



Výukový program:
Environmentální vzdělávání

Modul 5: Ochrana ovzduší

autor:

doc. Ing. Jozef Mačala, CSc.
Ing. Vladimír Smrž, Ph.D.

recenzent:

prof. Ing. František Šiška, DrSc.

redakce:

Mgr. Milada Rolčíková

5 Ochrana ovzduší

5.1 Atmosféra a její charakteristika

5.1.1 Základní složení a zvrstvení atmosféry

Atmosféra tvoří vnější sférický plynný obal planety Země, který se vytvářel současně s jejím vývojem od počátku vzniku sluneční soustavy. *Zemská atmosféra* vytváří hraniční vrstvu biosféry vzhledem ke kosmickému prostoru, svou strukturou a svými fyzikálně-chemickými vlastnostmi na jedné straně podmiňuje intenzitu a spektrální charakteristiky slunečního záření (energie) dopadajícího na povrch suchozemských a vodních ekosystémů, na druhé straně absorpce určité části slunečního záření některými plyny obsaženými v atmosféře je hnacím motorem pohybu obrovských vzdušných mas, který má za následek neustálou změnu meteorologických parametrů, jež nazýváme počasím (posuzováno v dlouhodobějším měřítku je nazýváme klimatem).

Horní hranici atmosféry je velmi obtížné stanovit, protože existuje kontinuita (spojitý pokles) mezi hustotou vzduchu při zemském povrchu a interplanetárním vzduchoprázdnem.

V této souvislosti je třeba dodat, že existence vhodné atmosféry není pro planety sluneční soustavy žádnou samozřejmostí, jak můžeme vidět např. u našeho souputníka Měsíce, ale je to důsledek souhry mnoha šťastných okolností. V případě planety Země je touto šťastnou okolností především kovové jádro planety, které svojí rotací umožňuje existenci dostatečně silného geomagnetického pole, které chrání atmosféru před ničivou energií tzv. slunečního větru neboli toku elektricky nabitých částic ze Slunce, který během vývoje sluneční soustavy „odfoukl“ atmosféru všem blízkým planetám, jež takovou ochranu nemají.

5.1.1.1 Chemické složení atmosféry

Suchý a čistý vzduch je směsicí dvou hlavních složek – dusíku (78,08 %) a kyslíku (20,95 %); dále pak vzduch obsahuje 0,93 % argonu a cca 0,03 % oxidu uhličitého. Zbývajících 0,01 % jsou stopové plynné složky (hlavně vzácné plyny – He, Ne, Kr, Xe). Uvažujeme-li složení reálného vzduchu, pak se podíl složek mění s obsahem vodní páry. Velmi proměnlivé může být množství látek znečišťujících ovzduší. Při studiu znečištění ovzduší (z hlediska posuzování dynamiky změn chemického složení) je důležitým ukazatelem *střední doba setrvání molekuly plynu v atmosféře*.

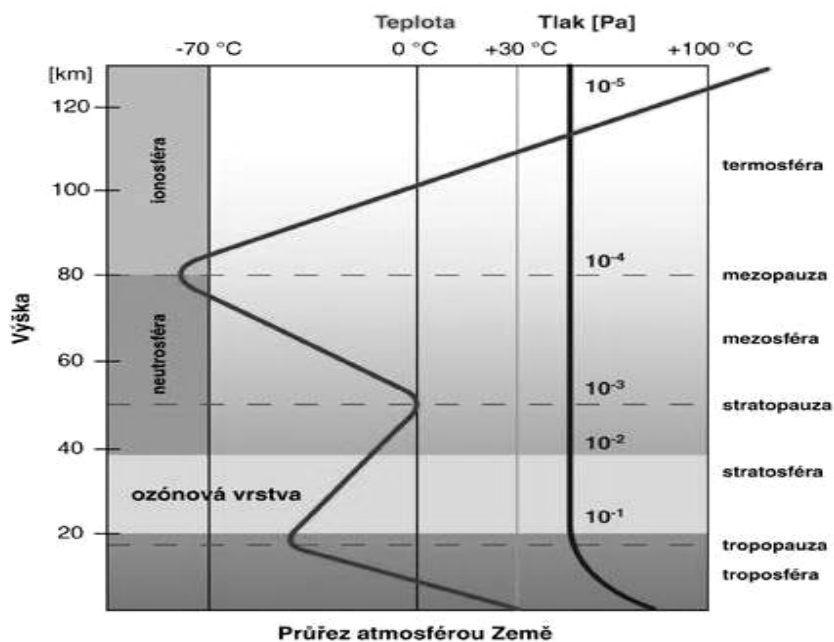
5.1.1.2 Fyzikální zvrstvení atmosféry

Atmosféra se skládá z několika plynných (kvazi) sférických vrstev, jejichž hustota směrem od zemského povrchu klesá (následkem stlačitelnosti plynného média v důsledku tíhové síly), což se projevuje na poklesu barometrického tlaku atmosféry s výškou. Pokud na povrchu Země barometrický tlak dosahuje průměrně 1013,25 hPa, ve výšce 100 km jeho hodnota činí jen 0,1 Pa.

Celková hmotnost atmosféry je odhadována na $5,137 \cdot 10^{18}$ kg, celkový obsah vodní páry v atmosféře je $1,24 \cdot 10^{16}$ kg, průměrný obsah vodní páry je tedy 2,34 g v jednom kg vzduchu.

Komplex pozemských a kosmických činitelů určuje jistý stav dynamické rovnováhy, která se projevuje především v charakteristickém vertikálním zvrstvení. V roce 1961 přijala

Mezinárodní komise pro aerologii konvenci o vertikální struktuře atmosféry podle průběhu teploty s výškou a rozdělila atmosféru na následující vrstvy: *Troposféru*, *Stratosféru*, *Mezosféru* a *Termosféru* (viz. obr. 5.1.).



Obr. 5.1 Průběh teploty a tlaku atmosféře závislosti na výšce

- *Troposféra*

Je to nejspodnější vrstva atmosféry sahající od hladiny moře průměrně do výšky 12 km, v důsledku rotace Země a dynamice planetární cirkulace je tato sféra zploštěná tak, že v oblasti rovníku dosahuje výšky cca 18 km, zatímco na pólech jen cca 7 km. Je to nejhustější sféra atmosféry, celkově obsahuje asi $\frac{3}{4}$ její hmotnosti. Troposféra je z hlediska znečišťování ovzduší nejzranitelnější vrstva atmosféry, protože do ní pronikají znečišťující látky všech skupenství (emise) jak z přirozených, tak v současnosti stále více z antropogenních (lidskou činností podmíněných) zdrojů a je v přímém kontaktu s biosférou na zemském povrchu. Teplota v troposféře směrem od zemského povrchu klesá až na cca $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, tento trend však nemusí platit v přízemní vrstvě do cca 2 km nad povrchem, kde dochází k intenzivní výměně tepla se zemským povrchem během denního a ročního chodu teploty.

