovzduší napomáhá k udržitelnější ochraně životního prostředí. Mimo jiné slouží pro splnění daných právních předpisů, realizaci obchodních podmínek nebo pro potřebu územního plánování např. kvalita ovzduší v oblasti letišť, dopravních uzlů nebo průmyslových oblastí. Měřící metody pro zjištění koncentrace TZL nabízí rozmanité možnosti pro různé vlastnosti, velikosti a množství znečišťujících částic v plynu. Vlastnost částic se odvíjí primárně od jejich zdroje. Pro spolehlivé výsledky měření je nutné zohlednit okrajové podmínky, které každá metoda požaduje pro svůj nejefektivnější chod.

Metody měření TZL můžou být přímé nebo usazovací. U přímých metod se měří reálná velikost částic, v případě že se třídí částice podle jejich rychlosti pádu v tíhovém poli [14].

Uvedené metody usazovací:
- Gravimetrická metoda
- Metoda TEOM
- Radiometrická metoda
- Metoda využívající elektrické mobility

Uvedené metody přímé:
- Fotometrické:
  - měření transmise
  - měření rozptýleného světla (PALAS 2000 s Welas)

1.4.1 Gravimetrická metoda stanovení koncentrace TZL

Jedná se o metodu pro jednorázové určení koncentrace TZL v plynu. Při gravimetrické metodě dochází k odběru vzorku z proudícího plynu v určitém časovém intervalu a následně prochází přes vytápěný zachycovač. V něm je umístěn filtrační materiál, většinou se jedná o filtr ze skleněných vláken, na kterém dojde k zachycení prachových částic. Princip metody spočívá v určení rozdílu hmotnosti filtru před a po odběru. Pomocí tohoto rozdílu lze stanovit hmotnostní koncentraci TZL. Stejného principu využívá i vyhodnocování záchytu částic impaktorem, který je popsán v kapitole číslo 3. Pomocí výpočtu může být určena hmotnostní koncentrace TZL v odpadním plynu jako

$$c_m = \frac{m_f - m_z}{V} \ , \tag{1}$$

kde c_m [kg·m^{-3}] je hmotnostní koncentrace TZL, m_f [kg] je hmotnost čistého filtru, m_z [kg] je hmotnost zaneseného filtru a V [m^3] je objem nasátého plynu [4][15].

Podstatnou veličinou při měření TZL je také hmotnostní tok znečišťujících částic $\dot{m}$ určeného podle vztahu

$$\dot{m} = c_m \cdot \dot{V} \ , \tag{2}$$

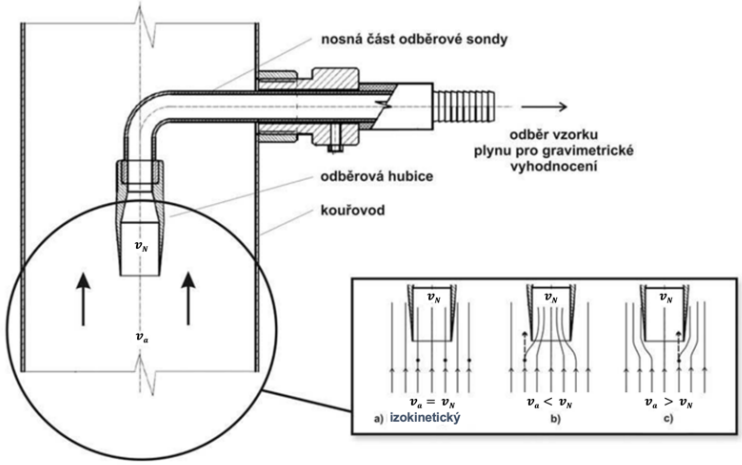
kde $\dot{m}$ [kg·s^{-1}] je hmotnostní tok znečišťujících částic, c_m je hmotnostní koncentrace TZL a $\dot{V}$ [m^3·s^{-1}] je objemový průtok plynu.

Základními zařízeními ve vzorkovací soustavě jsou odběrová sonda, zachycovač s filtračním materiálem, hmotnostní průtokoměr, čerpadlo a spojovací trubice. Spojovací trubice mezi hubicí odběrové sondy a filtračním materiálem musí mít krátkou vzdálenost, aby se předešlo většímu zanášení povrchů před filtrem prachovými částicemi [14].

Během měření musí být dodrženy určité podmínky, aby metoda měla vypovídající hodnotu. Jedná se například o dobu odběru vzorku, který musí trvat nejméně 30 minut, přičemž minimální počet měření je 4 a všechny doby měření musí být shodné. Dále rychlost v ústí odběrové sondy musí mít stejnou velikost i směr, jako je rychlost nabíhajícího proudu v místě měření. Tahle podmínka je označována jako izokinetická podmínka a je popsána následujícím vztahem

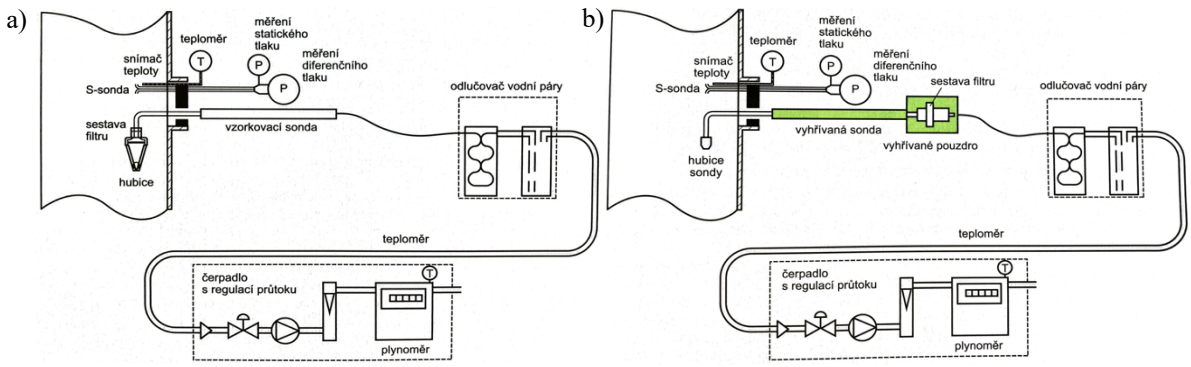
$$0{,}95 \cdot v_a \leq v_N \leq 1{,}15 \cdot v_a \ , \tag{3}$$

kde v_a [m·s^{-1}] je rychlost nabíhajícího proudu a v_N [m·s^{-1}] rychlost v ústí sondy zobrazené na obrázku číslo 1.9.



Obr. 1.9 Popis izokinetické podmínky v gravimetrickém provedení [49]

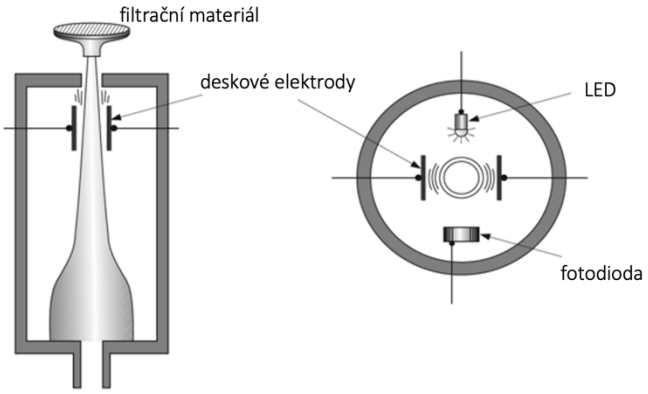
V průběhu odběru nesmí dojít k poruchám proudění a proud v potrubí musí být dostatečně rovnoměrný a ustálený. Po provedeném měření se do výpočtu musí zahrnout i prach usazený na zařízeních vzorkovací soustavy, které se nachází před zachycovačem. Využívá se převážně v manuálních stanicích [16].



Obr. 1.10 Gravimetrická metoda a) interní b) externí [16]

1.4.2 Frekvenční snímač hmotnosti depozitu s kmitajícím kuželíkem

Tato metoda se označuje zkratkou TEOM[8], která byla původně vyvinutá pro výzkum mikrometeoritů, nyní se používá pro monitoring aerosolových částic v odpadních plynech i v ovzduší. Jedná se o dutý kuželík vyrobený z piezoelektrického monokrystalu SiO_2 a na stěně má nanesenou tenkou vrstvu zlata. Jeden konec kuželíku je pevně připojen k základně snímače. Na druhém konci je umístěn kotouč s filtračním zařízením. Obvykle se používají křemenná vlákna o průměru ½ palce. Konstrukční provedení kuželíku je znázorněna na obrázku číslo 1.11.



Obr. 1.11 Konstrukční provedení kuželíku [30]

Kuželík má svou hmotnost m_0 a kmitá s vlastní frekvencí f_0 o velikosti okolo 10 MHz ve střídavém elektrickém poli. Frekvence je snímaná svítící diodou pomocí signálu, který je detekován fotodiodou. Umístění fotodiody je popsáno v obrázku číslo 1.11. Přesná hodnota frekvence je dána hmotností kuželíku i s filtrační vrstvou, na které jsou zachyceny částice. Změna kmitání f_0 na f je kontrolována průběžně. Kontrolní systém má pak za úkol přidat dostatečné množství energie do oscilačního systému, tak aby bylo dosaženo původní frekvence.

$$m = m_0 + m_f + m_{\check{c}} \ , \tag{4}$$

kde celková hmotnost m [kg], se kterou se počítá, se skládá z vlastní hmotnosti m_0, hmotnosti filtru m_f [kg] a nakonec hmotnosti zachycených částic $m_{\check{c}}$ [kg]. Hmotnost m a frekvence f [Hz] mají mezi sebou vztah popsaný jako

$$4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 = \frac{K}{m}, \tag{5}$$

kde K je konstanta harmonického oscilátoru. Případně vztah může být modifikován na

$$f^2 = \frac{K_0}{m}, \tag{6}$$

kde $K_0 = \frac{K}{4 \cdot \pi^2}$ je kalibrační konstanta získaná při kalibraci přístroje. Kalibrace přístroje je závislá na známé hmotnosti $m_{\check{c}}$ a na frekvencích f_1 (bez hmotnosti částic) a f_2 (s hmotností částic).

[8] *Tapered Element Oscillating Microbalance*

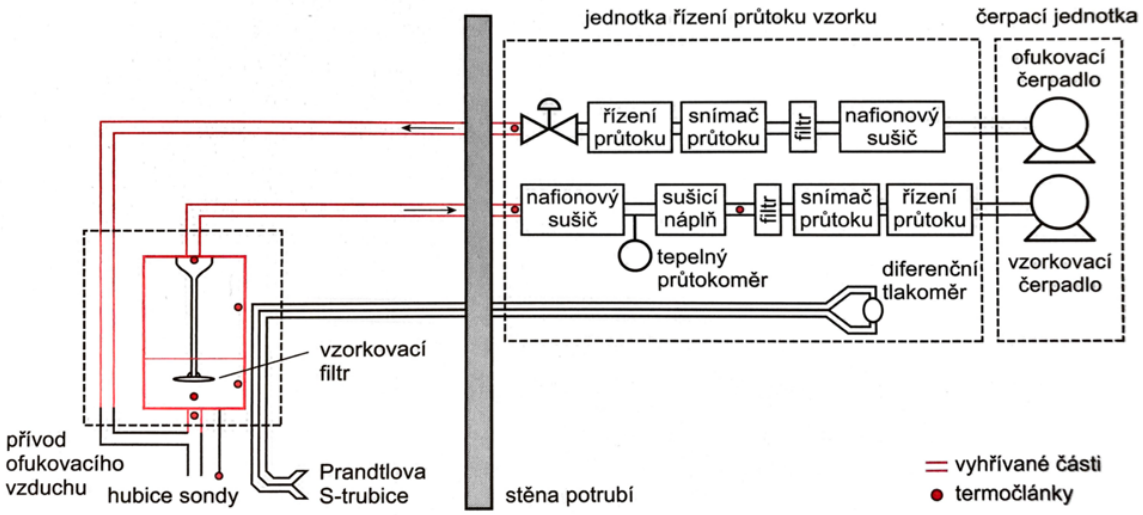
$$K_0 = \frac{m_č}{\frac{1}{f_2^2} - \frac{1}{f_1^2}}. \tag{7}$$

Poté, co harmonický oscilátor s filtračním zařízením je zkalibrován, může být využit ke sledování hmotnosti zachycených částic podle rovnice

$$m_č = K_0 \cdot \left(\frac{1}{f_b^2} - \frac{1}{f_a^2}\right), \tag{8}$$

kde f_a je frekvence kmitání při použití čistého filtru a f_b je frekvence při použití filtru se zachycenými částicemi o hmotnosti $m_č$.

Metoda TEOM může být provozována ve dvou režimech. Režim s kontinuálním odběrem a s proporcionální odběrem. Při kontinuálním odběru se vzorky odebírají v intervalu hodin až několika dní. Vzorkovací systém při proporcionálním odběru je provozován např. po dobu 30 minut každých 8 hodin. V obou režimech může dojít k překročení kapacity používaného filtru. V takovém případě se exponovaný filtr nahradí novým a poté se musí zvalidovat používaná konstanta K_0 podle výše popsaných vztahů. Pokud neodpovídá, musí kalibrace proběhnout opětovně. Schéma zapojení zařízení při metodě TEOM je znázorněno na obrázku číslo 1.12 [4].

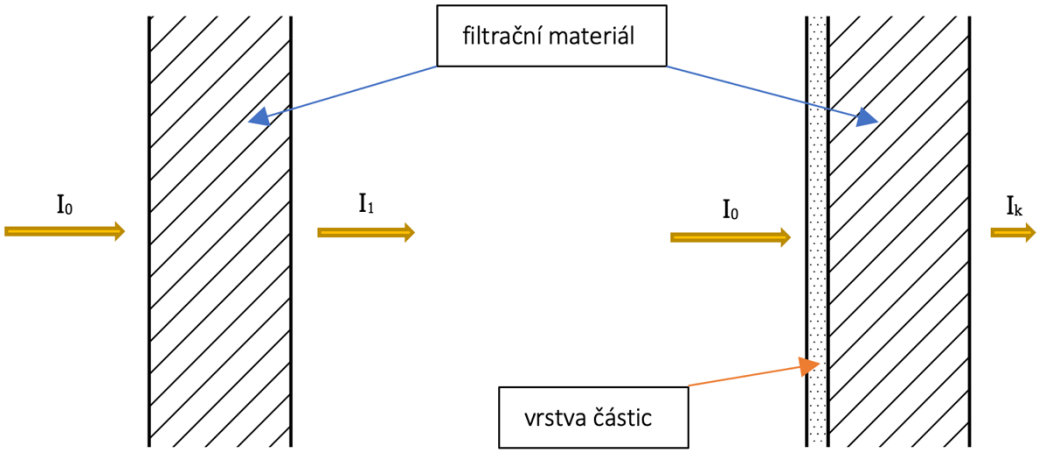


Obr. 1.12 Měřící trať metody TEOM [4]

1.4.3 Radiometrická metoda

Radiometrická metoda využívá obdobného principu jako metoda gravimetrická. Rozdíl nastává ve vyhodnocení množství částic usazených na filtračním zařízením. Tudíž hmotnostní koncentrace není vyhodnocena pomocí vážení filtru, ale na základě prozařování paprsky β – záření. Ty dopadají na detektor, který je umístěn za filtračním zařízením a který vyhodnocuje intenzitu procházejícího paprsku. Platí tedy, že čím více znečištění se vyskytuje, tím nižší je intenzita dopadajícího paprsku za filtrem. Radiometrická metoda nachází uplatnění

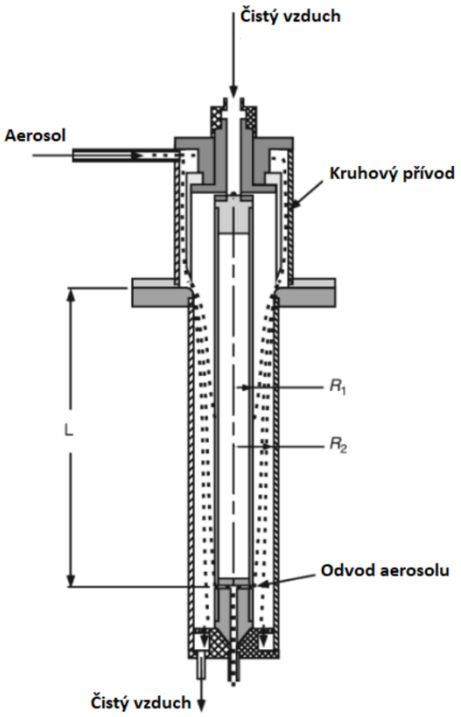
primárně v automatických měřicích stanicích. Změna intenzity záření při průchodu čistým a zaneseným filtrem je znázorněna na obrázku číslo 1.13 [17].



Obr. 1.13 Změna intenzity záření při průchodu čistým a zaneseným filtrem [18]

1.4.4 Metoda využívající elektrické mobility

Této metody využívá například spektrometr SMPS[10], který se skládá ze dvou elektrod válcovitého tvaru. Měřený vzorek média je nutné nabít, aby poté mohlo proběhnout třídění znečišťujících částic v oblasti elektrostatického pole. Podle polarity jsou částice přitahovány na elektrody. Tudíž částice se záporným nábojem jsou přitahovány na kladné elektrody a s kladným nábojem na záporné elektrody. Účinnost odlučování závisí na velikosti náboje a intenzitě elektrostatického pole. Princip vzorkování je zobrazen na obrázku číslo 1.14 [17].



Obr. 1.14 Princip vzorkování podle elektrické mobility [17]

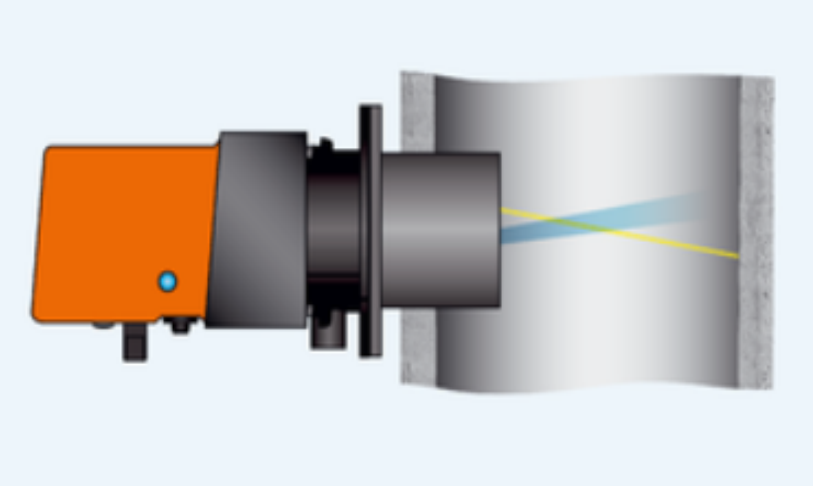
[10] *Scanning Mobility Particle Sizer*

1.4.5 Fotometrické metody

Fungují na principu využití lomu světla či jeho intenzity. V praxi se nejvíce využívají dva druhy této metody. První je pomocí měření rozptýleného světla a druhá je pomocí měření transmise [4].

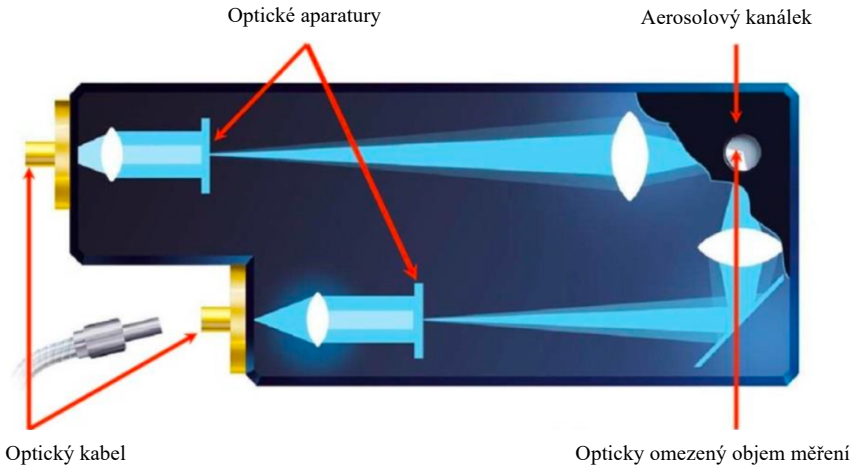
- **Měření rozptýleného světla**

Technika pro měření rozptýleného světla, kdy je vyzařované světlo rozptylováno částicemi ve směsi plynu. Tyto pulzy rozptýleného světla jsou snímány citlivými detektory. Podle zaznamenaných počtů pulzů, se vyhodnotí i počet částic. Intenzitu rozptýleného paprsku však neurčuje jen počet částic obsažených v plynu, ale i jejich velikost a optické vlastnosti. Proto je nutné měřící přístroj kalibrovat, pro dosažení přesnějších výsledků. V závislosti na požadavcích se u fotometrické metody používá zpětný nebo dopředný rozptyl. U obou možností je výstup se stabilními hodnotami a nezáleží na rychlosti plynu, vlhkosti či náboji prachových částic. Princip měření rozptýleného světla je znázorněn na obrázku číslo 1.15. Výhodou je využití u větších plynových kanálů a u plynu, který má nehomogenní rozložení prachu. Tahle metoda je vhodná pro nízké koncentrace prachu [19].



Obr. 1.15 Měření rozptýleného světla [19]

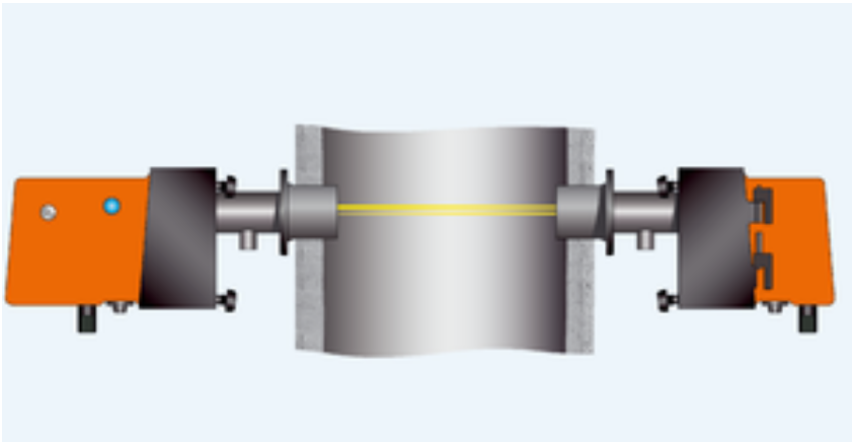
Princip měření rozptylu využívá například aerosolový spektrometr PALAS Promo 2000 s optickým měřičem Welas. V závislosti na senzoru dokáže zařízení měřit částice o velikosti 0,2 až 40 µm. Zařízení zapisuje hodnoty každou sekundu, a tak dosahuje vysoké přesnosti. Délka měření je ovlivněna počtem zachycených částic, protože přístroj za jedno měření zvládne monitorovat maximálně 5 milionů částic (signálu). Promo 2000 vytváří světelné signály, které jsou pomocí optických kabelů přenášeny do optického měřiče Welas. Optický měřič Welas využívá právě rozptylu světla k analýze částic. Paprsek je v optickém měřiči přiveden na zrcadlo, kde dojde odrazu pod úhlem 90 °. Ve stejném místě se přivádí vzduch obsahující částice a tyhle částice rozptylují paprsek, který je pomocí optických kabelů přiveden do zařízení PALAS Promo 2000 k vyhodnocení. Princip rozptylu světla v optických měřiči Welas je znázorněn na obrázku číslo 1.16 [20][21].



Obr. 1.16 Optický měřič Welas pro Palas 2000 [20]

- **Měření transmise**

Jedná se o metodu, která snímá pomocí prosvícení intenzitu plynu. Čím více částic se ve světelném paprsku nachází, je měřená intenzita slabší. Dochází k porovnání intenzity vysílaného nezeslabeného světla ze zdroje s přijatým zeslabeným světlem. Přístroj podle tohoto porovnání spočítá transmisi a extinkci, kde extinkce[11] je přímo úměrná koncentraci prachu. Světlo vysílané dopadá na protilehlou odrazku a je odraženo do velmi citlivého snímače. Princip měření transmise je zobrazen na obrázku číslo 1.17. Oproti metodě, kde se využívá měření rozptýleného světla, má optická vlastnost částic menší vliv na měření, naopak významným parametrem je jejich velikost. Výhodou je použití velkých plynových kanálů a střední až vysoká koncentrace prachu [19].



Obr. 1.17 Měření transmise [19]

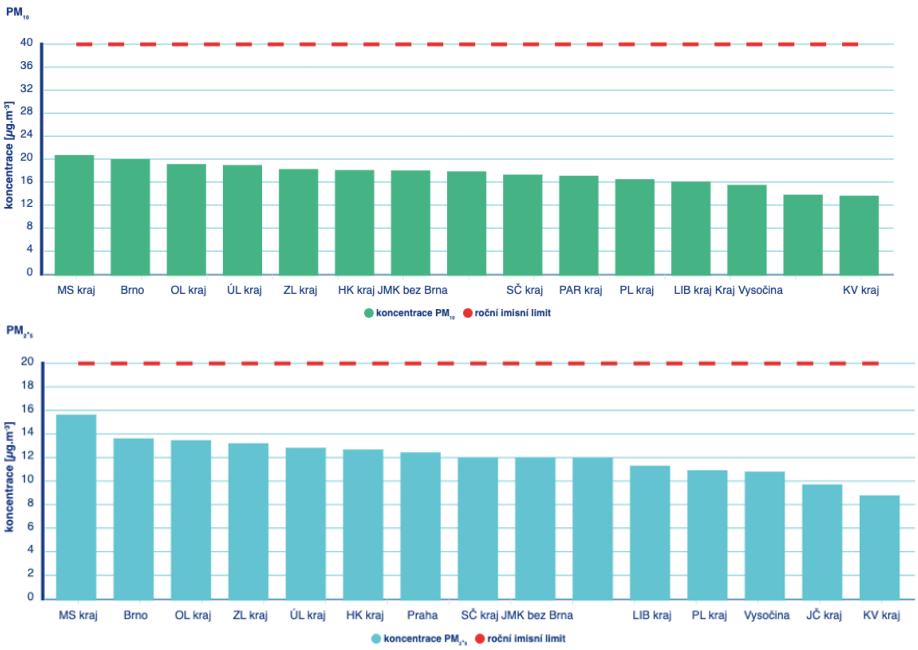
[11] celkový úbytek světla v důsledku absorpce a rozptylu záření neboli absorbance [45]

2 Legislativa

Při posuzování míry znečištění se primárně sleduje množství látek do ovzduší vypuštěné (emise) a množství látek se již v ovzduší nacházejících (imise). Emise mají přímý vliv na imise, avšak vzájemná závislost nemusí být vždy lineární. Současná legislativa se primárně zaměřuje na částice PM_{10} a $PM_{2,5.}$ Avšak velkou diskusi v posledních letech vyvolávají i částice PM_1. Bohužel pro částice těchto velikostí neexistují limitní hodnoty určené legislativou na úrovni Evropské unie. Důvodem je náročnost detekce částic a velmi omezený počet měřících stanic, které by tyto jemné částice dokázaly měřit. Sledování limitů je možné při diskontinuálním nebo kontinuálním odběru vzorku a musí dodržovat základní kritéria [22].

2.1 Imisní limity

Imisní limity jemných částic v ovzduší jsou stanoveny v České republice podle Zákona o ochraně ovzduší č. 201/2012 Sb. A vyhlášky o způsobu posuzování a vyhodnocování úrovně znečištění 300/2012 Sb. Každá znečišťující látka nacházející se v ovzduší má rozdílný vliv na životní prostředí a člověka. Proto jsou zavedeny hodnoty limit pro každou znečišťující látku zvlášť. Imisní limity se uvádějí zpravidla v mikrogramech určitého polutantu na metr krychlový venkovního vzduchu při atmosférickém tlaku a teplotě 0 °C. Dalším faktorem pro posouzení limitů je určení, zdali se jedná o koncentraci dlouhodobou či krátkodobou. K odlišení slouží doba průměrování, což je časový interval, při kterém se počítají střední hodnoty veličiny. Používané doby průměrování jsou 1 hodina, 8 hodin,1 den a 1 kalendářní rok. V tabulce číslo 2 je přehled imisních hodnot různých částic určených pro ochranu zdraví lidí. V tabulce je také uvedený maximální počet překročení koncentrace na stanicích. Nejčastěji bývá překračován imisní limit pro PM_{10} pro 24hodinovou dobu průměrování, avšak k tomuto překročení může dojít maximálně 35krát za rok. Na obrázku číslo 2.1 je znázorněn vážená průměrná roční koncentrace částic PM_{10} a $PM_{2,5}$ pro rok 2020. Ani jedna z těchto hodnot nepřekročily požadovaný imisní limit v žádném regionu. V roce 2021 došlo k překročení ve Větřňovicích, v Karviné a v Rychvaldově. V roce 2022 ještě nedošlo k překročení. Každoročně však nejhorší situace nastává v Moravskoslezském kraji [23][22][24][25].



Obr. 2.1 Koncentrace PM_{10} a $PM_{2,5}$ vážené populací za rok 2020 [25]

Důležité je podotknout, že v roce 2020 byl imisní limit částic $PM_{2,5}$ snížen z 25 $\mu g \cdot m^{-3}$ na 20 $\mu g \cdot m^{-3}$ v době průměrování jednoho kalendářního roku, což lze vidět i na obrázku číslo 2.1 [26].

Tab. 2 Imisní limity vyhlášené pro ochranu zdraví lidí a pro celkový obsah znečišťující látky v částicích PM_{10} vyhlášené pro ochranu zdraví lidí [27].

Znečišťující látka	Chemická značka	Doba průměrování	Imisní limit $[\mu g \cdot m^{-3}]$	Maximální počet překročení
Oxid siřičitý	SO_2	1 hodina	350	**24**
Oxid siřičitý	SO_2	24 hodin	125	**3**
Oxid dusičitý	NO_2	1 hodina	200	**18**
Oxid dusičitý	NO_2	1 kalendářní rok	40	**0**
Oxid uhelnatý	CO	Maximální denní osmihodinový průměr	10000	**0**
PM_{10}		24 hodin	50	**35**
PM_{10}		1 kalendářní rok	40	**0**
PM_{10} – arsen	As	1 kalendářní rok	6000	**-**
PM_{10} – kadmium	Cd	1 kalendářní rok	5000	**-**
PM_{10} – nikl	Ni	1 kalendářní rok	2000	**-**
PM_{10} – benzo[a]pyren	$C_{20}H_{12}$	1 kalendářní rok	1000	**-**
$PM_{2,5}$		1 kalendářní rok	20	**0**

V následující tabulce číslo 3 jsou vyhlášené limity imisí pro ochranu ekosystémů a vegetace.

Tab. 3 Imisní limity pro ochranu ekosystému a vegetace [27]

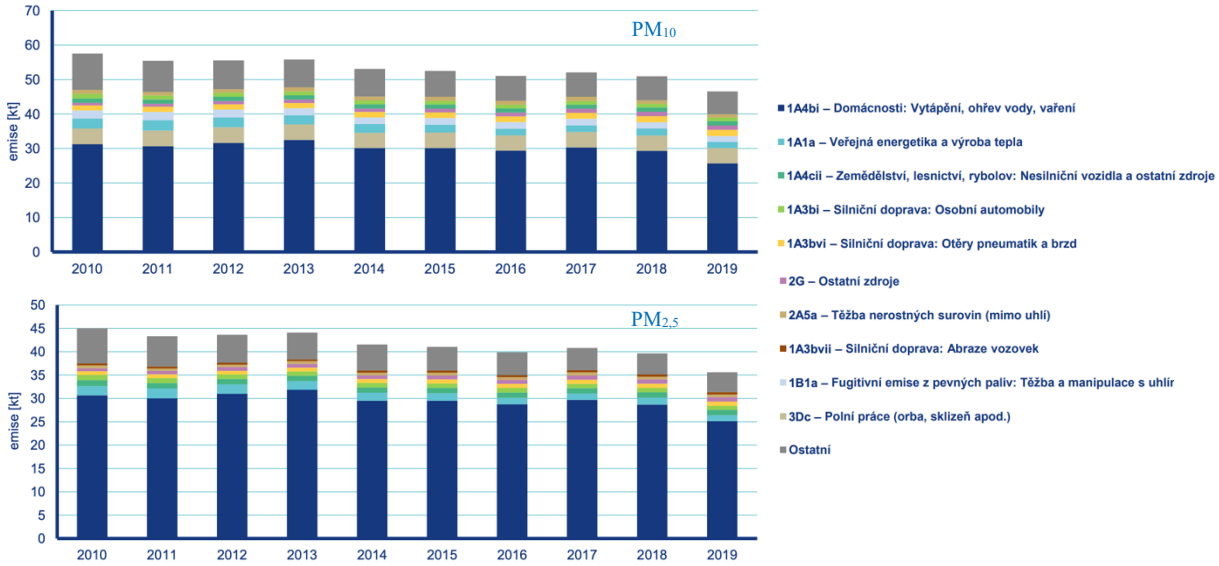
Znečišťující látka	Chemická značka	Doba průměrování	Imisní limit $[\mu g \cdot m^{-3}]$
Oxid siřičitý	SO_2	1 kalendářní rok a zimní období (1. října – 31.března)	20
Oxidy dusíku	NO, NO_2	1 kalendářní rok	30

2.1.1 Měření imisí TZL

Imise se měří a vyhodnocují zpravidla jen pro hustě obydlené území. Česká legislativa uvádí oblasti obydlené více než 250 000 lidmi. Koncentrace imisí se pohybují v nižších hodnotách než koncentrace emisí v ovzduší. Imise se měří nejčastěji pomocí gravimetrické metody (1.4.1) v manuálních stanicích nebo radiometrické metody (1.4.4) v automatických stanicích. Obě metody měření využívají odběr vzorku vzduchu, který je poslán do měřící stanice k vyhodnocení. Sledování je možné u uvedených metod v reálném čase. Další používanou metodou je metoda TEOM (1.4.2). Zachytávaní vzorku probíhá na filtru umístěném na kuželovém nosiči, který osciluje v určité frekvenci. Podle změny frekvence se určuje přírůstek zachycených částic. Touhle metodou lze pozorovat množství škodlivých částic nacházejících se v ovzduší s vysokým časovým rozlišením [22].

2.2 Emisní limity

Jedná se o specifikovaný limitní hmotnostní tok emisí, který má určité právní postavení. Emisní limity jsou v České republice stanoveny vyhláškou Ministerstva České republiky č.415/2012 Sb., která vešla v platnost 1.12.2012. Konktrétně se v ní jedná o nejvýše přípustné množství znečišťujících látek vypuštěných do ovzduší ze stacionárního zdroje a zároveň uvádí, jak a za jakých podmínek musí probíhat měření emisních hodnot pro dané typy paliva, výkony zařízení, technologické postupy apod. Určení takových limitů je poměrně obtížné. Limity se určují podle přítomné hmotnosti znečišťující látky v metru krychlovém vzduchu při tlaku 101,325 kPa a teplotě 0 °C, čili za normálních stavových podmínek. Pro odpovídající hodnotu, se hmotnostní koncentrace průměrují na dané měřené oblasti pro určitou měřenou látku. Hlavním problém při určování emisních inventur je nedostatek robustnosti publikovaných odhadů, protože ty vychází z menší části ze spolehlivých výsledů měření a z větší části údajů odhadovaných. Emisní limity se podle § 4 odst. 2 zákona se rozdělují na obecné a specifické. Obecné emisní limity jsou vztaženy k jednotlivým znečišťujícím látkám a jejich skupinám. Specifické emisní limity jsou stanoveny pro jednotlivé typy stacionárních zdrojů. Přehledy zdrojů emisí a jejich zastoupení v letech 2010-2019 je graficky znázorněno na obrázku číslo 2.2 [28][25].



Obr. 2.2 Celkové emise PM_{10} a $PM_{2,5}$ v letech 2010-2019 [25]

Emisní limity se průběžně během let mění, poslední úprava proběhla v roce 2020. Uvádí zpřísnění emisních limitů na polovinu pro NO_x a CO pro stacionární zdroje spalující plynná paliva. Nyní je tedy v planosti pro NO_x 100 $mg \cdot m^{-3}$ a pro CO 50 $mg \cdot m^{-3}$ [29].

2.2.1 Měření emisí TZL

Měření může probíhat jednorázově nebo kontinuálně. U diskontinuálního měření se vzorek odebere a pošle buď do laboratoře, která je k tomu uzpůsobená nebo měření může proběhnout přímo na místě. Monitoring těchto částic v ovzduší se opakuje jednou za 1 nebo 3 roky. Tento interval monitoringu je dostatečný pro menší zdroje znečišťování. Pro větší zdroje je nutné měřit kontinuálně, přičemž významní provozovatelé znečištění mají tuhle povinnost podle § 6 zákona č. 201/2012 Sb [22].

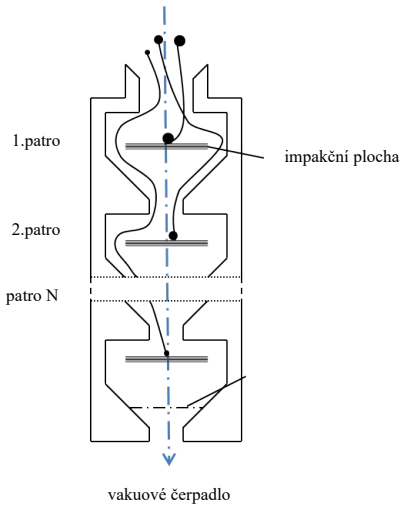
3 Impaktor

Impaktory jsou zařízení, které slouží k záchytu částic o různých velikostí. Existuje více druhů impaktorů. Každý z nich může fungovat na jiném principu. Nejpoužívanějším impaktorem je impaktor kaskádový. Ten se liší podle počtu stupňů (pater) z nichž je poskládaný. Obecně se dá říct, že čím více pater tím lepší filtrace vzduchu nastává. Dalším typem je virtuální impaktor, který používá princip ve změně proudění částic, důsledkem jejich vlastní setrvačnosti [30].

3.1 Kaskádový impaktor

Kaskádové impaktory fungují na principu setrvačné impakce. Aerosol s částicemi prochází přes kaskádově nárazové těleso, kde se postupně zachytávají částice různých velikostí. To, zda konkrétní částice v určitém stupni narazí, závisí na jejím aerodynamickém průměru. V kaskádovém impaktoru jsou shromažďovány vzorky odstupňovaným způsobem. To umožňuje následnou identifikaci velikosti částic procházejícího aerosolu. Tudíž lze kskádový impaktor zařadit do sekce měřících zařízení.

Aerosol s částicemi je přiváděn do impaktoru, kde prochází řadou tzv. disků určených pro záchyt pevných látek a ostatních částic. Disky obsahují různé velikosti, počty a uspořádaní otvorů. Podle druhu (stupně) kaskádového impaktoru, prochází aerosolová látka několika fázemi. V prvním stupni proběhne impakce velkých částic a v posledním stupni probíhá záchyt částic nejjemnějších, který je konkrétní impaktor schopen zachytit. V průběhu se otvory zmenšují a rychlost vzduchu se zvětšuje. Čím je látka lehčí, tím snáze se dostane do následujícího stupně impakce. Částice nad určitou velikost nejsou díky setrvačnosti schopny změnit svůj směr tak rychle a zachytí se na filtru. Na konci testu se hmota částic vztahující se ke každému stupni izoluje za použití vhodného rozpouštědla a poté se analyzuje obvykle pomocí HPLC[12], aby se určilo množství skutečně přítomných sledovaných látek. Na obrázku číslo 3.1 je znázorněn průběh impakce pro různé velikosti částic. Obvykle je snaha o záchyt částic PM_{10}, $PM_{2,5}$ a PM_1. Doba impakce je závislá na úrovni znečištění odebíraného aerosolu. Pokud se na stupních zachytí příliš velké množství částic, může dojít k zanesení trysek proudícího média a tím k znehodnocení měření [31][32].



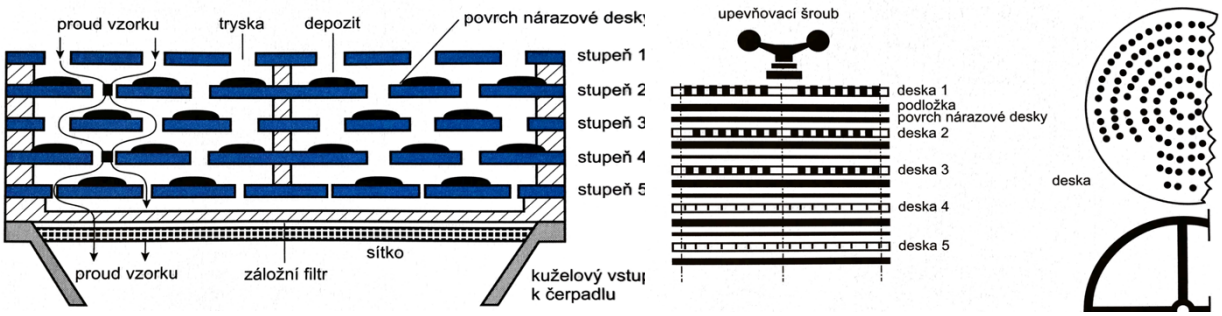
Obr. 3.1 Princip kaskádového impaktoru [50]

[12] *High-performance liquid chromatography* přeloženo jako vysokoúčinná kapalinová chromatografie [31]

Kaskádových impaktorů je řada typů, např. Andersenův impaktor, Bernerův nízkotlaký impaktor, impaktor MOUDI, Sioutasův osobní kaskádní impaktor a další. Nejčastější konfigurace mají 5 až 10 pater. Přičemž každé pater je schopné zachytávat aerosolové částice o různých aerodynamických průměrech až v řádech nanoměřítka [1].