- *Stratosféra*

Stratosféra dosahuje průměrné výšky kolem 50 km s převažujícím laminárním prouděním, teplota v ní s výškou narůstá až k hodnotě cca $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ v důsledku absorpce části ultrafialového spektra slunečního záření molekulami kyslíku a ozónu, který se v této vrstvě vytváří z kyslíku právě v důsledku uvedené absorpce.

Ve stratosféře se vzduch nachází v pravidelných horizontálních vrstvách, protože inverzní teplotní zvrstvení silně tlumí vertikální pohyby vzduchových mas. Vertikální výměna v stratosféře je tedy velmi pomalá a znečišťující látky, které se do ní dostanou (různé aerosoly, ozónovou vrstvu poškozující plyny, atd.), v ní setrvávají velmi dlouho.

- *Mezoféra*

Mezoféra sahá do výšky kolem 80 km, teplota v ní opět klesá z cca 0 °C na úrovni stratopauzy (tenké vrstvy oddělující stratosféru od mezoféry), až na minus 90 °C na své horní hranici.

- *Termosféra*

Termosféra je poslední sférou atmosféry a plynule přechází v kosmické „vakuum“ bez jasné hranice (přibližně ve výšce 800 – 1000 km). V termosféře teplota opět stoupá v důsledku zvyšující se absorpce energeticky nejbohatších spekter slunečního záření již ničím nechráněné vnější vrstvy atmosféry, aby dosáhla téměř 1000 °C na její horní hranici. Tímto procesem je zemský povrch před tímto spektrem slunečního záření chráněn.

5.1.2 Fyzikální procesy v atmosféře

5.1.2.1 Globální cirkulace atmosféry

Atmosférické teplo

Země je vzhledem ke svému tvaru a v důsledku svých pohybů nerovnoměrně ozařována slunečním zářením, zemský povrch odrazí nebo vyzáří 42% dopadajícího záření a zbývajících 58% je pohlceno atmosférou a zemským povrchem včetně hydrosféry.

Proudění v atmosféře

Zemský povrch se ohřívá nerovnoměrně v důsledku následujících důvodů:

- různé albedo (poměr mezi přijatým a odraženým zářením, např. sníh versus asfalt);
- různé vedení tepla do hloubky (např. oceán versus pevnina);
- různý úhel dopadu slunečních paprsků daný zeměpisnou šířkou, orografií terénu a denní dobou.

V důsledku nerovnoměrného zahřívání zemského povrchu dochází k nerovnoměrnému zahřívání přilehlých vrstev atmosféry. Objemy vzduchu, které jsou teplejší než okolní vzduch, mají tendenci stoupat v důsledku snížení měrné hmotnosti a vzniku vztlakové síly rovnající se rozdílu hustot, a tedy i tíhových sil mezi teplejší a studenější vzdušnou masou (jako u horkovzdušného balónu).

Tyto stoupavé proudy musí být kompenzovány proudy klesavými, protože se v atmosféře vyskytuje v čase proměnlivý počet různě umístěných a mocných horizontálních vrstev s vlastnostmi, které nepodporují vertikální pohyby vzdušných mas (zjednodušeně řečeno inverzní vrstvy – viz dále) a které nutí vertikální pohyby k zacyklení. Stoupavé a klesavé pohyby mají svými dynamickými účinky vliv na vznik nehomogenního (barostatického) tlakového pole na zemském povrchu, kdy stoupající vzdušné masy pod sebou vytváří oblasti se sníženým barostatickým tlakem (tlakové níže), a naopak, klesající vzdušné masy pod sebou vytváří oblasti se zvýšeným barostatickým tlakem (tlakové výše).

Tyto tlakové rozdíly nejsou ve své absolutní hodnotě nijak významné, zatímco standardní barostatický tlak na hladině moře je 1013,25 hPa, typický tlak v oblasti tlakové níže činí cca 1000 hPa a typický tlak v oblasti tlakové výše činí cca 1025 hPa. Tyto nevýznamné tlakové rozdíly však vytváří v horizontální rovině dostatečné tlakové rozdíly (horizontální tlakové gradienty), které jsou schopny dát do pohybu obrovské vzdušné masy

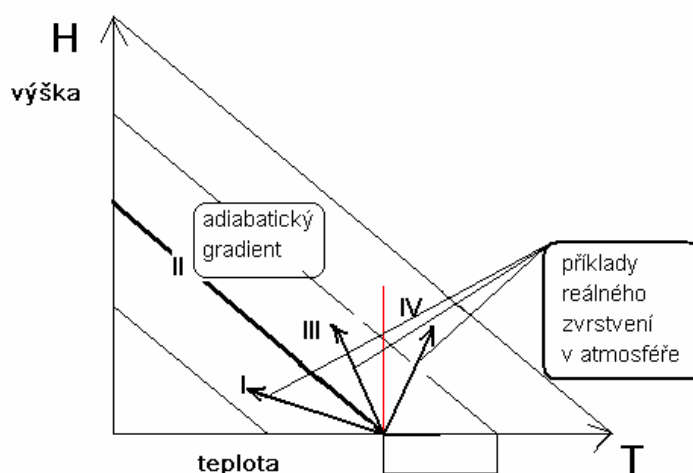
na velké vzdálenosti. Aby to vše bylo ještě složitější, Země je v důsledku rotace rotační soustavou, kde na pohybující se hmotu působí Coriolisova síla, která stáčí pohybující se vzdušné masy na severní polokouli doprava, na jižní polokouli doleva. Výsledkem těchto sil je, že kolem uvedených tlakových útvarů se vytváří rotační proudění, kdy vzduch vytékající ze středu tlakové výše získává spirálovitou pravotočivou rotaci a vzduch vtékající do tlakové níže získává spirálovitou levotočivou rotaci (platí pro severní polokouli, na jižní polokouli je to obráceně).