3.1.1 Andersenův vysokoprůtočný kaskádový impaktor

Andersenův kaskádový impaktor (ACI[13]) je jeden z nejvíce využívaným impaktorem ve farmaceutickém průmyslu. Při studiích *in vitro*[14] je za účelem vyjádření hodnoty respirabilní frakce FPF[15] použit právě tenhle typ impaktoru. Hodnota FPF je obvykle vyjadřována v procentech nominální dávky. Pro určení hodnot z Andersenova impaktoru je míra zachycených částic měřená v mikrogramech, a tak již nelze požívat pojem FPF, ale zavádí se pojem respirabilní dávka FPD[16]. Získané data nachází využití v inhalačních systémech pro aerosolové dávkování. Počet stupňů se různí podle konkrétního konstrukčního provedení. Na obrázku číslo 3.2 je zobrazen 5stupňový Andersenův kaskádový impaktor [1][33].



Obr. 3.2 Andersenův vysokoprůtočný kaskádový impaktor [4]

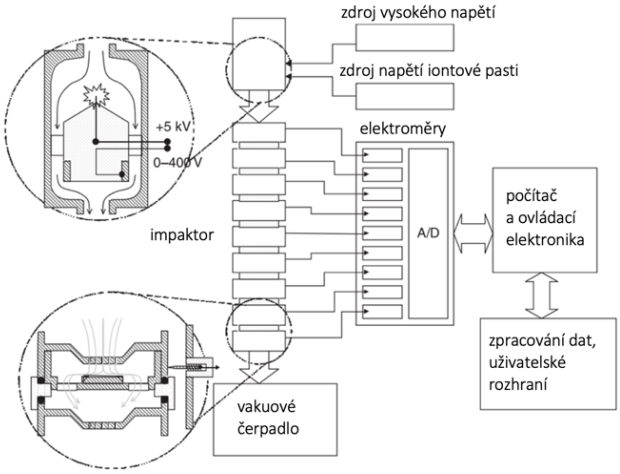
3.1.2 Elektrický nízkotlaký kaskádový impaktor

Elektrický nízkotlaký impaktor (ELPI[17]) slouží k online měření koncentrace počtu částic v ovzduší a současně poskytuje informaci o velikostní distribuci částic od 7 nm do 10 μm.

Při použití nízkotlakého impaktoru, lze dosáhnout separace částic s menším aerodynamickým průměrem než při použití klasických kaskádových impaktorů pracujících při atmosférickém tlaku. Online měření je založeno na měření elektrického proudu v jednotlivých impakčních patrech. Částice jsou před vstupem do impaktoru nabíjeny koronárním výbojem. V průběhu průchodu částic jednotlivými patry je tento náboj neutralizován podle množství zachycených částic. Pro získání potřebných dat o množství záchytu jednotlivých frakcí je nutné provést na každém patře měření elektrického proudu. Distribuci velikosti částic lze určit výpočtem podle vztahu mezi počtem elektrických nábojů každé částice a jejím známým průměrem. Významnou roli také zastává hustota částic, která je považována za gravimetrický faktor a spolu s nábojem má vliv na místo zachycení částice. V průmyslovém prostředí je obtížné získat tyto údaje přesné, což ovlivňuje kvalitu konečného vyhodnocení. Hlavní výhodou elektrického

[13] *Andersen Cascade Impactor*
[14] latinsky „ve skle“, tedy ve zkumavce, za umělých či laboratorních podmínek [46]
[15] *fine particle fraction*
[16] *fine particle dose*
[17] *Electrical Low Pressure Impactor*

nízkotlakového kaskádového impaktoru je monitoring částic v reálném čase. Nicméně, lze také vyhodnocovat částice usazené na filtrech stejnými způsoby jako u ostatních typů impaktorů. Většinou jsou chemickým analýzám podrobeny poslední čtyři patra impaktoru, kde se zachytávají aerosolové částice v nanometrickém měřítku. Impaktor včetně schématického zapojení je znázorněn na obrázku 3.3 [1][34][35].



Obr. 3.3 Elektrický nízkotlaký kaskádový impaktor [30]

3.1.3 Sioutasův osobní kaskádový impaktor

Pro řadu situací je vhodné využít osobní vzorkovací prostředek k vyhodnocování kvality ovzduší. Při používání se tedy sleduje kvalita skutečně vdechovaného vzduchu v reálných podmínkách (pracovní výkon i pracoviště). Zařízení však nesmí omezovat pracovníka při samotném výkonu práce, a tak musí být přizpůsobeno velikostně i hmotností. Jedním z těchto využívaných impaktorů je Sioutasův osobní kaskádový impaktor. Obvykle pracuje s průtokem 9 $l \cdot min^{-1}$. Má pět pater, přičemž první patro zachytává částice o velikosti větší než 2,5 µm a poslední páté patro se snaží o impakci částic menších než 0,25 µm. Na každé impakčním stupni je umístěn filtr vyroben z teflonu. Pro kvalitní využití se nemusí používat záchytné mazivo. Získaný vzorek je pak možné podrobit chemickému rozboru [36].

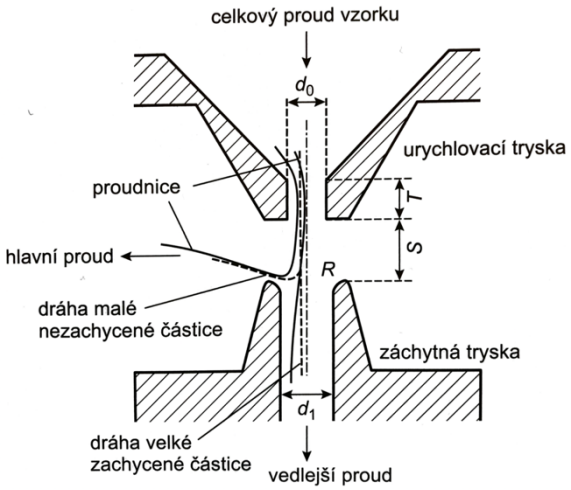
Obr. 3.4 Sioutasův osobní kaskádový impaktor [36]

3.1.4 Využití kaskádového impaktoru

Kaskádové impaktory mají podobu uspořádaného dutého válce se středovým šroubem nebo čepem s filtračními segmenty, jejichž nevýhodou je, že se dají použít pouze pro záchyt frakcí konkrétních velikostí částic. Virtuální impaktor je řešením téhle nevýhody [37].

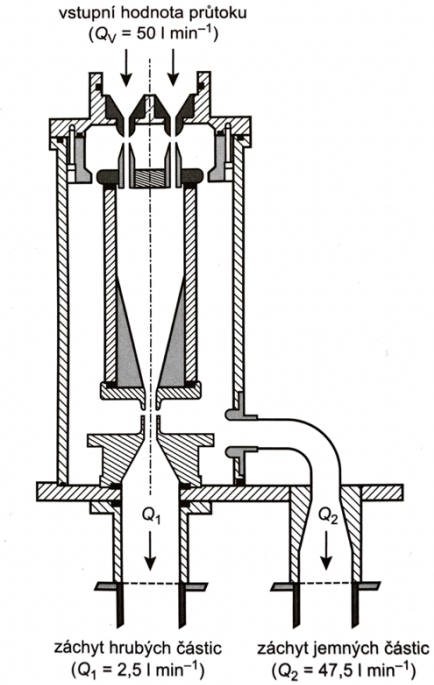
3.2 Virtuální impaktor

Zařízení fungující na obdobném principu jako kaskádový impaktor, jen je nahrazena impakční plocha záchytnou tryskou. Dochází tedy ke třídění frakcí jen pomocí setrvačnosti. V urychlovací trysce je předána dostatečná energie větším částicím, aby se tyto částice dostaly až do záchytné trysky. Přičemž průměr urychlovací trysky by měl odpovídat 30 až 40 % velikosti průměru záchytné trysky. Malé částice, které energií na pokračování v původním směru nemají a nejsou schopny tak překonat aerodynamický odpor, změní svůj směr a tímto dochází k odloučení. Při změně směru menší částice zvýší svou rychlost a pokračují na záchytný filtr viz obrázek 3.5. U virtuálních impaktorů je i možnost, že proud částic místo na filtr bude proudit do dalšího impaktoru [4][30].



Obr. 3.5 Virtuální impaktor [4]

V praxi nejčastěji používaným virtuálním impaktorem je dvoučlenný neboli dichotomní, kde se nachází dva vystupující proudy média s částicemi viz obrázek číslo 3.6 [30].



Obr. 3.6 Dichotomní virtuální impaktor [4]

3.2.1 Využití virtuálního impaktoru

Virtuální impaktor má víceúčelové využití. Lze ho vložit do potrubí a používat ho zde jako interní zachycovač částic. Toho se využívá zejména ve stacionárních zařízení, jako jsou kotle na fosilní paliva, komíny, slévárenské tavící pece, kotle elektráren, výfuky a jiné průmyslové odtahy. Stejně jako kaskádový impaktor má virtuální impaktor uplatnění při monitoringu emisí. Jeho hlavní výhodu je, že se může umístit i v extrémně zaneseném prostředí. Disponuje totiž snadno vyměnitelnými díly s jednoduchou údržbou. Navíc je možno díly libovolně přeskupit podle požadované potřeby filtrace. Filtry, na kterých se částice zachytávají, mají jednotnou velikost [37].

4 Výpočetní vztahy

V následující části je popsán výpočetní postup pro návrh impaktoru. V kapitole 4.1 je uveden základní výpočet, při kterém se zanedbávají změny. Při zpřesněném výpočtu bude brána v potaz změna teploty, rychlosti a tlaková ztráta na každém stupni impaktoru.

4.1 Základní výpočet

Pro základní výpočet návrhu impaktoru byly použity matematické vztahy podle Virgila A. Marpla dle zdroje [38]. Ty se primárně opírají o vlastnosti proudícího média.

Impaktor je navrhován pro běžný vzduch. Proto je nejdříve proveden výpočet zdánlivé molární hmotnosti M podle vztahu

$$M = \frac{R}{R_{air}} \ , \tag{4}$$

kde R = 8,314 J·mol^{-1}·K^{-1}, je univerzální plynová konstanta a R_{air} [J·kg^{-1}·K^{-1}] je plynová konstanta pro vzduch. Lze ji vyjádřit pomocí

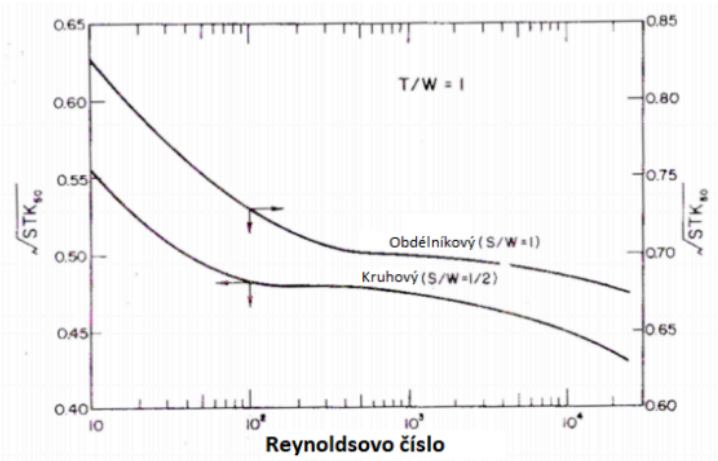
$$R_{air} = 0.2314 \cdot \frac{R}{M_{O_2}} + 0.7553 \cdot \frac{R}{M_{N_2}} + 0.0128 \cdot \frac{R}{M_{Ar}} + 0.0005 \cdot \frac{R}{M_{CO_2}} \ , \tag{5}$$

kde M_{O_2}, M_{N_2}, M_{Ar}, M_{CO_2} jsou molární hmotnosti příslušných látek.

Další krok se již zaměřuje na průměr trysky.

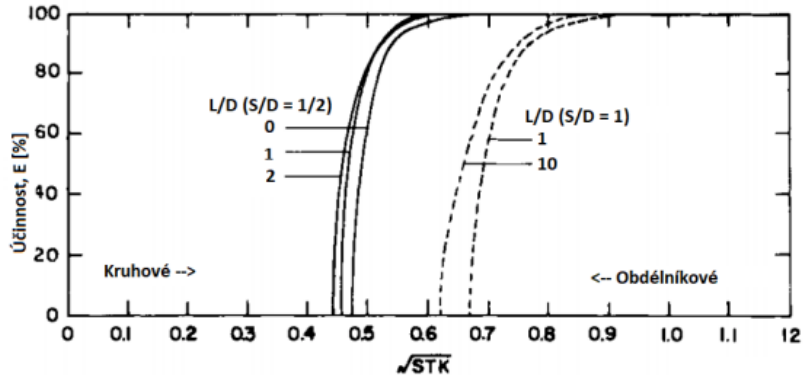
$$D = \sqrt[3]{\frac{\rho_č \cdot \dot{V} \cdot D_č^2 \cdot 4 \cdot C}{9 \cdot \eta \cdot \pi \cdot N \cdot Stk}} \ , \tag{6}$$

kde $\rho_č$ [kg·m^{-3}] je hustota částice, $\dot{V}$ [m·s^{-1}] objemový průtok, $D_č$ [m] je průměr požadované částice k impakci, N [ks] je počet trysek ve stupni, C [-] je Cunninghamův korekční součinitel na skluz, η [Pa·s] je dynamická viskozita a Stk [-] je Stokesovo číslo. Stokesovo číslo je bezrozměrné podobnostní číslo, které vyjadřuje míru kolize částice s impaktorem nebo splývání částice v proudu média obtékajícího impakční plochu. Obecně se používá jako parametr při obtékání těles [4].



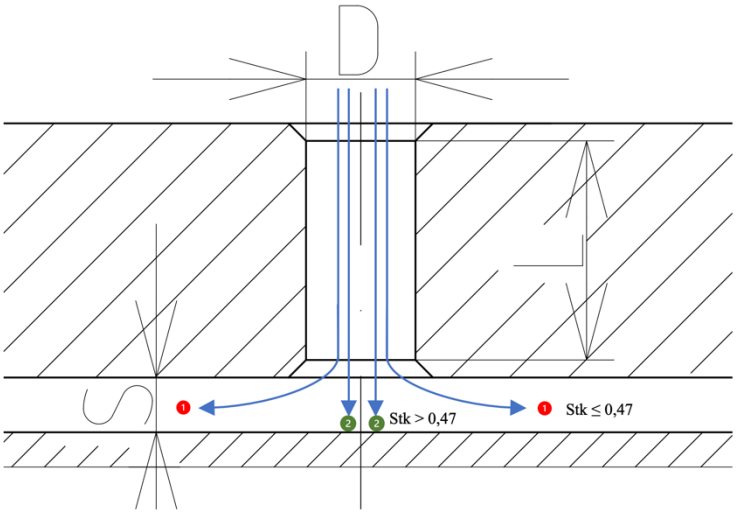
Obr. 4.1 Závislost Stokesova čísla na Reynoldsově čísle [38]

Pro aktuální návrh je Stk uvažováno podle následujícího grafu na obrázku číslo 4.2. Při uvažování kruhové trysky, kde její průměr je ke vzdálenosti k impakční ploše v poměru 1:2.



Obr. 4.2 Účinnost odloučení závislá na Stokesově čísle pro L/D= 2 a S/D=1/2[38]

Pro nejvyšší účinnost a meze Reynoldsova čísla je zvoleno Stk = 0,47, přičemž počítáme s poměrem délky trysky a průměru trysky 2:1. Pokud tedy částice mají Stk > 0,47 usadí se na impakční ploše a dále nepokračují. Menší částice mají Stk ≤ 0,47, tudíž nedochází k impakci, a tak pokračují do dalšího patra. Znázorněno na obrázku číslo 4.3.



Obr. 4.3 Záchyt částic na základě velikosti Stokesova čísla

Další veličinou pro výpočet průměru trysky je dynamická viskozita, která je funkcí teploty. Kde T = 23 + 273,15 K je teplota uvažována pro základní výpočet.

$$\eta = 1{,}717 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{\frac{T}{273{,}15} \cdot \frac{1 + \frac{113}{273{,}15}}{1 + \frac{113}{T}}}\ , \qquad (7)$$

Následující vztah pro Cunninghamův korekční faktor na skluz slouží ke korekci aerodynamického odporu tak, aby platil i mimo spojité prostředí, a to pro klouzání plynu podél povrchu.

$$C = 1 + 2 \cdot \frac{\lambda}{D_{\check{c}}} \cdot \left[1,23 + 0,41 \cdot \exp\left(-0,88 \cdot \frac{D_{\check{c}}}{2 \cdot \lambda}\right)\right] \ , \tag{8}$$

kde λ [m] je střední volná dráha molekul. Je funkcí teploty, dynamické viskozity a příslušného tlaku. V případě základních výpočtů se jedná o tlak atmosférický. Složení vzduchu pro tento návrh je považováno za běžné. Střední volná dráha molekul je popsána vztahem

$$\lambda = \frac{2 \cdot \eta}{p_{atm}} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot R \cdot T}{8 \cdot M}} \ . \tag{9}$$

Po získání hodnoty pro průměr trysky lze určit rychlost na výstupu z trysky v [m·s^{-1}] dle vztahu

$$v = \frac{\dot{V} \cdot 4}{N \cdot \pi \cdot D^2} \ . \tag{10}$$

Pro výpočet Reynoldsového čísla se musí ještě určit hustota vzduchu ρ_{air} [kg·m^{-3}], která je přímo úměrná příslušnému tlaku a nepřímo úměrná aktuální teplotě a měrné plynové konstantě. Pro základní výpočty se tedy volí tlak atmosférický a teplota odpovídající pokojové teplotě, v našem případě 23 °C. ρ_{air} se dostane pomocí vztahu

$$\rho_{air} = \frac{p_{atm}}{R_{air} \cdot T} \ . \tag{11}$$

Po určení hodnoty hustoty vzduchu podle příslušného tlaku a teploty se může provést výpočet Reynoldsova čísla Re vztahem

$$Re = \frac{\rho_{air} \cdot v \cdot D}{\eta} \ , \tag{12}$$

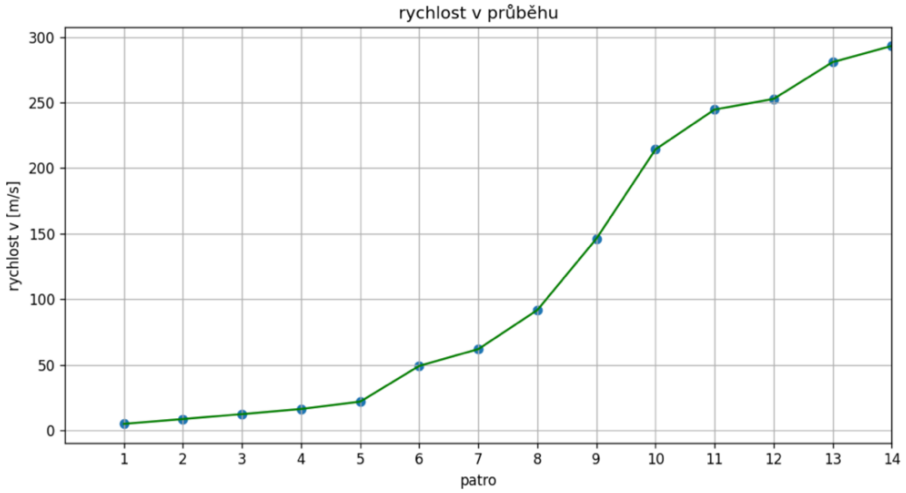
kde Re [-] se musí nacházet v intervalu <500; 3000>, aby výše uvedené rovnice byly platné. Pro udržení se v daném rozmezí hodnot slouží volba počtu trysek N [ks].

4.2 Zpřesněný výpočet

U zpřesněného výpočtu již nelze zanedbávat tlakové ztráty či změnu teploty na jednotlivých stupních. Proto je nutné zavést ztrátové koeficienty, které budou měnit tlak za každým stupněm. Pro přepočet se využívají zpřesněné výše uvedené rovnice. Tudíž kde je tlak atmosférický, se musí použít tlak aktuální pro daný stupeň. Všechny výpočty ztrát byly odvozeny ze zdroje [39].

4.2.1 Ztráta změnou rychlosti, změnou teploty a stlačitelností vzduchu

V každém stupni dochází k nárůstu rychlosti, jak lze vidět na grafu znázorněném na obrázku 4.4.



Obr. 4.4 Závislost rychlosti média na stupních impaktoru

Hned po změně rychlosti nastává také změna teploty. Rychlost i teplota mají významné zastoupení ve výpočtových vztazích mnoha veličin. První vlastností je stlačitelnost vzduchu, kdy lze prohlásit, že proudící médium impaktorem je téměř dokonale stlačitelný plyn.