Vzniklé cyklické proudění popisujeme v horizontální rovině jako vítr (přízemní nebo výškový) a ve vertikální rovině jako stoupavé a klesavé proudy. V důsledku kulovitého tvaru planety a výše popsaných jevů existuje nad celou planetou velmi komplikovaný cirkulační systém, který se skládá ve vertikálním řezu ze tří cyklických buněk (v rámci troposféry), které ve třídimenziálním prostoru vytváří nad každou hemisférou tři „pneumatiky“ (se zmenšujícím se průměrem směrem od rovníku k pólům ve smyslu průměru rovnoběžek), které vůči sobě neustále rotují jako ozubená kola v převodovém systému. Tato cirkulace vytváří základní klimatické pásy na zemském povrchu, které rozhodují o typu suchozemského ekosystému (tropický, subtropický, mírný a polární).

5.1.2.2 Stabilita a labilita atmosféry

Stabilita a labilita atmosféry je fyzikální vlastnost určité vrstvy atmosféry, která závisí na rozdílu průběhu teploty s výškou mezi adiabatickým teplotním gradientem a aktuálním teplotním zvrstvením dané vrstvy

Adiabatický teplotní gradient je závislost změny teploty stoupajících nebo klesajících vzdušných mas v důsledku expanze nebo komprese plynu (viz termodynamika plynu) v důsledku poklesu atmosférického tlaku s výškou. Jeho hodnota činí $1,98\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ v případě, že plyn neobsahuje vodu, a $1,65\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ v případě, že vodu obsahuje. *Adiabatický děj* je děj, při kterém neprobíhá výměna (měnícího se) tepla stoupající nebo klesající vzdušné masy s okolím (tyto děje v praxi probíhají uvnitř velkých objemů stoupajících nebo klesajících vzdušných mas, v povrchových vrstvách ke vzájemnému promíchávání s okolní vzdušnou masou, a tudíž k výměně tepla samozřejmě dochází).



Obr. 5.2 T-H diagram adiabatického a reálného zvrstvení v atmosféře

Z T – H diagramu na obr. 5.2. , který popsanou situaci znázorňuje, můžeme vyčíst, že mohou nastat čtyři odlišné situace reálného teplotního zvrstvení atmosféry (mění se především v důsledku výměny tepla mezi atmosférou a zemským povrchem) vůči sklonu adiabatického teplotního gradientu (pro zemskou atmosféru neměnný), a to:

- 1) reálná teplota v atmosféře klesá rychleji než u adiabatického gradientu;
- 2) reálná teplota v atmosféře klesá stejně jako u adiabatického gradientu;
- 3) reálná teplota v atmosféře klesá pomaleji než u adiabatického gradientu;
- 4) reálná teplota v atmosféře roste.

Vzhledem k tomu, že teplota stoupajících vzdušných mas klesá podle závislosti adiabatického teplotního gradientu, jejich ochota ke stoupání po udělení impulsu ke stoupání (přehřátí, orografie terénu při horizontálních přesunech vzdušných mas) bude závislá na neustálém porovnávání vzájemných teplot, kdy na základě výše uvedených vzájemných porovnání nastanou následující situace:

- 1) stoupající vzdušná masa bude pořád teplejší než okolní atmosféra, a tudíž jsou podporovány vertikální pohyby vzdušných mas – *reálné zvrstvení je labilní*;
- 2) stoupající vzdušná masa stejně teplá jako okolní atmosféra (setkáváme se s ní málokdy a pouze krátkodobě), a tudíž nejsou podporovány ale ani tlumeny vertikální pohyby vzdušných mas - *reálné zvrstvení je indiferentní*;
- 3) stoupající vzdušná masa bude stále chladnější než okolní atmosféra, a tudíž budou tlumeny vertikální pohyby vzdušných mas - *reálné zvrstvení je stabilní*;
- 4) teplota okolní atmosféry s výškou dokonce roste, a tudíž budou extrémně tlumeny vertikální pohyby vzdušných mas - *reálné zvrstvení je extrémně stabilní, pro tento případ se vžil pojem (teplotní) inverze*.

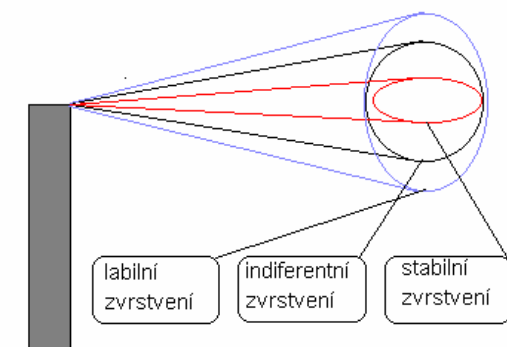
Důsledky výše popsaných jevů jsou pro znečišťování přízemní troposféry LZO značné. V případě *labilního zvrstvení* dochází k dobrému rozptylu do atmosféry emitovaných LZO, kdy na úkor znečištění velkých objemů vzdušných mas se udržují přízemní koncentrace LZO v přijatelných mezích. V případě *stabilního*, nebo dokonce *extrémně stabilního (inverzního)* zvrstvení je ovšem situace opačná, kdy na úkor znečištění výrazně menších objemů vzduchu (především směrem do výšky), dochází k extrémnímu zvýšení přízemních koncentrací LZO, především v blízkosti nízkých zdrojů.

Důsledky stabilního zvrstvení na velikost přízemních koncentrací LZO mají mnoho podob v závislosti na:

- poloze a mocnosti stabilní vrstvy (přízemní nebo výšková inverze);
- výšce zdroje LZO na zemském povrchem (v porovnání s polohou a mocnosti stabilní vrstvy);
- orografii terénu (především údolí a pánve obehnané pohořím, kde terén brání rozptylu LZO v horizontálním směru).

Vzhledem k typickým rozptylovým parametrům (molekulární difúze, mikroturbulence, přízemní nebo výškový vítr, stabilita atmosféry) se jako základní rozptylový obrazec z bodového zdroje používá tzv. *rozptylový kužel*. Tento kužel je deformován především ve vertikální ose, ovládané stabilitou nebo labilitou dané vrstvy (*viz obr. 5.3.*). Samostatnou kapitolu tvoří přízemní zdroje, u kterých pomyslně chybí polovina zmíněného kužele (který

se nachází pod zemským povrchem), z čehož zjednodušeně plynou dvojnásobné koncentrace ve stejné vzdálenosti od zdroje oproti výškovému zdroji (komínu).