Ztráta stlačitelného média je popsána následující rovnicí

$$\zeta_\delta = \frac{1}{4} \cdot Ma^2 + \frac{2-k}{24} \cdot Ma^4 \quad , \tag{13}$$

kde k = 1,4 dle [39] a vyjadřuje konstantu, Ma [-] je Machovo číslo. Machovo číslo je podobnostní číslo udávající poměr aktuální rychlosti částic ku rychlosti zvuku počítaného ve stejném médiu

$$Ma = \frac{v}{c} \quad , \tag{14}$$

kde teoretická rychlost zvuku ve vzduchu c [m·s^{-1}] se mění v závislosti na teplotě. Pro přepočet lze využít rovnici ve tvaru

$$c = 20{,}1 \cdot T_{aktual}^2 \quad , \tag{15}$$

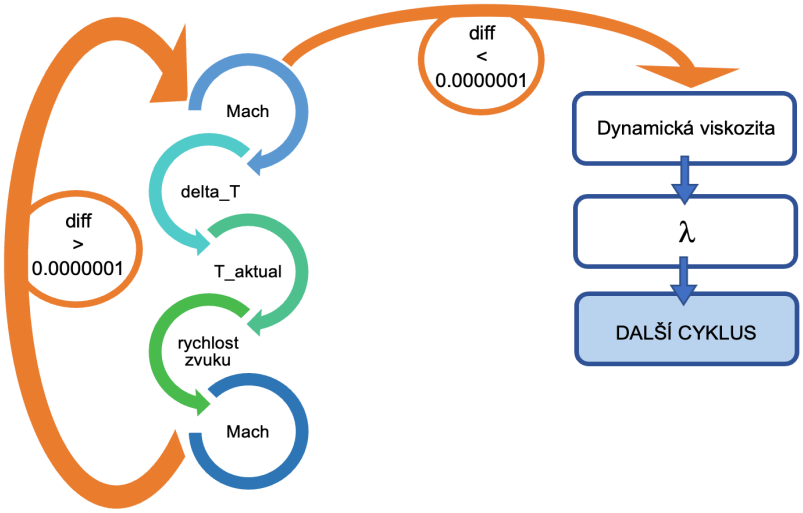
kde T_{aktual} [K] je aktuální korekční teplota ve stupni vyjádřená jako

$$T_{aktual} = T - \Delta T, \tag{16}$$

přičemž změna teploty ΔT [K] je funkcí Machova čísla a odpovídá vztahu (17).

$$\Delta T = 59{,}2 \cdot Ma^2 \tag{17}$$

Tím, že teplota má vliv na základní výpočtové vztahy, je nutné zavést cyklus a všechny hodnoty několikrát přepočítat, dokud nedojde k ustálení. Zde byl využit pro výpočty programovací jazyk Python, kde se dal cyklus ukončený nesplněním podmínky cyklu naprogramovat. Pro názornější ukázku je zde pomocí jednoduchého diagramu znázorněn cyklus na obrázku číslo 4.5.

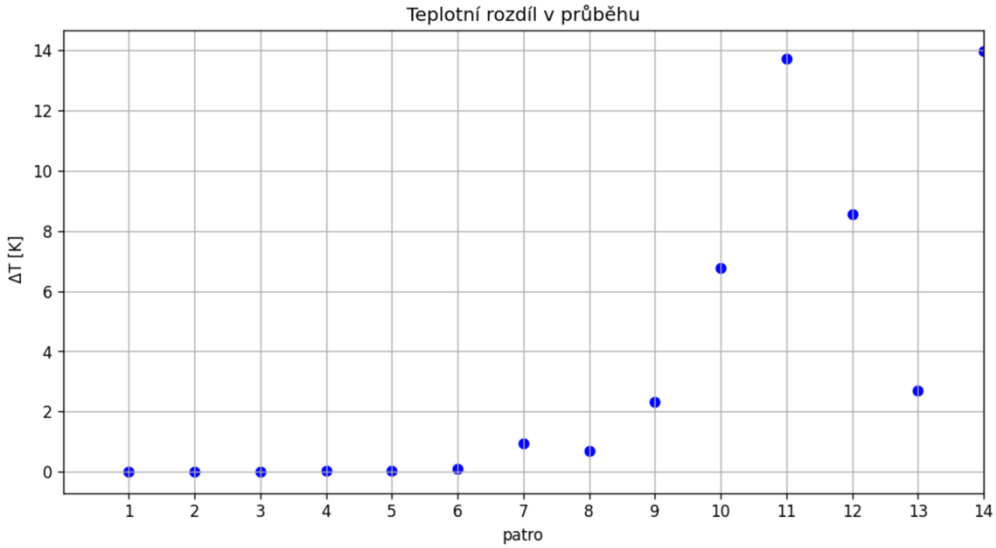


Obr. 4.5 Diagram cyklu while k získání teploty

Pro splnění podmínky z cyklu je diff popsána vztahem

$$diff = \left| Ma - Ma_{previous} \right|, \tag{18}$$

kde $Ma_{previous}$ je hodnota Machova čísla, která vždy odpovídá Machovu číslu na začátku cyklu. Pokud je tedy rozdíl větší než 0,0000001, tak probíhá výpočet znovu s nově získanými hodnotami. Poté co rozdíl dosáhne menší hodnoty, použijí se hodnoty z poslední iterace cyklu a pokračuje se v následujícím výpočtu. Po zrealizovaném cyklu vycházely hodnoty teplotního rozdílu na příslušných patrech dle grafu na obrázku 4.6.

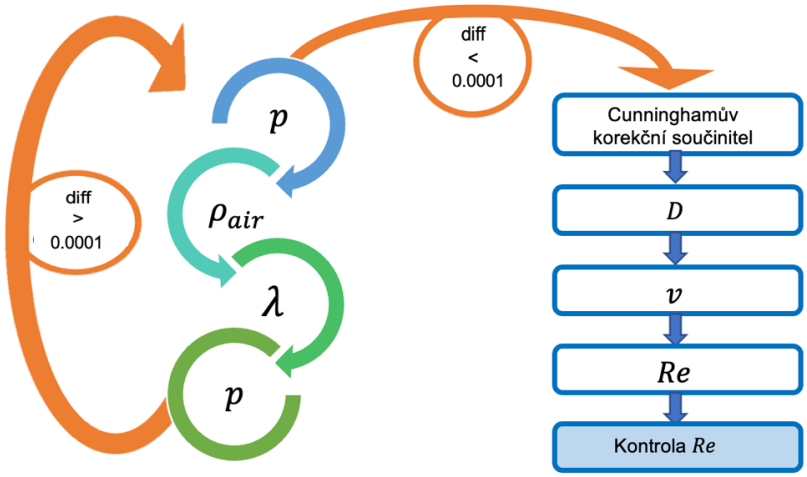


Obr. 4.6 Teplotní rozdíl ve stupních impaktoru

Po vyčíslení ustálené hodnoty pro ρ_{air} a ζ_δ je možné určit nový tlak, který bere v potaz pouze ztrátu důsledkem stlačitelného média

$$p_{new} = p_{previous} - 0,5 \cdot \rho_{air} \cdot v^2 \cdot (\zeta_\delta) \ , \tag{19}$$

kde $p_{previous}$ [Pa] je tlak z předcházejícího stupně. Tento nově vzniklý tlak p_{new} a hustota ρ_{air} jsou na tebe vzájemně závislé. Opět je zaveden cyklus, pro vyhodnocení přesnějších hodnot. Cyklus přepočítává veličiny, dokud odchylka nových tlaků není menší než 0,0001. Pro přehlednější zobrazení je znázorněno schéma cyklu na obrázku 4.7.

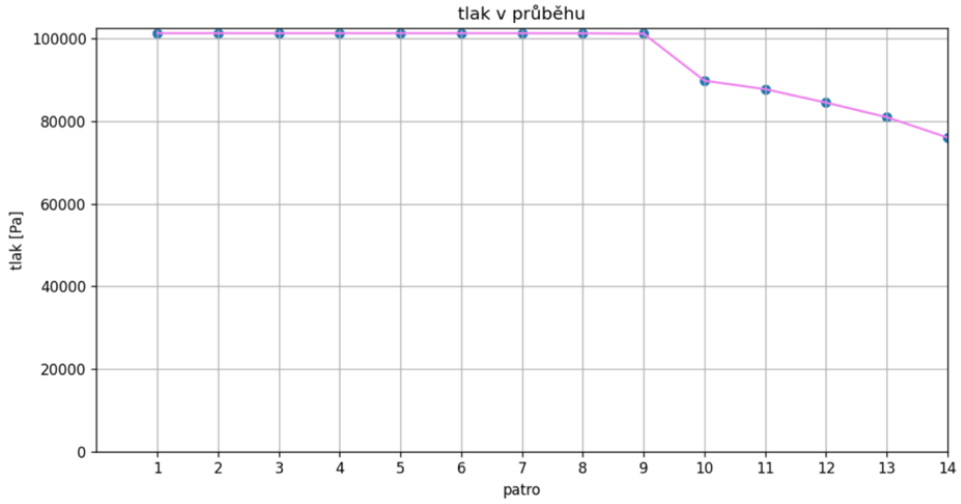


Obr. 4.7 Diagram cyklu pro výpočet tlaku

Pro splnění podmínky z cyklu je diff popsána rozdílem

$$diff_p = \left| p_{new} - p_{cycleprevious} \right| , \tag{20}$$

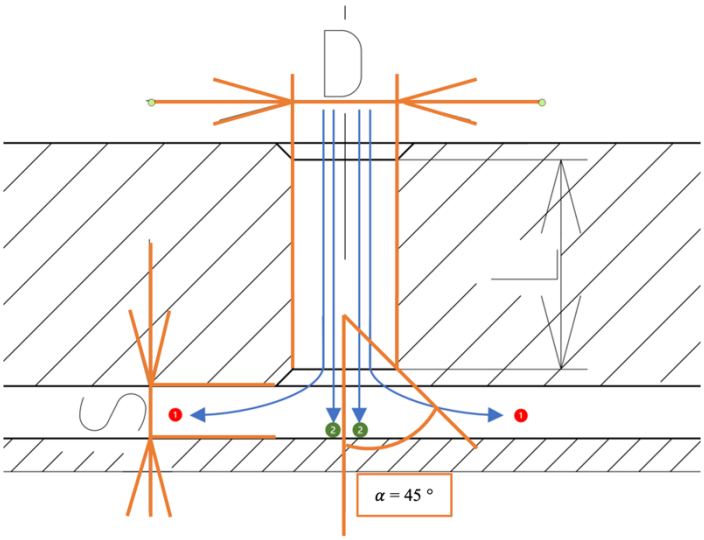
kde p_{new} je tlak, který je výstupem na konci cyklu a $p_{cycleprevious}$ je tlak na výstupu cyklu předcházejícího. Grafické znázornění je uvedeno na obrázku číslo 4.8, kde je patrné, že ztráta tlaku způsobena stlačitelnosti média je výraznější až za 9. patrem impaktoru.



Obr. 4.8 Závislost tlaku na stupni impaktoru při uvažování stlačitelnosti média a změny teploty

4.2.2 Ztráta nárazem na impakční plochu

Ztráta nárazem na impakční plochu je závislá na poměru S/D a zkosení na výstupu α = 45 °. Zkosení na výstupu má funkci pro usměrnění proudu a také ke snížením tlakových ztrát. Potřebné veličiny pro určení ztráty jsou vyznačeny na obrázku číslo 4.9.

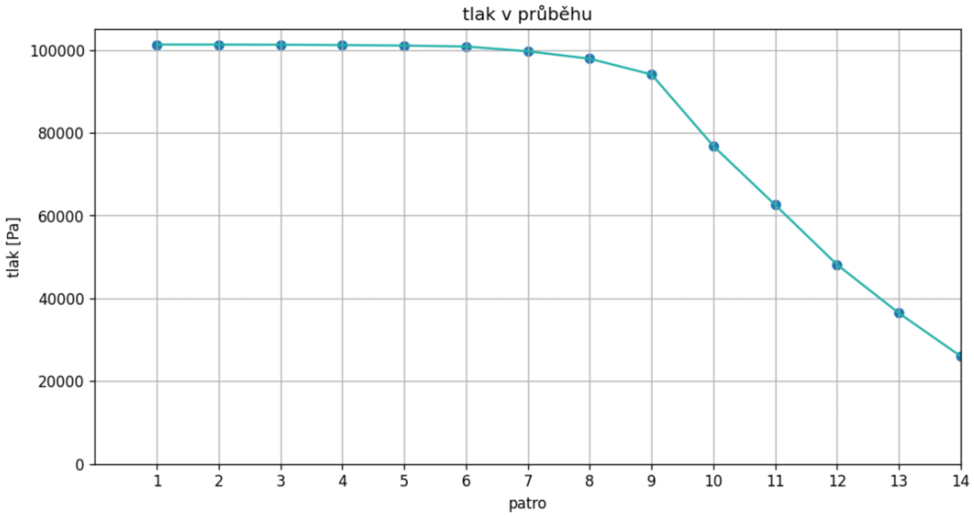


Obr. 4.9 Vyznačené parametry pro určení ztráty nárazem na impakční plochu

Jak již bylo zmíněno poměr S/D je zachován pro všechny patra 1:2. Podle tabulkové hodnoty viz [39] ζ_ε = 0,81.

$$p_{new} = p_{previous} - 0,5 \cdot \rho_{air} \cdot v^2 \cdot (\zeta_\delta + \zeta_\varepsilon) \ , \tag{21}$$

kde p_{new} a ρ_{air} je potřeba znovu zacyklit obdobně jako v předchozím cyklu. Poté tedy vychází tlaková závislost v čase viz graf na obrázku číslo 4.10. Nové tlaky jsou již v závislosti dvou ztrátových proměnných $\zeta_\delta + \zeta_\varepsilon$. Na obrázku číslo 4.10 lze sledovat, že výraznější změna se začíná projevovat u 8. patra a následujících patrech má strmější spád.



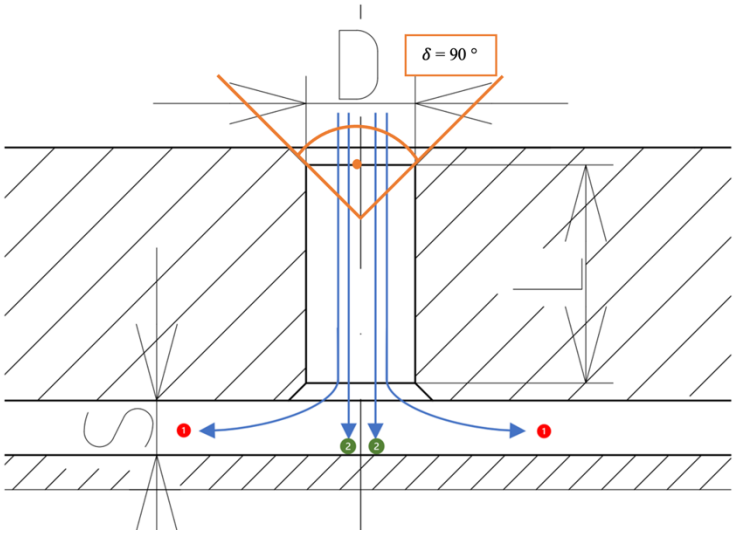
Obr. 4.10 Závislost tlaku na stupni impaktoru uvažující ztrátu nárazem, stlačitelnost média a změnu teploty

4.2.3 Ztráta zkosením trysky na vstupu

Ztráta zkosením trysky na vstupu je dána úhlem zkosení. Použití zkosení je za účelem zmenšení tlakové ztráty a k snadnějšímu usměrnění proudu. Pro tento případ se počítá se zkosením pod úhlem 45 ° neboli použitím úhlu 90 °. ζ_σ se vyčíslí podle vztahu

$$\zeta_\sigma = 0{,}5 + 0{,}3 \cdot \cos\delta + 0{,}2 \cdot cos^2\delta \ , \tag{22}$$

kde δ = 90 °. Úhel je specifikován pomocí obrázku číslo 4.11.

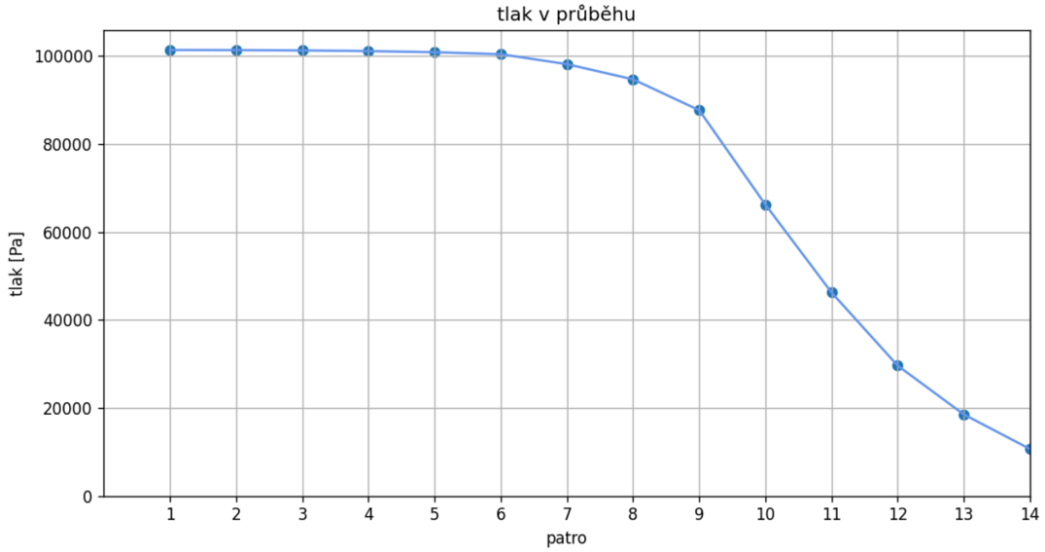


Obr. 4.11 Vyznačený úhel potřebný pro určení ztráty zkosením na vstupu

Po získání ζ_σ se může přejít k výpočtu zpřesněného tlaku. Opět je nutné použít cyklus z obrázku číslo 4.7.

$$p_{new} = p_{previous} - 0{,}5 \cdot \rho_{air} \cdot v^2 \cdot (\zeta_\delta + \zeta_\varepsilon + \zeta_\sigma) \ , \tag{23}$$

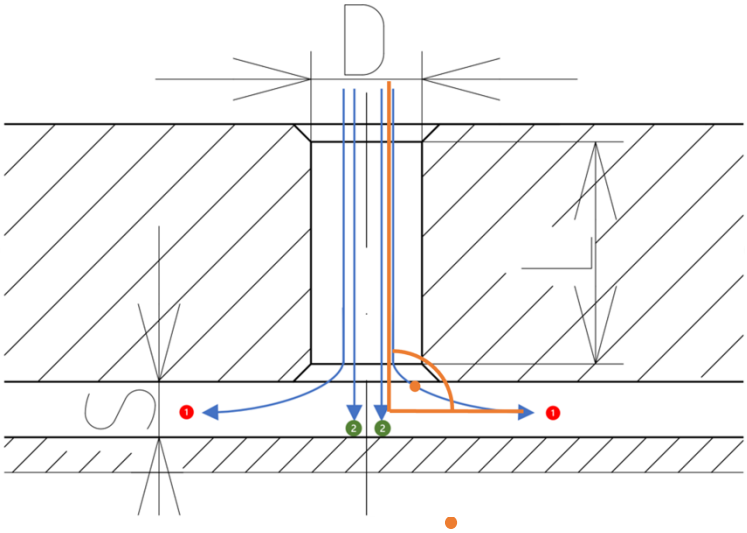
kde p_{new} v závislosti na $\zeta_\delta, \zeta_\varepsilon, \zeta_\sigma$ je vyobrazeno v grafu na obrázku číslo 4.12.



Obr. 4.12 Závislost tlaku na stupni impaktoru při uvažované ztrátě zkosení na vstupu, nárazu proudu, stlačitelnosti média a změny teploty

4.2.4 Ztráta změnou směru proudění

Ztráta změnou směru proudění se určuje podle úhlu zatočení proudu. Pro navrhovaný impaktor se jedná o 90 °. Tento úhel změny proudu je vyobrazen na obrázku číslo 4.13.

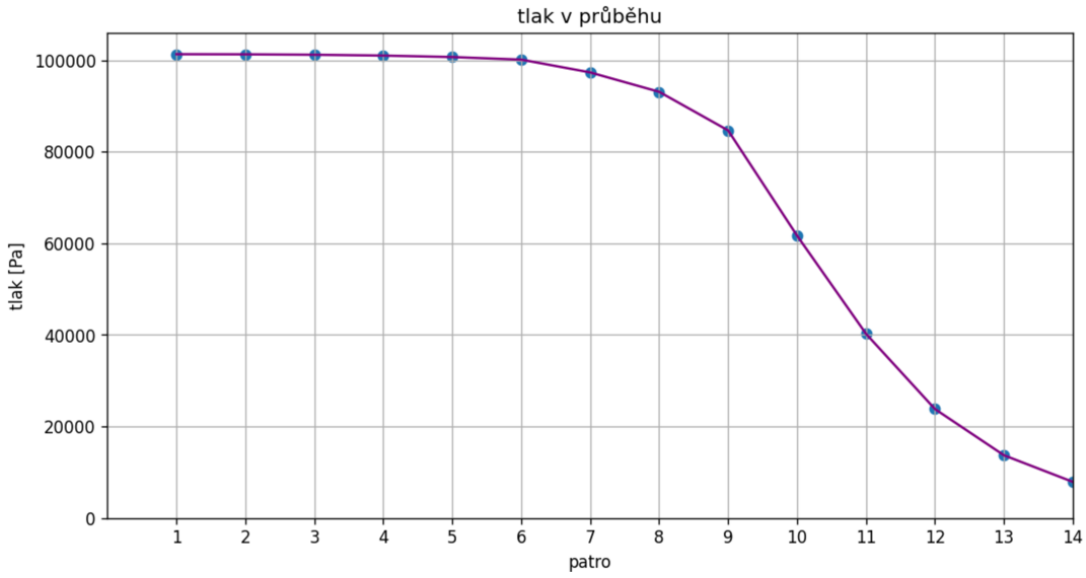


Obr. 4.13 Vyznačený úhel potřebný pro určení ztráty změnou směru proudění

Podle tabulkových hodnot dle [39] je ζ_ω= 0,4.

$$p_{new} = p_{previous} - 0{,}5 \cdot \rho_{air} \cdot v^2 \cdot (\zeta_\delta + \zeta_\varepsilon + \zeta_\sigma + \zeta_\omega) \tag{24}$$

Tlakový průběh při uvážení i ztráty tlaku způsobenou změnou směru proudu média za tryskou je zobrazen na obrázku číslo 4.14.



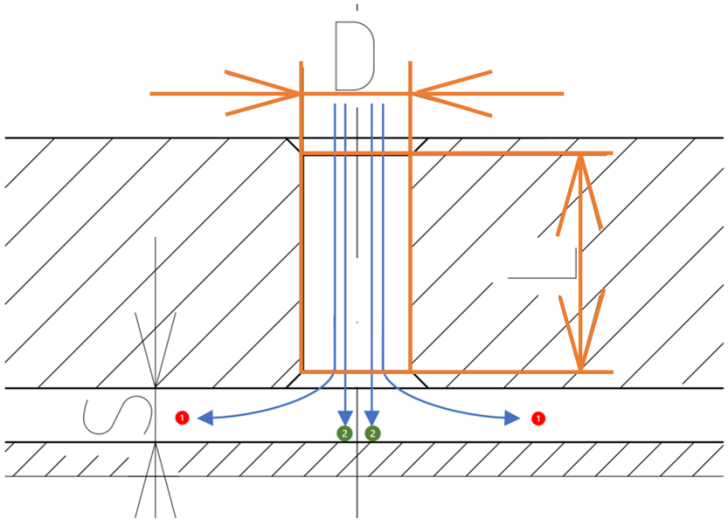
Obr. 4.14 Závislost tlaku na stupni impaktoru uvažující ztrátu změnou směru proudění, zkosením na vstupu, nárazem proudu, stlačitelnosti média a změnou teploty

4.2.5 Ztráta třením

Ztráta třením je funkcí Reynoldsova čísla, průměru a délky trysky. Z již známých hodnot z výpočtů se hodnoty Reynoldsova čísla pohybují v rozsahu <500; 2000>, tudíž můžeme využít následujícího výpočtového vztahu

$$\zeta_\lambda = \frac{64}{Re} \cdot \frac{L}{D} \ , \tag{25}$$

kde L [m] je délka trysky a D [m] je průměr trysky. Znázorněno na obrázku číslo 4.15. Tření v oblasti vzdálenosti S, bylo zanedbáno, protože proud média se rozbíhá za tryskou radiálně.

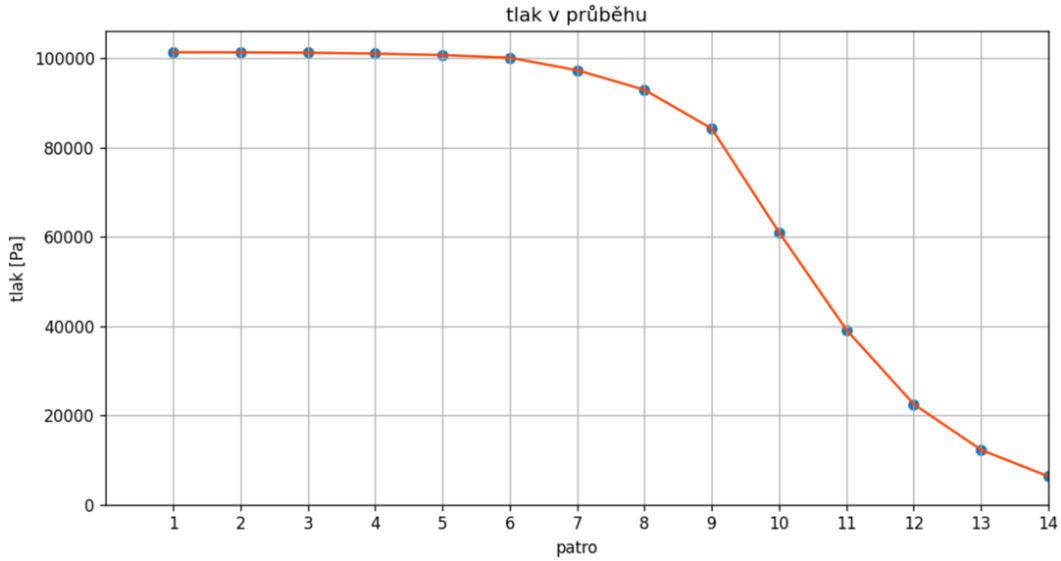


Obr. 4.15 Vyznačené rozměry potřebné pro určení ztráty třením

Po uvážení i ztráty třením bude výpočet výsledného tlaku vypadat dle vztahu 26.

$$p_{new} = p_{previous} - 0,5 \cdot \rho_{air} \cdot v^2 \cdot (\zeta_\delta + \zeta_\varepsilon + \zeta_\sigma + \zeta_\omega + \zeta_\lambda) \ , \tag{26}$$

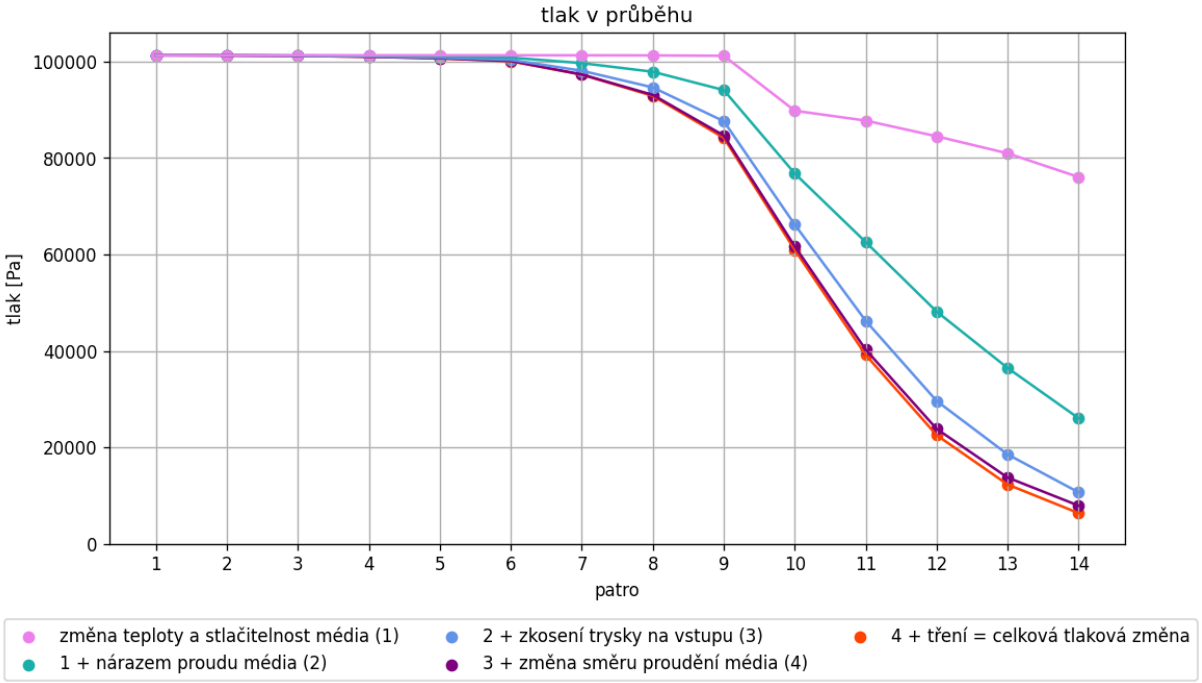
kde p_{new} pro jednotlivé patra je zobrazeno na obrázku číslo 4.16.



Obr. 4.16 Závislost tlaku na stupni impaktoru uvažující ztrátu třením, změnou směru proudění, zkosení na vstupu, nárazem proudu, stlačitelností média a změnou teploty

4.2.6 Celková tlaková ztráta

Na grafu na obrázku číslo 4.17 jsou zobrazeny průběhy tlaků při postupném uvažování tlakových ztrát. Růžovou je označen průběh tlaku impaktorem při úvaze změny teploty a stlačitelnosti média. Téměř beze změny je tlak až do 9. patra, kde následně skokově padá. Teplotní rozdíl mezi 10. a 11. patrem je přibližně 14 °C, hodnoty teplotního rozdílu do 8. patra se pohybovaly v rozmezí <0; 2> °C viz tabulka číslo 6 a obrázek číslo 4.6. Lze tedy říct, že teplotní rozdíl má významný podíl na rozdíl tlaku. V případě tlakového průběhu označeného tyrkysově byl brán v potaz mimo změnu teploty a stlačitelnost média také náraz média na impakční plochu. Míra tlakové ztráty nárazem je dána parametry: vzdálenost konce trysky od impakční plochy S, průměr trysky D a úhel zkosení trysky na výstupu α. Pro tento případ se začala křivka viditelněji odchylovat od relativně konstantního průběhu již za 6. patrem. Po přidání do úvahy i ztrátu zkosením trysky na vstupu byl pokles tlaku významnější. To lze pozorovat na obrázku číslo 4.17 jako světle modrou křivku. Další tlaková ztráta byla ovlivněna změnou směru proudění média. Tento průběh zastupuje fialová křivka. Jako poslední skutečností, která ovlivňuje tlakovou ztrátu, je tření. Míra tlakové ztráty způsobené třením je dána Reynoldsovým číslem Re, délkou trysky L a průměrem trysky D. Tento průběh je označen červenou křivkou. Z porovnání fialové a červené křivky lze usoudit, že změna způsobená třením média v trysce není tak výrazná. Jistě se ale nedá považovat za změnu zanedbatelnou.



Obr. 4.17 Porovnání změny tlaku na základě uvažování jednotlivých ztrát

4.3 Získané hodnoty podle výpočtů

Výpočty byly provedeny pro 14 pater kaskádového impaktoru pro odběr jemných částic. Požadované tříděné frakce byly určeny na základě komerčního impaktoru. Pro navržené frakce a použitím výše uvedených výpočtů vychází hodnoty Cunnighamova korekčního součinitele viz tabulka číslo 4.

Tab. 4 Hodnoty Cunninghamova korekčního součinitele pro určené tříděné frakce

Patro	Tříděná frakce PM_x [µm]	C [-]
1	10	1,0160
2	5,3	1,0303
3	3,6	1,0446
4	2,5	1,0644
5	1,6	1,1009
6	0,94	1,1731
7	0,60	1,2791
8	0,38	1,4718
9	0,25	1,8238
10	0,15	3,0572
11	0,094	6,4789
12	0,054	19,251
13	0,030	62,382
14	0,016	211,58

Po zavedení třídící frakce a použití korekčního faktoru vychází počty a průměry trysek v jednotlivých patrech následovně dle tabulky číslo 5:

Tab. 5 Počet a průměr trysek na jednotlivých stupních

Patro	Tříděná frakce PM_x [µm]	Počet trysek	Průměr trysek D [mm]
1	10	2	5
2	5,3	3	3,1
3	3,6	5	2
4	2,5	9	1,3
5	1,6	14	0,9
6	0,94	14	0,6
7	0,60	25	0,4
8	0,38	30	0,3
9	0,25	35	0,22
10	0,15	40	0,17
11	0,094	45	0,15
12	0,054	50	0,14
13	0,030	45	0,14
14	0,016	50	0,13

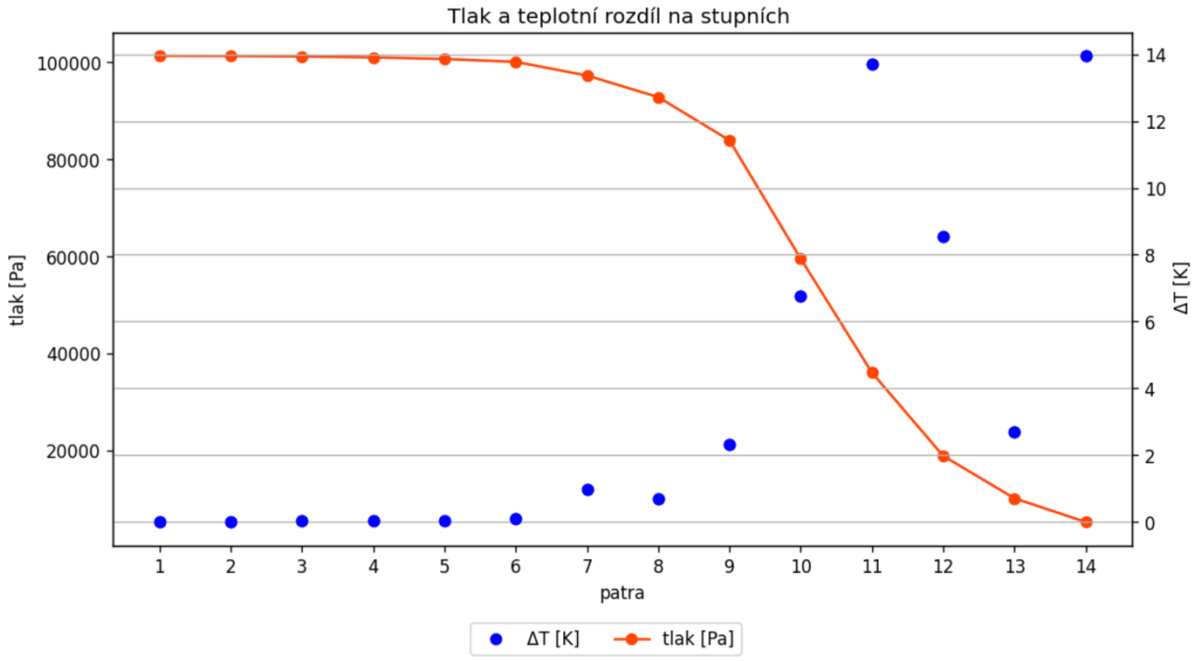
Počet trysek byl zvolen na základě požadovaného rozmezí Reynoldsova čísla. Dále bylo nutné zjistit velikost korekční teploty v jednotlivých stupních. Po vyčíslení teploty je nezbytné přepočítat hodnoty, na nichž je teplota závislá. Pro zajímavost je v tabulce číslo 6 uvedena

změna teoretické rychlosti zvuku a rychlost média za tryskou. Uvedený tlak je konečným tlakem po úvaze výše uvedených tlakových ztrát.

Tab. 6 Teplota a na ní závislé veličiny měnící se jednotlivými stupni impaktoru

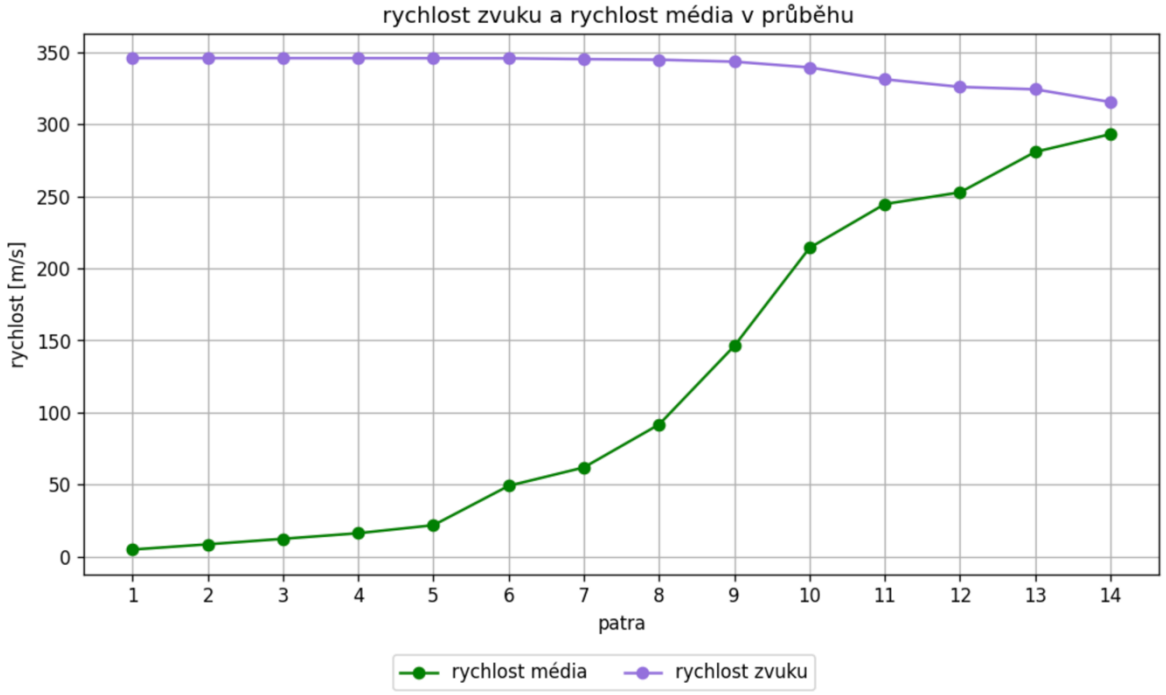
Patro	Tříděná frakce PM_x [µm]	Teplota [°C]	Teoretická rychlost zvuku [$m \cdot s^{-1}$]	Rychlost za tryskou [$m \cdot s^{-1}$]	Tlak [Pa]
1	10	23,000	345,9	4,95	**101 325,00**
2	5,3	22,988	345,9	8,59	**101 294,29**
3	3,6	22,963	345,88	12,38	**101 202,26**
4	2,5	22,924	345,86	16,29	**101 010,88**
5	1,6	22,869	345,82	21,84	**100 678,96**
6	0,94	22,764	345,76	49,15	**100 082,06**
7	0,60	21,800	345,19	61,92	**97 269,80**
8	0,38	21,090	344,78	91,74	**92 821,65**
9	0,25	18,776	343,42	146,22	**83 905,78**
10	0,15	12,023	339,43	214,27	**59 504,56**
11	0,094	-1,683	331,17	244,64	**36 003,61**
12	0,054	-10,238	325,91	252,76	**18 833,87**
13	0,030	-12,929	324,24	280,84	**10 092,17**
14	0,016	-25,882	315,42	293,14	**5 196,98**

Na obrázku číslo 4.18 lze sledovat průběh poklesu tlaku (oranžová) a teplotní rozdíly příslušné konkrétnímu patru (modrá). Tlak je přibližně konstantní a teplotní rozdíly jsou téměř nulové do oblasti 6. patra, pak již u obou veličin nastává výraznější změna. V případě tlaku největší změna nastává mezi 9. a 10. patrem. U teploty o velkém skoku lze mluvit v případě 11.patra a 14.patra.



Obr. 4.18 Závislost tlaku a teplotního rozdílu na stupních impaktoru

Na obrázku číslo 4.19 je zobrazeno porovnání poklesu teoretické rychlosti zvuku s nárustem rychlosti média proudícího impaktorem. Rychlost zvuku je funkcí teploty. Čím více teplota klesá, tím se snižuje i teoretická rychlost zvuku. V tomto případě poklesla hodnota rychlosti zvuku při nejnižší dosažené teplotě v impaktoru přibližně na 315 $m \cdot s^{-1}$ viz tabulka číslo 6. Zeleně značená křivka uvádí změny rychlosti média. Tato rychlost nesmí přesáhnout rychlost zvuku, což je dodrženo. Rychlost média začíná v prvním patře na hodnotě cca 5 $m \cdot s^{-1}$ a v posledním patře se přibližuje hodnotě 295 $m \cdot s^{-1}$. Nárůst lze tedy považovat za výrazný.



Obr. 4.19 Rychlost zvuku a rychlost média v průběhu

5 Porovnání vytvořeného výpočtového postupu a parametrů komerčního impaktoru

Výše uvedený postup v kapitole 4.1 a 4.2 byl aplikován na parametry komerčního impaktoru a poté byly porovnány jednotlivé výsledky veličin. Dostupné parametry impaktoru jsou uvedené v kapitole číslo 5.1.

5.1 Komerční impaktor

Jedná se o impaktor DEKATI DLPI+. Údaje o komerčním impaktoru byly převzaty z oficiálních stránek výrobce a chybějící byly naměřeny přímo na dostupném impaktoru v laboratoři. V následující tabulce číslo 7 jsou uvedeny parametry komerčního impaktoru. Hodnoty tříděné frakce jsou dány výrobcem, který uvádí kalibraci parametrů při 20 °C. Průměr trysek a jejich počet byl zjištěn měřením přímo na dostupném impaktoru. V případě tlaku proběhlo jeho měření během chodu impaktoru při objemovém průtoku 10 $l \cdot min^{-1}$ [40].