Obr. 5.3 Deformace idealizovaného rozptylového kužele v závislosti na stabilitě atmosféry

5.1.3 Úlohy atmosféry v systému biosféry

5.1.3.1 Ochrana před ionizujícím zářením

Jedním z nejdůležitějších faktorů, který ovlivňuje život na Zemi, je sluneční záření, které se vyskytuje v určitém rozsahu vlnových délek. Součástí těchto vlnových délek je i ultrafialové záření typu UV_B a UV_C , které má ionizující energii, a pokud by dopadalo na zemský povrch v původní intenzitě, znemožňovalo by existenci suchozemských ekosystémů.

UV_C záření je absorbováno prostou existencí dostatečně hustého plynu v horních částech atmosféry. Během geologického vývoje planety a jejích sfér došlo ke změně složení atmosféry ve prospěch molekulárního kyslíku po současných cca 21 %, který svými absorpčními vlastnostmi spouští fotochemickou reakci ve stratosféře, při které dochází k absorpci části spektra UV_B záření a jeho transformaci v teplo. Následkem této absorpce je rozpad molekul kyslíku a následný vznik molekul ozónu, který svými absorpčními spektry navazuje na kyslík a absorbuje zbývající spektrum ionizujícího UV_B záření. Negativní ovlivňování této funkce atmosféry je známo pod pojmem „ozónová díra“.

5.1.3.2 Termoregulace zemského povrchu

Množství energie, které přichází ze Slunce, je dáno tzv. sluneční konstantou, což je takové množství energie, které dopadá vně zemské atmosféry na jednotku plochy při střední vzdálenosti Země od Slunce, a jehož hodnota činí 1368 W/m^2 .

Na vlastní povrch Země však dopadá pouze asi 1/4 této energie, část je odražena od atmosféry i od povrchu Země, část je v atmosféře pohlcena, pouze několik setin procenta sluneční energie dopadající na povrch Země je využito při fotosyntéze, která je základním procesem pro tvorbu biomasy, jíž vděčí drtivá většina živých organismů na Zemi za svoji existenci. Vzhledem ke kulovitému tvaru planety je zemský povrch ozařován slunečními paprsky nerovnoměrně, kdy většina energie směřuje do rovníkové oblasti ozářené části planety. Tato nerovnoměrnost je částečně kompenzována optimální rotací planety a sklonem zemské osy, který způsobuje rozšíření oblasti, ve které dopadají sluneční paprsky kolmo (tedy

s max. plošnou hustotou) v rozsahu $\pm 23^\circ$ severní a jižní zeměpisné šířky v průběhu roční periody. Rotace planety v rozsahu cca 24 hod. je vzhledem k příjmu energie optimální, protože doba přímého osvětlení a zástiny podstatné části zemského povrchu nedovoluje jeho přílišné prohřátí ani podchlazení a umožňuje existenci suchozemských ekosystémů v současné podobě (je možné porovnat např. s Měsícem, který se nachází ve stejné vzdálenosti od Slunce, ovšem doba rotace 28 dnů a neexistence atmosféry schopné absorbovat ionizující složku záření způsobují teplotní rozdíly mezi osvětlenou a neosvětlenou částí povrchu v rovníkové oblasti v rozsahu cca 200°C).

Energie dopadající na zemský povrch je buď odražena (v závislosti na albedu zemského povrchu), nebo je zemským povrchem absorbována a změněna v teplo. Toto teplo je následně částečně použito pro pohyb hydrosféry (koloběh vody a oceánské proudy) a atmosféry (globální cirkulace atmosféry) a zároveň je postupně vyzařováno ve formě infračerveného záření zpět do vesmíru. Část tohoto infračerveného záření je opět pohlcena infračerveně aktivními plyny, obsaženými v atmosféře, a zpomaluje tak tempo ochlazování zemského povrchu (*skleníkový efekt*).

Všechny výše uvedené děje přispívají k tzv. termoregulaci zemského povrchu, která v případě atmosféry zahrnuje především:

- rozvod tepla z rovníkových oblastí do vyšších zeměpisných šířek pomocí globální cirkulace atmosféry (společně s oceánskou cirkulací);
- snižování rozdílu teplot zemského povrchu v rámci dne i roku v důsledku absorpce infračerveného záření zemského povrchu pomocí skleníkových plynů (zvyšování průměrné denní a roční teploty).

Negativní ovlivňování této funkce atmosféry je známo jako „dodatečný skleníkový efekt“ nebo „globální oteplování“ a bude o něm pojednáno v kap. 2.3.3.

5.1.3.3 Zabezpečování biochemických cyklů

Tato funkce atmosféry se dá zjednodušeně nazvat zabezpečováním „dýchatelnosti“ atmosféry pro všechny živé organismy, tzn. udržování takového složení atmosféry, na které jsou živé organismy adaptovány. Atmosféra tuto funkci plní optimálně tehdy, obsahuje-li optimální koncentrace základních biogenních prvků v plynné fázi (např. O_2 nebo CO_2), a zároveň neobsahuje pro organismy škodlivé látky v nebezpečných koncentracích (např. kyselé plyny, fotooxidanty, tuhé aerosoly, atd.). Všechny klasické představy o znečišťování atmosféry jdou na vrub především poškozování této funkce.

5.2 Látky znečišťující ovzduší (LZO)

Pod pojmem látky znečišťující ovzduší budeme chápat všechny látky emitované do atmosféry, které v kombinaci potenciální škodlivosti a koncentrace poškozují některou a nebo všechny funkce atmosféry pro optimální fungování biosféry.

5.2.1 Rozdělení LZO

LZO můžeme rozdělit podle skupenství, místa definování, chemického složení nebo způsobu vzniku.

- *Rozdělení LZO podle skupenství*

Podle skupenství můžeme LZO rozdělit na plynné, kapalné a tuhé. Toto dělení LZO je velmi důležité především z důvodu odlišných principů pro jejich stanovování (měření) a dále odlišných principů pro jejich odlučování. Zatímco představa plynných LZO není problematická, u kapalných a tuhých fází LZO je třeba připomenout, že máme v tomto případě na mysli především formu dvou- nebo třífázového diskrétně – disperzního systému, který se běžně nazývá *aerosol*.