Tab. 7 Parametry komerčního impaktoru [40]

Patro	Tříděná frakce PM_x [µm]	Průměr trysky [mm]	Počet trysek [ks]	Tlak [Pa]
1	10	4,15	1	**101 320**
2	5,3	3,15	1	**101 300**
3	3,6	1,6	3	**101 250**
4	2,5	0,7	14	**101 180**
5	1,6	0,5	17	**101 000**
6	0,94	0,35	20	**100 450**
7	0,60	0,2	48	**99 560**
8	0,38	0,15	50	**97 030**
9	0,25	0,15	27	**88 480**
10	0,15	0,15	19	**68 300**
11	0,094	0,15	21	**39 450**
12	0,054	0,125	58	**22 850**
13	0,030	0,15	69	**9 780**
14	0,016	0,15	174	**4 000**

5.2 Porovnání geometrie navrženého a komerčního impaktoru

Porovnání geometrie navrženého a komerčního impaktoru bude v následujících kapitolách zaměřeno na velikosti a počty trysek na jednotlivých patrech, které jsou využívány pro konkrétní velikost tříděné frakce PM_x. Po zhodnocení těchto parametrů dojde k porovnání tlakových změn obou impaktorů.

5.2.1 Tříděná frakce PMx

Požadavek na tříděnou frakci PM_x byl hlavní podmínkou u navrhovaného impaktoru. Tudíž hodnoty jsou totožné viz tabulka číslo 8, kde šedý sloupec přísluší navrhovanému impaktoru a oranžový sloupec zastupuje hodnoty komerčního impaktoru.

Tab. 8 Porovnání hodnot mezi komerčním a navrhovaným impaktorem – tříděná frakce PMx [40]

Patro	Komerční	Navrhovaný
	Tříděná frakce PM_x [µm]	Tříděná frakce PM_x [µm]
1	10	10
2	5,3	5,3
3	3,6	3,6
4	2,5	2,5
5	1,6	1,6
6	0,94	0,94
7	0,60	0,60
8	0,38	0,38
9	0,25	0,25
10	0,15	0,15
11	0,094	0,094
12	0,054	0,054
13	0,030	0,030
14	0,016	0,016

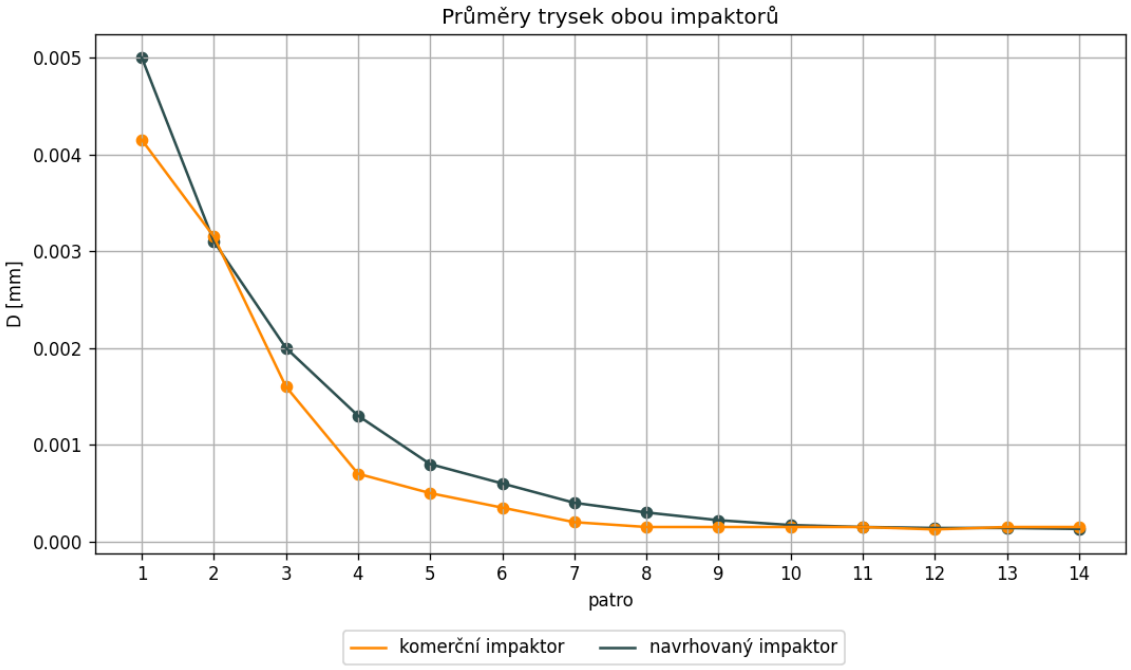
5.2.2 Průměr a počet trysek

Průměr a počet trysek je určován již v základním výpočetním postupu. Tady již hodnoty vycházely odlišně. Výpočet respektoval všechna pravidla, které zaručovaly platnost jednotlivých rovnic a postupů. Při dosazení počtu trysek dle komerčního impaktoru, hodnota průměru trysky nevycházela totožně se skutečnou hodnotou průměru na komerčním impaktoru. Pro následné porovnání bylo tedy nutné tento rozdíl zanedbat a pokračovat ve výpočtu se skutečným průměrem trysky. Při tomhle zanedbání však došlo k nesplnění podmínek, konktrétně se jednalo o nevyhovující Reynoldsova čísla. Jak již bylo výše zmíněno, platnost uvedených rovnic je v pouze v případě, že se Reynoldsova čísla na jednotlivých patrech pohybují v intervalu <500;3000>. Při zadání parametrů komerčního impaktoru se hodnoty Reynoldsova čísla na prvních stupních pohybovaly v rozmezí <3500;6000> a naopak u posledních stupňů dosahovaly <45;420>. Z toho usuzuji, že výše uvedený výpočtový postup nemohl být použit při navrhování komerčního impaktoru. Musel se tedy opírat o jiné výpočetní vztahy nebo byl navržen pomocí experimentálních dat.

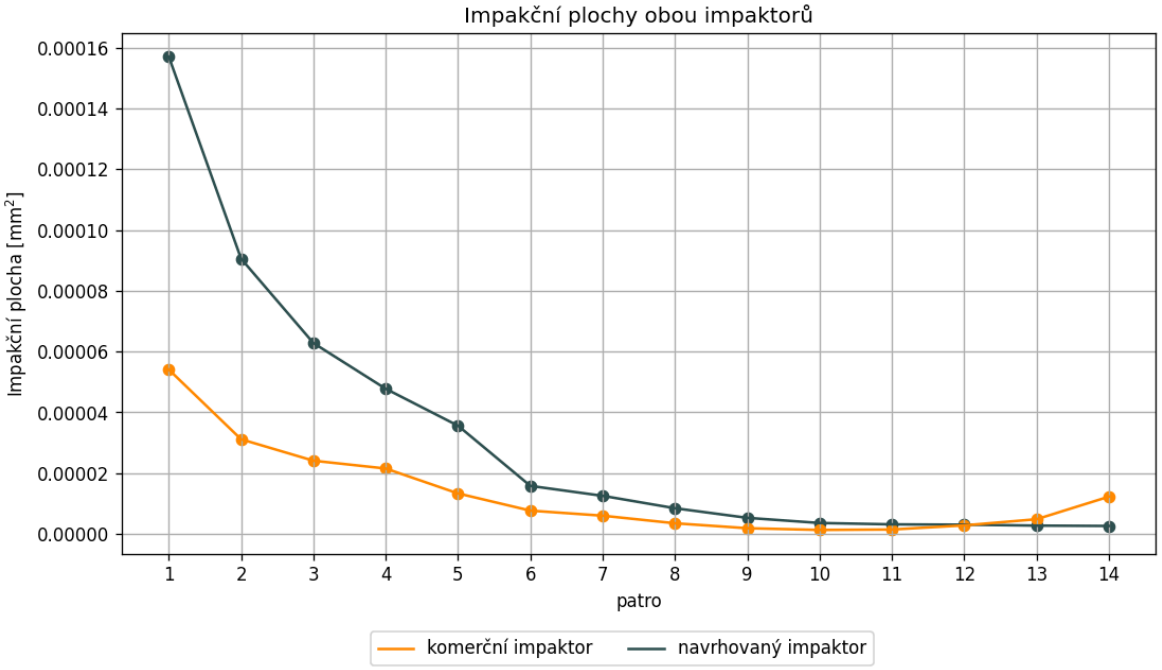
Tab. 9 Porovnání parametrů komerčního impaktoru s navrženým impaktorem – průměr a počet trysek

Patro	Komerční		Navrhovaný	
	Průměr trysky [mm]	Počet trysek [ks]	Průměr trysky [mm]	Počet trysek [ks]
1	4,15	1	5	2
2	3,15	1	3,1	3
3	1,6	3	2	5
4	0,7	14	1,3	9
5	0,5	17	0,9	14
6	0,35	20	0,6	14
7	0,2	48	0,4	25
8	0,15	50	0,3	30
9	0,15	27	0,22	35
10	0,15	19	0,17	40
11	0,15	21	0,15	45
12	0,125	58	0,14	50
13	0,15	69	0,14	45
14	0,15	174	0,13	50

Porovnání parametrů komerčního impaktoru a navrženého impaktoru je uvedeno na grafech na obrázku číslo 5.1 a 5.2. Jednotlivého hodnoty jsou zaznamenány v tabulce číslo 9, kde oranžové sloupce patří komerčnímu impaktoru a šedé navrhovanému impaktoru.



Obr. 5.1 Porovnání průměrů trysek komerčního impaktoru s navrhovaným impaktorem



Obr. 5.2 Porovnání impakčních ploch komerčního impaktoru s navrhovaným impaktorem

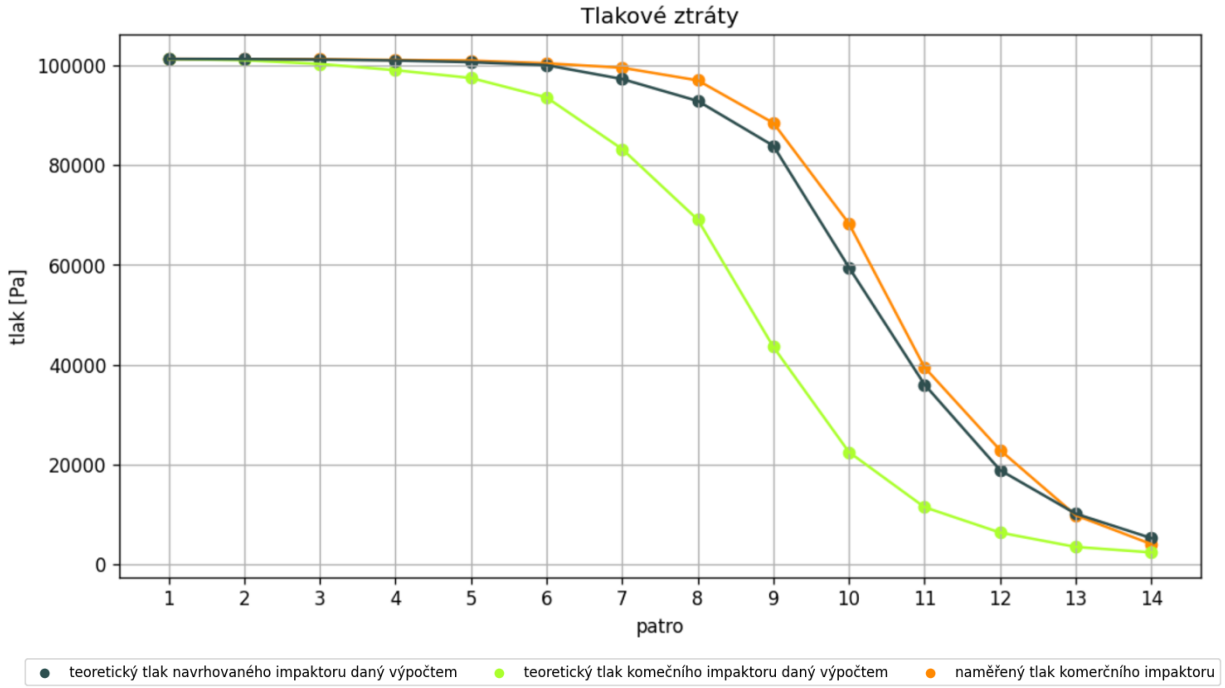
5.2.3 Tlakové ztráty

Poslední porovnávací oblastí jsou tlakové ztráty. Nyní se do porovnání dostávají tři průběhy: průběh tlaku navrhovaného impaktoru (šedá), průběh naměřeného tlaku na komerčním impaktoru (oranžová) a průběh tlaku pro komerční impaktor získaný uvedeným výpočtem (zelená). Všechny hodnoty tlaků jsou uvedeny v tabulce číslo 10.

Tab. 10 Tlakový průběh impaktorů

Patro	Komerční naměřený Tlak [Pa]	Navrhovaný výpočtem Tlak [Pa]	Komerční výpočtem Tlak [Pa]
1	101 320	101 325,00	101 325,00
2	101 300	101 294,29	101 072,42
3	101 250	101 202,26	100 320,19
4	101 180	101 010,88	99 072,45
5	101 000	100 678,96	97 503,26
6	100 450	100 083,38	93 601,30
7	99 560	97 293,12	83 250,01
8	97 030	92 896,08	69 090,33
9	88 480	84 193,54	43 564,07
10	68 300	60 935,75	22 458,68
11	39 450	39 148,88	11 405,65
12	22 850	22 498,25	6 306,81
13	9 780	12 269,40	3 429,84
14	4 000	6 341,29	2 332,99

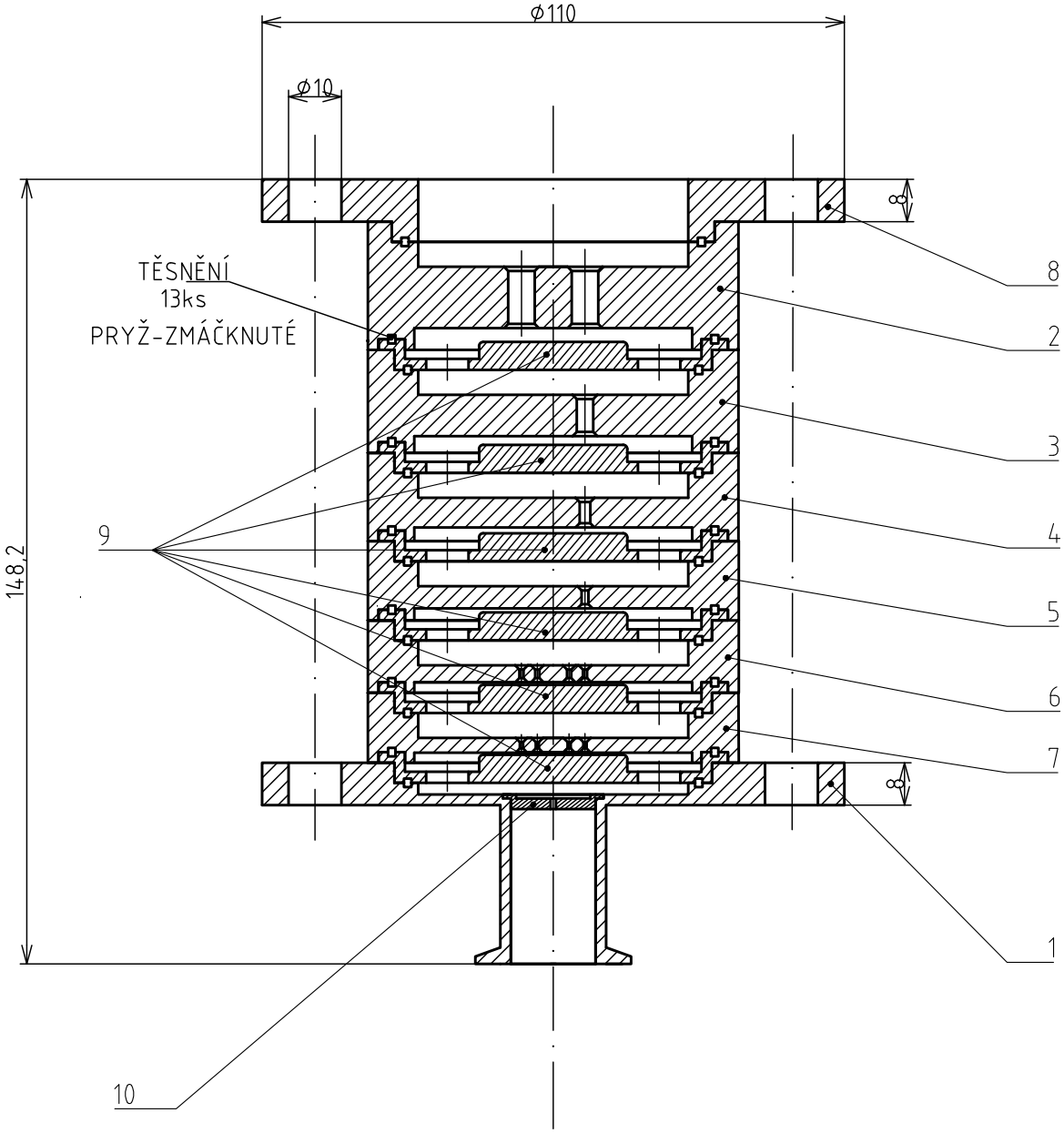
Na obrázku číslo 5.3 je znázorněn graf, kde šedá křivka odpovídá tlakovému průběhu pro navrhovaný impaktor. Oranžová křivka představuje naměřené hodnoty tlaku na komerčním impaktoru. Zeleně je označen teoretický průběh tlaku komerčního impaktoru zjištěný výpočtem při zanedbání podmínek.



Obr. 5.3 Porovnání tlakových ztrát komerčního a navrženého impaktoru

6 Konstrukční návrh vlastního impaktoru

Po provedeném výpočtů pro 14 patrový impaktor bylo z výsledků usouzeno, že konstrukční návrh bude zhotoven pro 6 pater. Jak je patrné, tak do oblasti 6. patra jsou hodnoty tlaku i teploty relativně konstantní. Navíc tříděná frakce 0,94 μm odpovídá požadavku ze zadání na odloučení částic PM_1. Pod každým patrem je vložena podložka s impakční plochou. Aby měl impaktor stabilní konstrukci disponuje horním a spodním dílem, který spolu se závitovými tyčemi plní pevné spojení částí. Horní díl má navíc geometrií navrženou pro připojení dostupné vývěvy. Poslední součástí je redukční kroužek s otvorem, který zajišťuje dosažení kritických podmínek proudění. Na obrázku číslo 6.1 je řez celou sestavou impaktoru. Ve výkresové dokumentaci je sestava označená 0-A3-1 a seznam položek 4-A4-1.



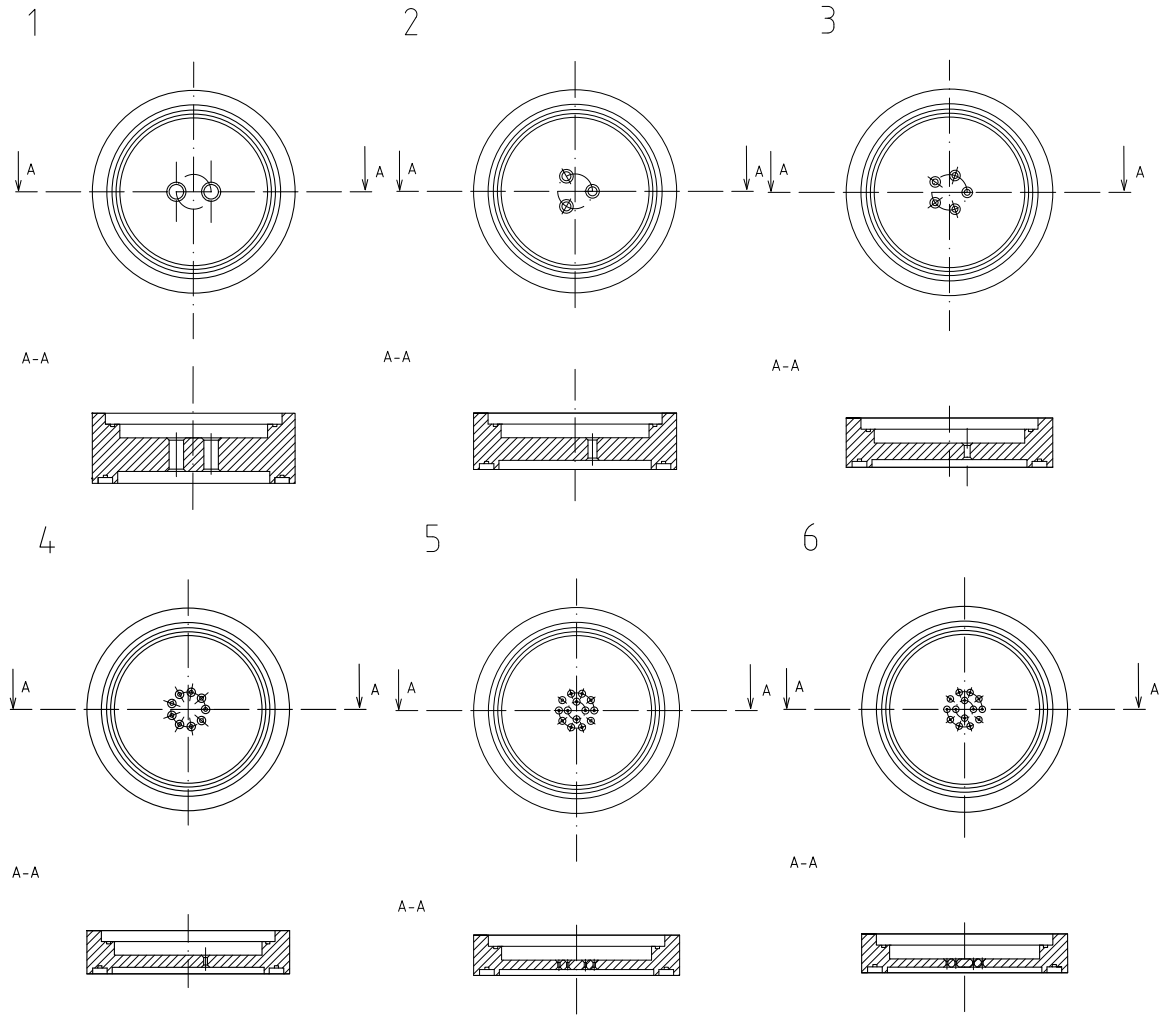
Obr. 6.1 Řez impaktorem: 1 - spodní díl, 2-7 - jednotlivá patra, 8 - horní díl, 9 - podložka, 10 - redukční kroužek

6.1 Konstrukce pater impaktoru

Celkově tedy bylo navrženo 6 pater, které odlučují částice velikostí PM_{10}, $PM_{2,5}$ a PM_1. Na obrázku číslo 6.2 jsou zobrazeny neokótovaná jednotlivá patra podle parametrů odpovídajících tabulce číslo 11. Okótovaná výkresová dokumentace je příloze s označením 2 - A3 - x, kde x je číslo konkrétního patra.