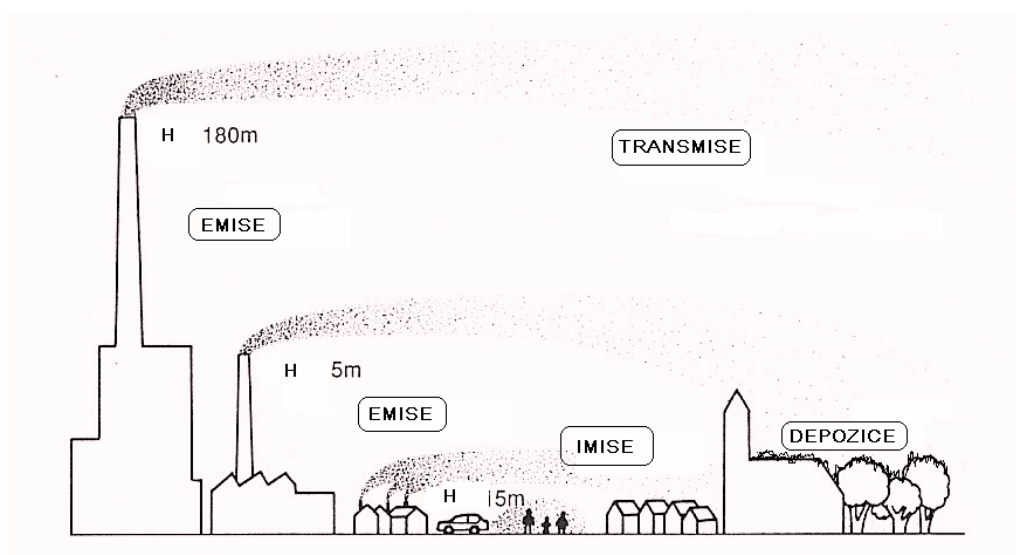
Atmosférický aerosol je takový systém, kde vzduch (atmosféra) je disperzním prostředím a tuhé/nebo kapalné částice dispergovanou látkou, přičemž velikostní distribuce těchto částic se nachází v intervalu mezi 10^{-4} a 10^1 μm , což znamená, že i v klidném ovzduší mají zanedbatelnou pádovou rychlost a tvoří celkem stabilní systém s mnoha níže uvedenými nebezpečnými vlastnostmi:

- velký specifický povrch (včetně obvyklé povrchové porosity) částic, který může sloužit k následujícím negativním procesům v biosféře:
 - chemickým reakcím emisí v atmosféře, které na reakčním povrchu částic aerosolu probíhají rychleji a účinněji než v plynném prostředí;
 - kondenzaci primárních emisí nebo metabolitů z transmisí na aerosolu jako kondenzačních jaderkách (kyselé srážky, sírany, aromatické nebo halogenované uhlovodíky atd.);
 - transportu látek znečišťujících ovzduší adsorbovaných na specifickém povrchu aerosolu ve velkých koncentracích na velké vzdálenosti, k čemuž by v jejich plynném stadiu v tak velkém rozsahu nedocházelo;
 - zvyšuje nebezpečí exploze hořlavých složek aerosolů v důsledku urychlení vzniklého oxidačního procesu na nabízeném specifickém povrchu aerosolu;
- značná koncentrace těžkých kovů právě v nejjemnějších frakcích tuhých aerosolů vznikajících při spalování fosilních paliv;
- schopnost částic o velikosti 0,3 – 7 μm (tzv. inhalabilní frakce) pronikat až do alveolárního traktu plic, kde se částice mohou zachytit a v kombinaci s adsorbovanými nebezpečnými látkami způsobovat jejich trvalé poškození (např. silikóza nebo karcinom plic);
- schopnost měnit optické vlastnosti atmosféry prostřednictvím rozptylu slunečního záření (např. síranový aerosol jako metabolit emitovaných oxidů síry vznášející se ve střední vrstvě troposféry), což může mít negativní vliv na tepelně-radiační bilanci biosféry, nebo též
- velká elektrostatická přilnavost jemných tuhých frakcí, způsobující škody jak na neživých (spolu s kyselými srážkami např. přispívá ke zvýšené korozi kovů), tak živých (pokrývání povrchu listů rostlin) objektech biosféry.

Podle způsobu, jakým vznikají, rozdělujeme aerosoly na:

- disperzní, vzniklé zdrobňováním tuhých látek (prachové aerosoly);
- kondenzační, vzniklé kondenzací vodní páry nebo produktů tepelných procesů (mlhy, dýmy).

- *Rozdělení LZO podle místa jejich definování*
Z hlediska místa definování rozdělujeme LZO na emise, transmisi, imisi a depozice (viz. obr. 5.4.).
 - Emisí označujeme LZO v místě, kde opouští proces (zdroj), který ji generuje a rozptyluje se do prostředí (atmosféry).
 - Transmisí označujeme LZO po dobu, kdy se nachází v atmosféře, prodělává různé fyzikální a chemické přeměny, ale nepůsobí na objekty biosféry (zjednodušeně na zemský povrch).
 - Imisí začneme LZO označovat ve chvíli, kdy začne negativně ovlivňovat zemský povrch ve formě rozptýlené v atmosféře (vztažnou jednotkou koncentrace je normálový metr krychlový atmosféry)
 - Depozicí označíme LZO ve chvíli, kdy dojde k jejímu setrvačnému nebo gravitačnímu odloučení (depozici) z atmosféry na zemský povrch (vztažnou jednotkou koncentrace je metr čtvereční zemského povrchu násobený časem depozice).



Obr. 5.4 Schéma LZO v různých místech stádiích vývoje

- *Rozdělení LZO podle chemického složení*
Problematika rozdělení LZO podle chemického složení je složitá v tom, že dnes existují tisíce sloučenin, které je možno takto označit, které jsou důsledkem jak primárních (ve zdroji), tak sekundárních (v atmosféře) procesů. Různé doby existence a technologické možnosti detekce těchto látek způsobují, že o jejich celkovém počtu, chemickém složení, koncentracích a účincích na biosféru nemáme dostatečně přesnou představu.
Rozsah této publikace neumožňuje uvést všechny podstatné LZO tak podrobně, aby nedošlo k uvedení jedněch na úkor druhých, LZO je možné v rámci tohoto kritéria dělit např. na:
 - skupiny látek majících společný prvek, např. LZO na bázi síry (SO_x , H_2S , aj.), LZO na bázi dusíku (NO_x , peroxidusičnany, aj.), LZO na bázi uhlíku (CO_x ,

značné množství organických uhlovodíků jako PA, aj.), nebo LZO na bázi halogenovaných uhlovodíků (uhlovodíků, kde je část vodíkových atomů nahrazena atomy halogenů – především chlórem, fluorem nebo bromem), které jsou jedněmi z nejtoxičtějších LZO (PCB, PCDD/F, aj.);

- skupiny látek, mající podobné negativní účinky na biosféru, jsou uvedeny v kap. 5.2.3.
- *Rozdělení LZO podle způsobu vzniku*

Látky znečišťující ovzduší lze rozdělit do dvou skupin:

- přirozeného původu;
- antropogenního původu.