Tab. 11 Geometrie a počet trysek pro navrhovaný impaktor

Patro	Tříděná frakce PM_x [µm]	Počet trysek	Průměr trysek D [mm]
1	10	2	5
2	5,3	3	3,1
3	3,6	5	2
4	2,5	9	1,3
5	1,6	14	0,9
6	0,94	14	0,6

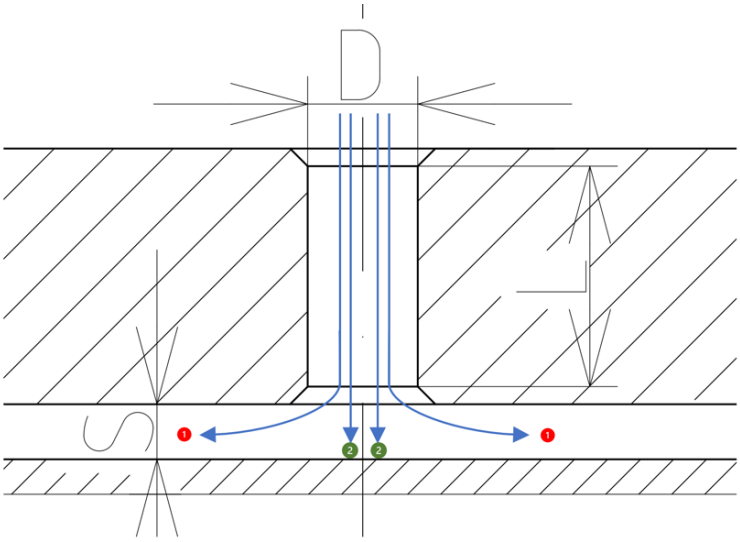


Obr. 6.2 Patra impaktoru

Při výpočtu se uvažovalo s poměrem průměru trysky D ku délce trysky L 1:2. V případě prvního patra, který uvažuje tříděnou frakci PM_{10}, se $D = 5$ mm a $L = 10$ mm. Dále byl ve výpočtu brán v potaz poměr mezi průměrem trysky D a vzdáleností konce trysky a impakční plochy S. V konstrukčním provedení se projeví u prvního patra jako $D = 5$ mm a $S = 2{,}5$ mm. Rozměr S je dán správným umístěním podložky s impakčním materiálem. Rozměry D, L a S jsou znázorněny na obrázku číslo 6.3. Hodnoty pro další patra jsou určeny analogicky a uvedeny v tabulce číslo 12.

Tab. 12 Rozměry impaktoru D, L, S

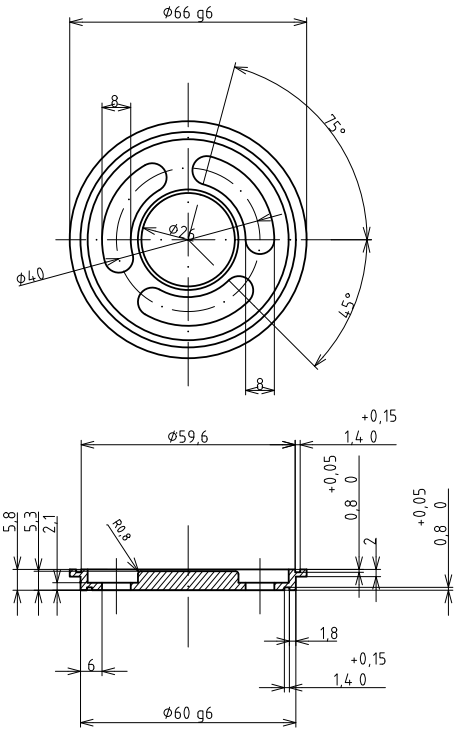
Patro	Průměr trysek D [mm]	Délka trysek L [mm]	Vzdálenost S [mm]
1	5	10	2,5
2	3,1	6,2	1,65
3	2	4	1
4	1,3	2,6	0,65
5	0,9	1,8	0,45
6	0,6	1,2	0,3



Obr. 6.3 Řez stupněm impaktoru

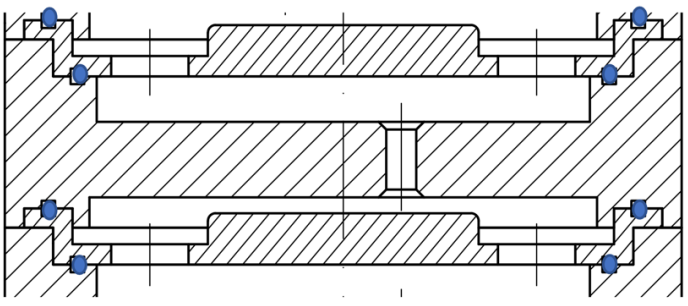
6.2 Konstrukce podložky s impakčním materiálem

Podložka plní funkci držáku impakčního materiálu a zároveň disponuje otvory, aby se vzduch s menšími frakcemi dostal na další patro. Konstrukční povedení je na obrázku číslo 6.4 a ve výkresové dokumentaci s označením 3-A3-1. Pro tento návrh je nutné mít pod každým stupněm jednu podložku, tudíž je celkově potřeba 6 podložek. Impaktor je navržený tak, že všechny podložky jsou identické.



Obr. 6.4 Geometrie podložky

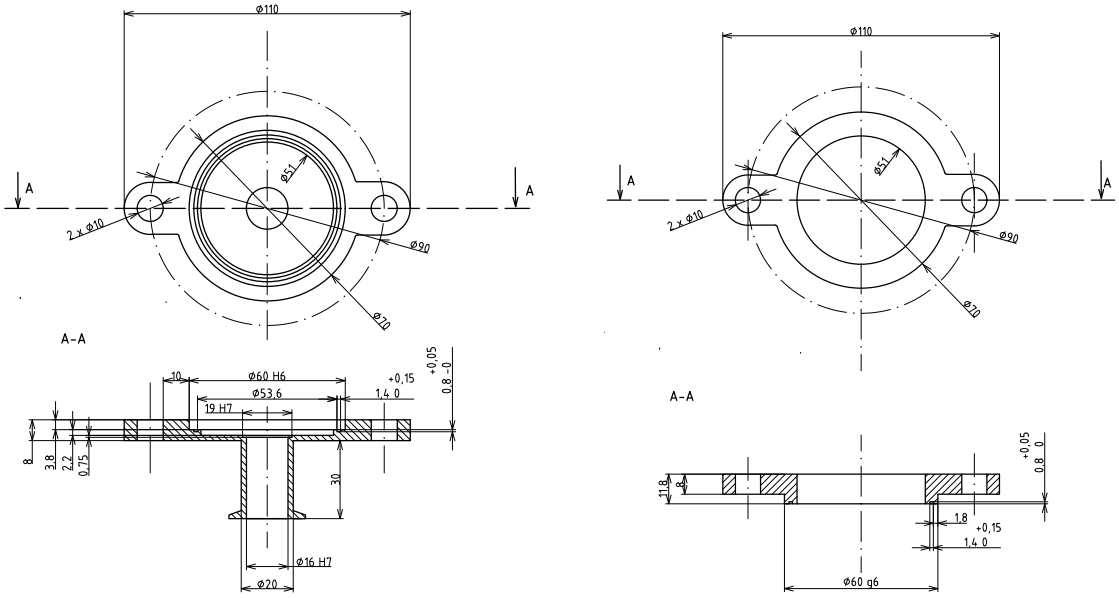
Pro kvalitní impakci je důležité, aby podložka byla v zařízení umístěna stabilně. Proto mezi podložku a patry je vloženo těsnění. Umístění těsnění je zaznačeno modře na obrázku číslo 6.5. Vzdálenost impakční plochy od konce trysky S je dána umístěním podložky. Je nutné tedy uvažovat i tloušťku impakčního materiálu. Navrhovaný impaktor je napočítán a zkonstruován pro tloušťku impakčního materiálu 1 mm, což znamená, že vzdálenost konce trysky od podložky je rovna S + 1 mm. Impakční materiál může být například skleněný potřený olejovou vrstvou. V tohle návrhu se uvažuje aluminiová fólie díky lepší odolnosti vůči okolním vlivům, jako je například teplota.



Obr. 6.5 Řez impaktorem (podložka, 2. patro, podložka)

6.3 Konstrukce spodního a horního dílu impaktoru

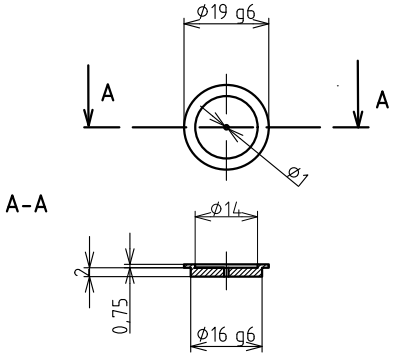
Horní a spodní díl je spojen pomocí dvou závitových tyčí, a tak stupně mezi nimi drží pevněji. Spodní díl tedy disponuje otvory pro závitové tyče a dále hubicí na odvod měřeného vzduchu do vývěvy. Na spodním díl jsou položeny položky jako redukční kroužek (kapitola 6.4), podložka a patro číslo 6. Dále se střídají podložky a patra. Poslední patro v tohle řazení je patro číslo 1 a na něm je položen horní díl. Ten také disponuje otvory na závitové tyče a zároveň musí poskytovat dostatečně velký prostor pro přísun vzduchu k patru číslo 1. Na obrázku číslo 6.6 jsou znázorněny oba díly. Ve výkresové dokumentaci jsou označeny jako 1-A3-1 a 1- A3-2.



Obr. 6.6 Spodní a horní díl impaktoru

6.4 Redukční kroužek

Do spodního dílu impaktoru je vložen redukční kroužek s otvorem, který má za úkol uvést proudění do kritických podmínek. Pro použití dostupné vývěvy stačí považovat tlak na výstupu v hodnotě 30 kPa. Velikost otvoru tedy závisí na vstupním tlaku, výstupním tlaku, teplotě, objemovému průtoku a na typu média, který otvorem prochází. Všechny požadované parametry jsou známé a po dosazení vychází průměr otvoru 1 mm. Konstrukční provedení je na obrázku číslo 6.7 a ve výkresové dokumentaci označeno 1-A4-1 [41].



Obr. 6.7 Geometrie redukčního kroužku

ZÁVĚR

Práce byla rozdělena do šesti kapitol, přičemž v první části byla provedena stručná rešerše o jemných částicích, včetně jejich dopadu na lidské zdraví a životní prostředí. Po zmínění vlastností a zdrojů jemných částic byly představeny některé metody analyzující ovzduší. Byla zmíněna chromatografie, biomonitoring a satelitní analýza. Větší pozornost pak byla věnována měřením částic TZL, kde bylo uvedeno již více metod, kde některé metody disponovaly i výpočetními vztahy.

V následující části byla popsána česká legislativa o ochraně ovzduší se základními právními předpisy uvádějícími limity množství škodlivin v ovzduší v České republice.

Třetí kapitola pojednávala o impaktoru, kde byly popsány hlavní dva druhy impaktorů. Jednalo se o impaktor kaskádový a jeho typy a o impaktor virtuální. Mimo vysvětlení principu, na kterých impaktory pracují, bylo stručně okomentováno i jejich využití.

Výpočtové části se základními výpočtovými vztahy se věnovala čtvrtá kapitola práce. Pro zahájení výpočtů muselo být definováno, pro jaké médium se impaktor bude navrhovat. Navrhovaný impaktor byl určen pro běžný vzduch, a tak se vlastnosti běžného vzduchu promítly v následujících výpočtech. Základní výpočetní vztahy vycházely z matematického modelu Virgila A. Marpla pro návrh kaskádového impaktoru pro třídění frakcí o velikosti PM_{10}, $PM_{2,5}$ a PM_1. Pro platnost vztahů bylo nutné dodržet všechny uváděné podmínky. Jedním z cílů práce bylo vytvořit zpřesněný výpočet, kde dominovala změna tlaku na jednotlivých stupních, což v případě základního výpočtu nebylo uvažováno a počítalo se tedy jen s tlakem atmosférickým na všech stupních. Mnou vytvořený zpřesněný výpočet se primárně opíral o geometrii trysek a jejich umístění. Mimo změnu tlaku se v impaktoru měnila i teplota a v neposlední řadě i rychlost. Teplota i rychlost měly vliv na změnu tlaku, a tak jejich vliv se sledoval pomocí grafického průběhu tlaku v impaktoru. Tím, že se jednou veličinou změnila druhá a veličiny byly na sobě závislé, musely být zhotoveny dva cykly, které zajišťovaly co nejpřesnější hodnoty. Celý výpočet byl zpracován pomocí programovacího jazyka Python, a tak bylo možné pomocí cyklu ukončeného nesplněním podmínky cyklu (while) naprogramovat přímo do celého výpočetního postupu pro všechny stupně impaktoru. Výsledkem výpočtových postupů jsou grafické závislosti, které byly vytvořeny programovacím jazykem Python pomocí knihovny matplotlib.

V páté kapitole proběhlo srovnání komerčního impaktoru DEKATI DLPI+ s impaktorem navrhovaným. Jelikož výpočetní postup byl zhotoven pro 14 pater a měl totožné požadavky na tříděné frakce na jednotlivých stupních jako u komerčního impaktoru, mohlo dojít k vzájemnému porovnání. Po nasazení geometrie komerčního impaktoru na mnou vytvořený výpočtový model však došlo ke kolizím. Prvním problémem byly jiné vycházející průměry trysek při zachování jejich počtu. Pro zachování skutečné geometrie komerčního impaktoru byly průměry trysek nadále uvažovány i navzdory vycházejícím hodnotám, což mělo za následek nedodržení požadavků pro platnost výpočtů. Konktrétně se jednalo o nedodržení mezí pro Reynoldsova čísla a dosažení rychlosti, která byla vyšší než rychlost zvuku. Z toho tedy usuzuji, že komerční impaktor se musel opírat o jiné výpočetní vztahy nebo byl navržen experimentálně. S čím však výsledný průběh tlaku navrhovaného impaktoru korespondoval, byl průběh tlaku naměřeného na komerčním impaktoru v laboratoři.

Poslední šestá kapitola obsahovala konstrukční návrh kaskádového impaktoru podle zhotoveného výpočtového postupu. Podle výsledků průběhu bylo usouzeno, že konstrukční návrh bude disponovat 6 patry. Každé patro bylo navrženo podle výpočtového modelu. Mimo patra bylo nutné vytvořit návrh podložky na impakční plochu. V našem případě na aluminiovou fólii. Aby impaktor mohl fungovat musel být opatřen horním a spodním dílem, které byly k sobě spojeny závitovými tyčemi. Pro částečné zamezení ztrát bylo do geometrie implementováno několik těsnících kroužků z pryže. A poslední důležitou součástkou byl redukční kroužek k dosažení kritických podmínek proudění. Výkresová dokumentace je přidána jako příloha.

Pro komplexnější porovnání by bylo vhodné impaktor vyrobit a ověřit hodnoty vycházející z navrženého výpočtu. Impaktor nebyl vyroben kvůli malému časového prostoru pro zadání do výroby. Na 3D tiskárně taky bohužel nemohl být zhotoven, kvůli nemožnosti tisku tak tenkých stěn z plastu. Navíc výrobky z 3D tiskárny mají na povrchu nerovnosti, nepravidelný tvar otvorů a malé otvory by bylo nutné vyvrtávat. Celkově by byl tedy impaktor vytištěný na 3D tiskárně geometricky nepřesný.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	**Veličina**	**Jednotka**
ACI	Andersen Cascade Impactor = Andersenův kaskádový impaktor	[-]
CO	oxid uhelnatý	[-]
ELPI	Electrical Low Pressure Impactor = elektrický nízkotlaký impaktor	[-]
FPD	Fine Particle Dose = respirabilní dávka	[kg]
FPF	Fine Particle Fraction = respirabilní frakce	[%]
HPLC	vysokoúčinná kapalinová chromatografie	[-]
IAEA	Mezinárodní agentura pro atomovou bezpečnost	[-]
MOUDI	Microorifice Uniform Deposit Impactor	[-]
NO_x	oxidy dusíku	[-]
NP	nanočástice	[-]
PM	jemné částice	[-]
PM_1	jemné částice o velikosti 1 μm	[-]
PM_{10}	jemné částice o velikosti 10 μm	[-]
$PM_{2,5}$	jemné částice o velikosti 2,5 μm	[-]
SO_2	oxid siřicitý	[-]
SO_x	oxidy síry	[-]
TEOM	Tapered Element Oscillating Microbalance	[-]
TZL	jemné částice	[-]
UFP	ultrajemné částice	[-]
WHO	World Health Organization	[-]

Symbol	Veličina	Jednotka
C	Cunninghamův korekční součinitel na skluz	[-]
c	rychlost zvuku ve vzduchu	[m·s^{-1}]
c_m	hmotnostní koncentrace TZL	[kg·m^{-3}]
D	průměr trysky	[m]
$D_č$	průměr částice	[m]
diff	rozdíl pro splnění podmínky cyklu	[-]
$diff_p$	rozdíl pro splnění podmínky cyklu k získání tlaku	[-]
f	frekvence	[Hz]
f_0	vlastní frekvence	[Hz]
f_1	frekvence bez hmotnosti částic	[Hz]
f_2	frekvence s hmotností částic	[Hz]
f_a	frekvence kmitání při použití čistého filtru	[Hz]
I_0	vstupní intenzita záření	[W·m^{-2}]
I_1	intenzita záření za čistým filtrem	[W·m^{-2}]
I_k	intenzita záření za zaneseným filtrem	[W·m^{-2}]
K	konstanta harmonického oscilátoru	[-]
k	koeficient	[-]
K_0	kalibrační konstanta	[-]
L	délka trysky	[m]
m	hmotnost	[kg]
$\dot{m}$	hmotnostní tok	[kg·s^{-1}]
M	zdánlivá molární hmotnost	[kg·mol^{-1}]
m_0	vlastní hmotnost kuželíku	[kg]
Ma	Machovo číslo	[-]
M_{Ar}	molární hmotnost argonu	[kg·mol^{-1}]
M_{CO2}	molární hmotnost oxidu uhličitého	[kg·mol^{-1}]
$m_č$	hmotnost zachycených částic	[kg]
m_f	hmotnost čistého filtru	[kg]
M_{N2}	molární hmotnost dusíku	[kg·mol^{-1}]
M_{O2}	molární hmotnost kyslíku	[kg·mol^{-1}]
m_z	hmotnost zaneseného filtru	[kg]
N	počet trysek	[ks]
p_{atm}	atmosférický tlak	[Pa]
$p_{cycleprevious}$	tlak na výstupu cyklu předcházejícího	[Pa]
p_{new}	tlak nově vzniklý	[Pa]