LZO přirozeného původu provázejí atmosféru od počátku jejího formování (emise při sopečné činnosti při erozi půd, při lesních a stepních požárech, působení pylu stromů a rostlin, kosmického prachu apod.)

Při vulkanické činnosti se do atmosféry dostávají emise obrovského množství popela, prachu a plynů, což může způsobit katastrofu, způsobující smrt velkého počtu lidí a ostatních organismů.

LZO antropogenního původu mají často podobný charakter jako přirozené LZO, avšak počty jejich druhů dosahují řádu 10^6 a denně vznikají nové díky novým technologiím. Nejzávažnější příčinou přírůstku antropogenního znečišťování atmosféry je zvýšení spotřeby energie na obyvatele, tj. energie získávané doposud převážně spalováním fosilních paliv.

K významným zdrojům antropogenního znečišťování atmosféry patří především:

- termické procesy jako
 - spalování (fosilní paliva, odpady, biomasa);
 - metalurgie, koksárenství;
 - výroba stavebních hmot (cement, vápno, aj.);
- chemické procesy (chemický, farmaceutický a potravinářský průmysl);
- těžební a úpravnické procesy (např. těžba fosilních paliv a nerostných surovin, rozpojování hornin).

5.2.2 Chemické a fotochemické přeměny LZO v atmosféře

Látky znečišťující ovzduší se do atmosféry dostávají ze zdroje znečištění jako primární LZO. Různými chemickými a fotochemickými reakcemi se z nich stávají sekundární LZO. Samotná atmosféra je jeden velký chemický reaktor, na který působí mnoho vlivů a ve kterém se odehrávají velmi komplikované procesy. Mezi spolupůsobící faktory patří veškeré meteorologické děje jako proudění vzduchu, sluneční záření, stabilitní podmínky, vlhkost vzduchu, tlak, teplota aj.

V rámci procesu vzniku sekundárních LZO se uplatňují jak chemické (exotermní), tak fotochemické (endotermní) typy reakcí. Zatímco v případě exotermních reakcí se původní sloučenina zbavuje přebytečné energie (oxiduje do nejstabilnější formy), v případě

endotermních reakcí je sekundárně vzniklým sloučeninám dodána energie slunečního záření (sloučenina se redukuje).

Vzájemná kombinace uvedených reakcí dává vzniknout sekundárním LZO, které jsou v mnoha případech nebezpečnější (toxičtější), než primární LZO, včetně tzv. volných radikálů, které vyvolávají další etapu reakcí v atmosféře.

Radikály jsou velmi reaktivní látky schopné regenerace. Jedná se o zbytky původních sloučenin, které podlely fotolýze při interakci s UV zářením. Radikály jsou schopny reagovat mezi sebou nebo s jinými sloučeninami za vzniku jiných radikálů. Mezi nejběžnější radikály patří: hydroxyl (OH•), alkyl (R•), peroxyalkyl (RO₂•), aryl (RCO•), a alkoxy (RO•).

Protože největším znečišťovatelem ovzduší jsou spalovací procesy, uvedeme si příklad vzniku primárních LZO ze spalování běžných fosilních paliv (uhlí) a poté jejich přeměnu na sekundární LZO (příklad je pouze informativní a zjednodušený).

Vznik primárních a sekundárních LZO na příkladu spalování fosilního paliva (uhlí)

Palivo (Uhlovodíky + příměsi) + Spalovací vzduch(atmosféra) → Výsledné produkty

C_xH_y (S, N, Cl, ...) + **O₂ (N₂)** →

→ CO₂ + H₂O ... produkty dokonalé oxidace čistých uhlovodíků
 → CO + C_xH_y (PAU) ... produkty nedokonalé oxidace čistých uhlovodíků
 → SO_x + NO_x + HCl ... produkty vzniklé příměsemi v uhlovodících
 → NO_x ... vysokoteplotní NO_x (slučování atm. O₂ a N₂)

Primární LZO	Sekundární LZO (chemické)	Sekundární LZO (fotochemické)
CO ₂ + H ₂ O →	... H ₂ CO ₃ vznik kyselých	O₃, H_xO_y vznik fotooxidantů
SO _x + H ₂ O →	... H ₂ SO ₄ vodních srážek	OH·, HO₂· (oxidační, los
NO _x + H ₂ O →	... HNO ₃ (kyselý „Londýnský“	PAN, angeleský“ smog)
HCl + H ₂ O →	... HCl smog)	Radikály

5.2.3 Škodlivé účinky LZO na biosféru

Nejzranitelnějšími sférami atmosféry vůči emisím LZO jsou troposféra a stratosféra, které představují více než 90 % hmotnosti celého vzdušného obalu.

Škodlivé účinky LZO je možno rozdělit na:

- škodlivé účinky na živou přírodu (rostliny a mikroorganismy, živočichy);
- škodlivé účinky na neživou přírodu (především antropogenního původu);
- škodlivé účinky na tepelnou a radiační bilanci povrchu planety (vlivy na zemské klima).

Vzhledem k rozsahu této publikace uvádím pouze základní škodlivé účinky dále uvedených, vybraných skupin LZO:

- *Kyselé plyny*

Kyselé plyny jsou primární plynné LZO, které v atmosféře spolu s vodou vytváří kyselé vodní srážky (především plyny jako SO_x, NO_x, HCl, CO₂, atd.).

- *Fotooxidanty*

Fotooxidanty jsou sekundární plynné nebo kapalné LZO, které vznikají v atmosféře fotochemickými reakcemi (především O₃, H_xO_y, OH[·], HO₂[·], HCHO, HCOOH, PAN atd.).

- *Kyselé vodní srážky*

Kyselými vodními srážkami nazýváme *kyselou mlhu*, která je tvořena aerosolem silně kyselého vodního roztoku, který vzniká a dlouhodobě setrvává v přízemní troposféře, a *kyselý déšť*, který se tvoří ve střední troposféře, tím pádem vodní roztok není příliš kyselý a příliš nepoškozuje nadzemní objekty, při dlouhodobém působení však mění pH faktor půdního prostředí se všemi důsledky na chemismus půd a na existenci půdních mikroorganismů.

- *Tuhý aerosol*

Nebezpečný tuhý aerosol je tvořen tuhými částicemi vyskytujícími se v inhalabilních velikostních frakcích (cca 0,3 – 0,7 μm). Ty mají nebezpečné povrchové vlastnosti (ostré nebo chemicky povrchově aktivní, jako např. částice SiO₂ nebo asbestu), nebo jsou nebezpečné svojí podstatou (především těžké kovy jako *kadmium*, *rtuť*, *olovo*, *nebo chrom*, dále sloučeniny na bázi uhlovodíků jako *PAU – polycyklické aromatické uhlovodíky*, *PCB – polychlorované bifenyly*, *nebo PCDD/F – polychlorované dibenzodioxiny/furany*).

Uvedené skupiny LZO se v přízemní atmosféře v případě dostatku zdrojů a stabilního (inverzního) zvrstvení silně koncentrují a vytváří tzv. *SMOG* (z anglického *smoke* – kouř + *fog* – mlha). Vzhledem k převažujícímu složení LZO rozeznáváme:

- *Kyselé smogy*

Jsou tvořeny převážně tuhým aerosolem, kyselými plyny a kyselou vodní mlhou (tzv. „londýnského“ typu, protože byly poprvé popsány v oblasti Londýna v důsledku mlhavého inverzního počasí a velké plošné koncentraci zdrojů spalujících sirnaté hnědé uhlí v důsledku válečného průmyslu).

- *Oxidační smogy*

Jsou tvořeny převážně tuhým aerosolem a fotooxidanty (tzv. „losangeleského“ typu, protože byly poprvé pozorovány v Los Angeles v důsledku častého slunečního „inverzního“ klimatu daného polohou tohoto města a silně se rozvíjejícího automobilismu a s ním spojených emisí NO_x a uhlovodíků).

5.2.3.1 Škodlivé účinky LZO na živou přírodu

Schopnost živých organismů odolávat koncentracím LZO závisí především na dvou faktorech:

- únosnosti zátěže pro daný organismus a schopnost tolerance v určitém rozmezí koncentrace LZO;
- adaptabilitě na změnu životního prostředí.

Účinky LZO na živou přírodu je možné vzhledem k odlišné fyziologii rozdělit na účinky na rostliny a mikroorganismy (v důsledku jejich silných symbiotických vazeb), různé typy LZO se podílí na různém typu poškození nadzemní a podzemní části rostliny, a na živočichy, u nichž je nejvíce postihován jejich dýchací trakt.

a) *Škodlivé účinky LZO na rostlinstvo a mikroorganismy*

U rostlin jsou na účinky LZO nejnáchylnější

- *fotosyntetické orgány* (listy, jehličí), v nichž v důsledku fotosyntézy probíhá intenzivní látková výměna napojená na atmosféru (výměna CO₂ a O₂) a rostlina s jejich pomocí nichž reguluje spotřebu vody potřebnou pro transport živin z kořenového systému,
- samotný *kořenový systém* (obsahující symbiotické kmény mikroorganismů), který se nachází v půdním prostředí, které je negativně ovlivňováno některými druhy LZO.

Základní škodlivé účinky vybraných skupin LZO jsou následující:

- *Kyselé plyny*

Kyselé plyny poškozují fotosyntetické orgány tím, že negativně ovlivňují látkovou výměnu při procesu fotosyntézy – snižují primární produkci biomasy, samotný SO₂ dokáže po čase znehybnit mechanismus otvírání a zavírání dýchacích průduchů v otevřené pozici, čímž rostlině brání v regulaci ztráty vody v suchém období.

- *Fotooxidanty*

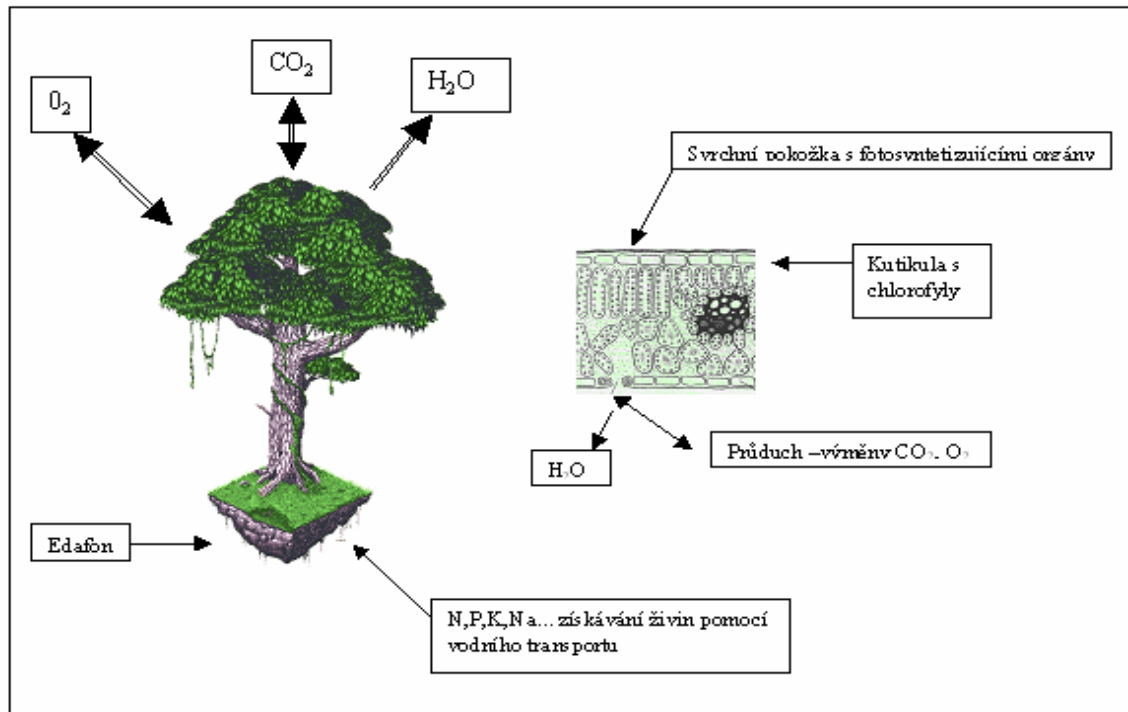
Fotooxidanty poškozují fotosyntetické orgány tím, že nemilosrdně oxidují tkáň, s nimiž přijdou do styku, tedy především nechráněné povrchové části listů nebo jehličí a vnitřek dýchacích průduchů, v případě silných koncentrací je ohrožena i část povrchu krytá voskovou vrstvou (kutikulou), která chrání nejhodnotnější část tohoto orgánu, a to fotosyntetizující buňky – chloroplasty. Výsledné poškození je ztráta funkčnosti části tohoto orgánu a vytvoření otvorů v ochranné vrstvě, kterou se do těchto orgánů mohou dostat patogenní mikroorganismy, jako jsou viry nebo některé druhy bakterií a plísní.