$p_{previous}$	tlak předchozího stupně	[Pa]
R	univerzální plynová konstanta	[J·mol^{-1}·K^{-1}]
R_{air}	plynová konstanta pro vzduch	[J·mol^{-1}·K^{-1}]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
S	vzdálenost konce trysky od impakční plochy	[m]
Stk	Stokesovo číslo	[-]
T	teplota	[K]
T_{aktual}	aktuální korečkní teplota ve stupni	[K]
ΔT	změna teploty	[K]
V	objem nasátého plynu	[m^3]
$\dot{V}$	objemový průtok plynu	[m^3·s^{-1}]
v	rychlost na výstupu z trysky	[m·s^{-1}]
v_a	rychlost nabíhajícího proudu	[m·s^{-1}]
v_N	rychlost v ústí sondy	[m·s^{-1}]
δ	úhel zkosení na vstupu trysky	[°]
η	dynamická viskozita	[Pa·s]
λ	střední volná dráha molekul	[m]
$\rho_č$	hustota částice	[kg·m^{-3}]
ζ_δ	ztrátový součinitel pro stlačitelné médium	[-]
ζ_ε	ztrátový součinitel dán nárazem na impakční plochu	[-]
ζ_λ	ztrátový součinitel dán třením	[-]
ζ_σ	ztrátový součinitel dán zkosením na vstupu trysky	[-]
ζ_ω	ztrátový součinitel dán změnou směru proudění média	[-]
ρ_{air}	hustota vzduchu	[kg·m^{-3}]
α	úhel zkosení na výstupu trysky	[°]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Prostorové a časové měřítko reakcí složek atmosféry [4] ... 13
Obr. 1.2 Porovnání velikostí částic podle výskytu [47] ... 14
Obr. 1.3 Ekvivalentní průměr částice [4][8] ... 15
Obr. 1.4 Zastoupení konkrétních veličin podle velikosti částic [9] ... 16
Obr. 1.5 Schéma ukládání částic v lidském těle [4] ... 17
Obr. 1.6 Chromatografie a) Adsorpční b) Rozdělovací c) Iontová d) Gelová [13] ... 18
Obr. 1.7 Analýza biomonitoringem z tabákových listů [4] ... 19
Obr. 1.8 Výškový profil početní koncentrace aerosolových částic zaznamenaný lidarem v noci 3.1.2022 [48] ... 19
Obr. 1.9 Popis izokinetické podmínky v gravimetrickém provedení [49] ... 21
Obr. 1.10 Gravimetrická metoda a) externí b) interní [16] ... 21
Obr. 1.11 Konstrukční provedení kuželíku [30] ... 22
Obr. 1.12 Měřící trať metody TEOM [4] ... 23
Obr. 1.13 Změna intenzity záření při průchodu čistým a zaneseným filtrem [18] ... 24
Obr. 1.14 Princip vzorkování podle elektrické mobility [17] ... 24
Obr. 1.15 Měření rozptýleného světla [19] ... 25
Obr. 1.16 Optický měřič Welas pro Palas 2000 [20] ... 26
Obr. 1.17 Měření transmise [19] ... 26

Obr. 2.1 Koncentrace PM_{10} a $PM_{2,5}$ vážené populací za rok 2020 [25] ... 27
Obr. 2.2 Celkové emise PM_{10} a $PM_{2,5}$ v letech 2010-2019 [25] ... 29

Obr. 3.1 Princip kaskádového impaktoru [50] ... 30
Obr. 3.2 Andersenův vysokoprůtočný kaskádový impaktor [4] ... 31
Obr. 3.3 Elektrický nízkotlaký kaskádový impaktor [30] ... 32
Obr. 3.4 Sioutasův osobní kaskádový impaktor [36] ... 32
Obr. 3.5 Virtuální impaktor [4] ... 33
Obr. 3.6 Dichotomní virtuální impaktor [4] ... 33

Obr. 4.1 Závislost Stokesova čísla na Reynoldsově čísle [38] ... 35
Obr. 4.2 Účinnost odloučení závislá na Stokesově čísle pro L/D= 2 a S/D=1/2[38] ... 36
Obr. 4.3 Záchyt částic na základě velikosti Stokesova čísla ... 36
Obr. 4.4 Závislost rychlosti média na stupních impaktoru ... 38
Obr. 4.5 Diagram cyklu while k získání teploty ... 39
Obr. 4.6 Teplotní rozdíl ve stupních impaktoru ... 39
Obr. 4.7 Diagram cyklu pro výpočet tlaku ... 40
Obr. 4.8 Závislost tlaku na stupni impaktoru při uvažování stlačitelnosti média a změny teploty ... 40
Obr. 4.9 Vyznačené parametry pro určení ztráty nárazem na impakční plochu ... 41
Obr. 4.10 Závislost tlaku na stupni impaktoru uvažující ztrátu nárazem, stlačitelnost média a změnu teploty ... 41
Obr. 4.11 Vyznačený úhel potřebný pro určení ztráty zkosením na vstupu ... 42

Obr. 4.12 Závislost tlaku na stupni impaktoru při uvažované ztrátě zkosení na vstupu, nárazu proudu, stlačitelnosti média a změny teploty 42
Obr. 4.13 Vyznačený úhel potřebný pro určení ztráty změnou směru proudění 43
Obr. 4.14 Závislost tlaku na stupni impaktoru uvažující ztrátu změnou směru proudění, zkosením na vstupu, nárazem proudu, stlačitelnosti média a změnou teploty 43
Obr. 4.15 Vyznačené rozměry potřebné pro určení ztráty třením 44
Obr. 4.16 Závislost tlaku na stupni impaktoru uvažující ztrátu třením, změnou směru proudění, zkosení na vstupu, nárazem proudu, stlačitelností média a změnou teploty 44
Obr. 4.17 Porovnání změny tlaku na základě uvažování jednotlivých ztrát 45
Obr. 4.18 Závislost tlaku a teplotního rozdílu na stupních impaktoru 47
Obr. 4.19 Rychlost zvuku a rychlost média v průběhu....48

Obr. 5.1 Porovnání průměrů trysek komerčního impaktoru s navrhovaným impaktorem....51
Obr. 5.2 Porovnání impakčních ploch komerčního impaktoru s navrhovaným impaktorem...51
Obr. 5.3 Porovnání tlakových ztrát komerčního a navrženého impaktoru 52

Obr. 6.1 Řez impaktorem: 1 - spodní díl, 2-7 - jednotlivá patra, 8 - horní díl, 9 - podložka, 10 - redukční kroužek 53
Obr. 6.2 Patra impaktoru 54
Obr. 6.3 Řez stupněm impaktoru....55
Obr. 6.4 Geometrie podložky 56
Obr. 6.5 Řez impaktorem (podložka, 2. patro, podložka) 56
Obr. 6.6 Spodní a horní díl impaktoru....57
Obr. 6.7 Geometrie redukčního kroužku....57
Obr. 6.8 Validace tlakových ztrát s komerčním impaktorem....57

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Názvosloví částic podle velikosti [5] 14
Tab. 2 Imisní limity vyhlášené pro ochranu zdraví lidí a pro celkový obsah znečišťující látky v částicích PM_{10} vyhlášené pro ochranu zdraví lidí [24]. 28
Tab. 3 Imisní limity pro ochranu ekosystému a vegetace [24]....28
Tab. 4 Hodnoty Cunninghamova korekčního součinitele pro určené tříděné frakce 46
Tab. 5 Počet a průměr trysek na jednotlivých stupních....46
Tab. 6 Teplota a na ní závislé veličiny měnící se jednotlivými stupni impaktoru 47
Tab. 7 Parametry komerčního impaktoru [37] 49
Tab. 8 Porovnání hodnot mezi komerčním a navrhovaným impaktorem – tříděná frakce PMx 50
Tab. 9 Porovnání parametrů komerčního impaktoru s navrženým impaktorem – průměr a počet trysek....50
Tab. 10 Tlakový průběh impaktorů 52
Tab. 11 Geometrie a počet trysek pro navrhovaný impaktor 54
Tab. 12 Rozměry impaktoru D, L, S 55

SEZNAM ZDROJŮ

[1] SKŘEHOT, Petr and Marcela. RUPOVÁ. *Nanobezpečnost*. B.m.: Výzkumný ústav bezpečnosti práce, 2011. ISBN 9788086973890.

[2] *Znečišštění ovzdušší* [online]. no date. Available at: https://www.eea.europa.eu/themes/air/country-fact-sheets/2021-

[3] Problematika snižování průmyslového znečištění. *Evropská agentura pro životní prostředí* [online]. 2020 [accessed. 2022-04-01]. Available at: https://www.eea.europa.eu/cs/signaly/signaly-2020/articles/problematika-snizovani-prumysloveho-znecisteni

[4] SKÁCEL FRANTIŠEK and TEKÁČ VIKTOR. *Analýza ovzduší*. 1st ed. Praha: VŠCHT Praha, 2019. ISBN 978-80-7592-038-6.

[5] MIKUŠKA, Pavel. *Atmosférické aerosoly* [online]. 2015 [accessed. 2022-04-06]. Available at: https://is.muni.cz/el/sci/podzim2015/C5150/um/Mikuska.pdf

[6] BRZEZINA JÁCHYM. Suspendované částice (PM) – otázky a odpovědi. *chmibrno.cz* [online]. 1. December 2018 [accessed. 2022-04-06]. Available at: https://chmibrno.org/blog/2018/12/01/suspendovane-castice-pm-otazky-a-odpovedi/

[7] CUFARRI BENEDETTE. The Size of SARS-CoV-2 and its Implications. *News Medical* [online]. 2021 [accessed. 2022-04-11]. Available at: https://www.news-medical.net/health/The-Size-of-SARS-CoV-2-Compared-to-Other-Things.aspx#:~:text=Upon%20analysis%20of%20negative%2Dstained,50%20nm%20to%20140%20nm.

[8] BRANIŠ MARTIN and HŮNOVÁ IVA. *Atmosféra a klima: aktuální otázky ochrany ovzduší*. Praha: Karolinum, 2009. ISBN 978-80-246-1598-1.

[9] Suspendované částice (aerosol). Český hydrometeorologický ústav . *ČHMÚ* [online]. 2005 [accessed. 2022-04-06]. Available at: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/om/weather_links/Pocasi/Navody/Znecisteni/susp_castice.pdf

[10] RIFFAULT, Véronique, Jovanna ARNDT, Hélène MARRIS, Saliou MBENGUE, Ari SETYAN, Laurent Y. ALLEMAN, Karine DEBOUDT, Pascal FLAMENT, Patrick AUGUSTIN, Hervé DELBARRE and John WENGER. Fine and Ultrafine Particles in the Vicinity of Industrial Activities: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* [online]. 2015, **45**(21), 2305–2356. ISSN 1064-3389. Available at: doi:10.1080/10643389.2015.1025636

[11] ROM WILLIAM and MARKOWITZ STEVEN. *Environmental and Occupational Medicine*. 4th ed. Philadelphia: : Wolters Kluwer/Lippincott Williams & Wilkins, 2007. ISBN 978-0-7817-6299-1.

[12] *HOW DO ULTRAFINE WELDING FUME PARTICLES GET INTO THE BODY AND WHAT EFFECTS DO THEY HAVE?* [online]. no date. Available at: https://safe-welding.com/how-do-ultrafine-welding-fume-particles-get-into-the-body-and-what-effects-do-they-have/

[13] HARVEY, David. *Modern analytical chemistry*. B.m.: McGraw-Hill, 2000. ISBN 0072375477.

[14] HENELOVÁ VLADIMÍRA and ANDREOVSKÝ JAN. *Příručka ochrany kvality ovzduší.* 1st ed. Praha: Sdružení společností IREAS centrum, 2013. ISBN ISBN 978-80-86832-77-7.

[15] KRPEC KAMIL, HORÁK JIŘÍ and HOPAN FRANTIŠEK. Měření emisí znečišťujících látek z kotlů malých výkonů. *TZB info Ostrava: VŠB, TU Ostrava, Výzkumné energetické centrum* [online]. 2012 [accessed. 2022-04-06]. Available

at: https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-pevnymi-palivy/8200-mereni-emisi-znecistujicich-latek-z-kotlu-malych-vykonu

[16] *ČSN EN 13284-1: Stacionární zdroje emisí - Stanovení nízkých koncentrací prachu - Manuální gravimetrická metoda.* 2002

[17] KODAD DANIEL. *IMPAKTOR PRO LABORATORNÍ ZÁCHYT JEMNÝCH ČÁSTIC*. Brno, 2021. Master Thesis. Vysoké učení technické v Brně.

[18] HEMERKA JIŘÍ and VYBÍRAL PAVEL. *Základy ochrany ovzduší*. 1st ed. Praha: ČVUT, 2008.

[19] *EMISSION MEASUREMENT TECHNOLOGY SINGLE-SOURCE TECHNOLOGIES AND SOLUTIONS FUTURE-ORIENTED EMISSIONS MONITORING A CRITICAL STEP TOWARD A HEALTHY ENVIRONMENT* [online]. 2014 [accessed. 2022-04-06]. Available at: https://cdn.sick.com/media/docs/6/46/946/special_information_emission_measurement_technology_en_im0045946.pdf

[20] KULÍŠEK, Jan. *STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA A VYŠŠÍ ODBORNÁ ŠKOLA BRNO, SOKOLSKÁ, PŘÍSPĚVKOVÁ ORGANIZACE ABSOLVENTSKÁ PRÁCE*. no date.

[21] PAŽOUREK JOSEF. Cyklonový odlučovák pro velmi malé částice. *Diploma Thesis* [online]. 2020 [accessed. 2022-04-27]. Available at: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=210448

[22] SITEK TOMÁŠ. *Ultrajemné částice generované spalovacím procesem*. Brno, 2018. b.n.

[23] Informace o kvalitě ovzduší v ČR. Český hydrometeorologický ústav. *ČHMÚ* [online]. 2021 [accessed. 2022-04-06]. Available at: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/exceed/summary/chmu_2021_CZ.html

[24] POLÁČIK JÁN. *IMPACT OF OPERATION PARAMETERS ON FINE COMBUSTION PARTICLES CONCENTRATION IN THE FLUE GAS OF BIOMASS BOILERS*. Brno, 2020. b.n.

[25] *Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2020* [online]. 2020 [accessed. 2022-04-20]. ISBN 9788076530249. Available at: https://info.chmi.cz/rocenka/ko2020/ko2020.pdf

[26] *Tisková zpráva ČHMÚ* [online]. 2021 [accessed. 2022-04-10]. Available at: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/tiskove_zpravy/2021/TZ_Znecisteni_ovzdusi_na_uzemi_Ceske_republiky_v_roce_2020.pdf

[27] *zákon ze dne 2.května 2012 o ochraně ovzduší*. 2012

[28] Obecné a specifické limity dle zákona č. 201/2012 Sb. . *Verlag Dashöfer* [online]. 2013 [accessed. 2022-04-06]. Available at: https://www.enviprofi.cz/33/obecne-a-specificke-limity-dle-zakona-c-201-2012-sb-uniqueidgOkE4NvrWuOKaQDKuox_Z6s8254ujbwu9F0gb2wSt3U/#:~:text=Obecn%C3%A9%20emisn%C3%AD%20limity%20jsou%20stanoveny,(d%C3%A1le%20jen%20%E2%80%9Evyhl%C3%A1%C5%A1ka%20%C4%8D.

[29] FILDÁN ZDENĚK. Zaznamenali jste zpřísnění emisních limitů od 2020? *EnviGroup* [online]. 2021 [accessed. 2022-04-06]. Available at: https://www.envigroup.cz/jste-pripraveni-na-zprisneni-emisnich-limitu.html

[30] KULKARNI, Pramod, Paul A. (Paul Andrew) BARON and Klaus. WILLEKE. *Aerosol measurement : principles, techniques, and applications*. B.m.: Wiley, 2011. ISBN 9780470387412.

[31] Co je kaskádový impaktor? *Netinbag.com* [online]. no date [accessed. 2022-04-06]. Available at: https://www.netinbag.com/cs/manufacturing/what-is-a-cascade-impactor.html
[32] GARCIA, C. *Sampling Theory and Methodology* [online]. 2012 [accessed. 2022-04-06]. Available at: https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/cascade-impactor
[33] KAŠÁK VIKTOR. Fixní kombinace flutikason propionát/formoterol v léčbě astmatu v roce 2016. *Remedia* [online]. 2016 [accessed. 2022-04-06]. Available at: http://www.remedia.cz/Okruhy-temat/Klinicke-studie/Fixni-kombinace-flutikason-propionat-formoterol-v-lecbe-astmatu-v-roce-2016/8-19-2cg.magarticle.aspx
[34] SAARI, Sampo, Anssi ARFFMAN, Juha HARRA, Topi RÖNKKÖ and Jorma KESKINEN. Performance evaluation of the HR-ELPI + inversion. *Aerosol Science and Technology* [online]. 2018, **52**(9), 1037–1047. ISSN 0278-6826. Available at: doi:10.1080/02786826.2018.1500679
[35] JÄRVINEN, *, A AITOMAA, M ROSTEDT and J & YLI. *Calibration of the new electrical low pressure impactor (ELPI+)* [online]. 2014. Available at: www.dekati.com
[36] Kaskádový osobní impactor SIOUTAS. *Chromservis* [online]. [accessed. 2022-04-06]. Available at: https://www.chromservis.eu/i/sioutas-personal-cascade-impactor-optimized-at-9-l-min?lang=CZ
[37] BUREŠ VLADIMÍR. *TECHNICKÉ SLUŽBY OCHRANY OVZDUŠÍ PRAHA a.s* [online]. 2015 [accessed. 2022-04-10]. Available at: https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/prumysl_energetika/%24FILE/OOO-Studie_navrh_emisnich_faktoru_pro_vybrane_stacionarni_zdroje-20190815.pdf
[38] LIU, Benjamin Y H. *FINE PARTICLES Aerosol Generation, Measurement, Sampling, and Analysis PARTI CLE TECHNOLOGY LABORATORY MECHANI CAL ENGI NEERI NG DEPARTMENT UNI VERSI TY OF MI NNESOTA*. 1976.
[39] IDEL′CHIK, I. E. and A. S. (Aron Semenovich) GINEVSKIĬ. *Handbook of hydraulic resistance*. B.m.: Begell House, 2007. ISBN 9781567002515.
[40] JÄRVINEN, *, A AITOMAA, M ROSTEDT and J & YLI. *Dekati® Low Pressure Impactor DLPI+* [online]. 2014. Available at: www.dekati.com
[41] *Orifice size calculator* [online]. B.m.: Clippard. [accessed. 2022-04-08]. Available at: https://www.clippard.com/cms/orifice-size-calculator
[42] KUBÁTOVÁ, Hana and Miroslava ZICHOVÁ. *Seminář k novele zákona č. 281/2002 Sb. a novele jeho prováděcí vyhlášky* [online]. 2017 [accessed. 2022-04-06]. Available at: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/zakaz-zbrani/Prezentace_SUJB_seminar_verze_pro_drzitele_povoleni_final.pdf
[43] *Incidence* [online]. no date [accessed. 2022-04-06]. Available at: https://www.linkos.cz/slovnicek/incidence/
[44] WANG, Zhien and Massimo MENENTI. Challenges and Opportunities in Lidar Remote Sensing. *Frontiers in Remote Sensing* [online]. 2021, **2**. ISSN 2673-6187. Available at: doi:10.3389/frsen.2021.641723
[45] *extinkce* [online]. no date [accessed. 2022-04-06]. Available at: https://slovnik-cizich-slov.abz.cz/web.php/slovo/extinkce
[46] VOKURKA MARTIN and HUGO JAN. *Velký lékařský slovník*. 10th ed. Praha: Jessenius, 2015. ISBN 978-80-7345-456-2.
[47] PĚŠŤOVÁ ZUZANA. Znečištění ovzduší – co to je a jak vzniká? *Meteopress* [online]. 2019 [accessed. 2022-04-11]. Available at: https://www.meteopress.cz/vysvetleni/znecisteni-ovzdusi-co-to-je-a-jak-vznika/

[48] NASA. LIDAR LEVEL 1 BROWSE IMAGES - 2022-01-03 00:24:22Z - SECTION 1. *NASA* [online]. 2022 [accessed. 2022-05-05]. Available at: https://www-calipso.larc.nasa.gov/products/lidar/browse_images/show_v411_detail.php?s=production&v=V4-11&browse_date=2022-01-03&orbit_time=00-24-22&page=1&granule_name=CAL_LID_L1-Standard-V4-11.2022-01-03T00-24-22ZN.hdf

[49] KUBESA PETR, HORÁK JIŘÍ, KRPEC KAMIL and HOPAN FRANTIŠEK. Emise prachu z malých spalovacích zařízení na tuhá paliva a metody jejich stanovení. *Tzbinfo* [online]. 2013 [accessed. 2022-04-11]. Available at: https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-pevnymi-palivy/9536-emise-prachu-z-malych-spalovacich-zarizeni-na-tuha-paliva-a-metody-jejich-stanoveni

[50] VIKRAM RAO. *Particulates Matter* [online]. B.m.: Elsevier, 2021. ISBN 9780128169049. Available at: doi:10.1016/C2018-0-01232-3

SEZNAM PŘÍLOH

1. Výkres prvního stupně
2. Výkres druhého stupně
3. Výkres třetího stupně
4. Výkres čtvrtého stupně
5. Výkres pátého stupně
6. Výkres šestého stupně
7. Výkres podložky
8. Výkres spodního dílu
9. Výkres horního dílu
10. Výkres redukčního kroužku
11. Výkres celého impaktoru
12. Seznam položek