- *Kyselé vodní srážky*

Účinky kyselých vodních srážek je třeba rozdělit na účinky kyselých mlh, která poškozují svým chemickým („leptavým“) potenciálem povrch fotosyntetizujících orgánů rostlin podobně jako vysoké koncentrace fotooxidanty, což má za následek ztrátu tkání a možnost napadení patogenními mikroorganismy. Naproti tomu kyselá vodní srážka ve formě deště nadzemní orgány rostlin příliš nepoškozují, její negativní účinek tkví především v dlouhodobém působení na půdy, kde postupně klesající pH faktor (okyselení půd po vyčerpání jejich zásaditého potenciálu) způsobuje následující negativní procesy:

- *odumírání symbiotických mikroorganismů* nemajících dostatečnou toleranci vůči relativně rychle klesajícímu pH faktoru půdního prostředí;
- *vyplavování nadměrného množství živin* (prvků jako N, P, K, aj.) v důsledku zvýšené chemické agresivity půdního prostředí, které místní vegetace není schopná absorbovat a které bez užitku odchází podzemním vodním transportem (ochuzování půd o přirozené živiny),
- *vyplavování nadměrného množství iontů lehkých kovů* (součástí půdních minerálů, např. Al³⁺), které se stanou mobilní, svým toxickým potenciálem

pro mikroorganismy dále decimují jejich kmeny a současně jsou vodním transportem bioakumulovány přes buněčné membrány v kořenovém systému do rostlin, kde mohou po akumulaci v určitém orgánu vést k jeho růstovým deformacím a přispívat k zhoršování zdravotního stavu rostlin.



Obr. 5.5 Zjednodušená ukázka fyziologie rostliny v souvislosti s účinky LZO

- *Tuhý aerosol*

Tuhý aerosol ulpívá pomocí elektrostatických sil na všech objektech na zemském povrchu, tedy i na fotosyntetizujících orgánech, kde způsobuje následující negativní procesy:

- svojí přítomností na osvětlené straně listů a jehličí *stíní slunečnímu záření* a tím snižuje účinek fotosyntézy;
- navíc se v důsledku absorpce části tohoto záření zahřívá a *vystavuje povrch listu nadměrnému tepelnému zatížení*, které se opět negativně projeví na účinnosti fotosyntézy;
- *omezuje výměnu plynů* usazováním se v oblasti dýchacích průduchů;
- *těžké kovy, PAU, PCB, PCDD/F*, především jako součást polévatého prachu z termických procesů, sedimentují v blízkosti zdrojů, dostávají se do půd, odkud jsou bioakumulovány do rostlin, ve kterých působí toxicky, jedná-li se o kulturní (zemědělské) plodiny, pak dochází ke *kontaminaci potravních řetězců*.

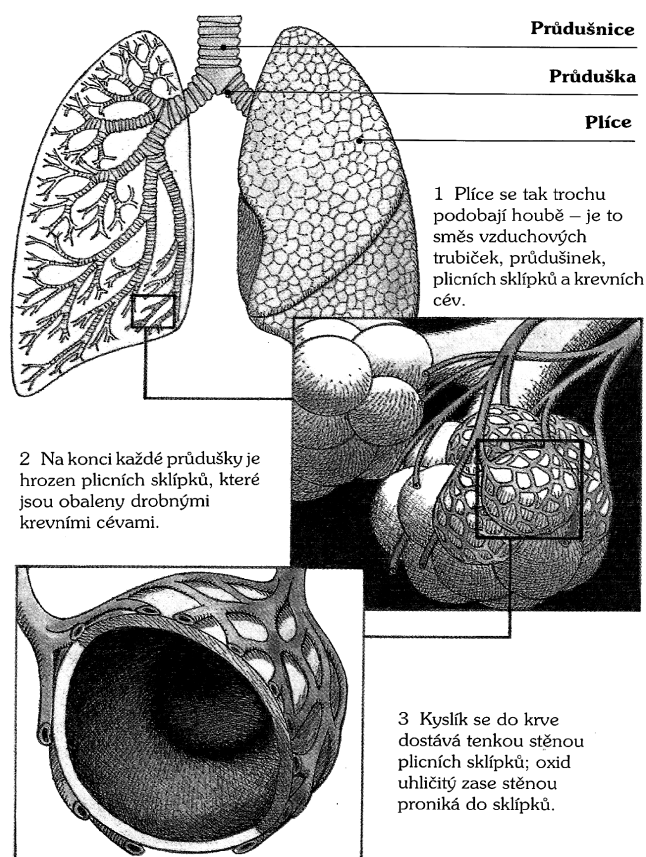
Vzhledem k tomu, že nejohroženějším nadzemním orgánem rostlin jsou fotosyntetizující orgány, je zřejmé, že mnohem ohroženější skupinou jsou jehličnaté rostliny, které jehličí na zimu neshazují, a tudíž jsou celoročně vystaveny škodlivým účinkům LZO.

Navíc se z posledních výzkumů zdá, že hlavními viníky poškození lesních porostů se z původních primárních LZO (kyselé plyny, kyselé srážky) ve vyspělých zemích, které tyto emise dostávají pod kontrolu, zřejmě stávají sekundární LZO (především fotooxidanty), jejichž emise se pod kontrolu v důsledku zvyšující se dopravy dostat nedaří.

Na závěr je možno k účinkům LZO na rostliny uvést, že krátkodobé působení byt vysoké koncentrace některé z uvedených LZO většinou samo o sobě k záhubě rostliny nevede, dlouhodobá expozice velkého počtu škodlivých LZO v jejich synergickém působení však dokáže rostlině způsobit taková poškození látkové výměny, poruchy imunitního systému a nedostatek energie, že rostlinu nakonec zahubí běžná klimatická anomálie (sucho nebo mráz), nebo běžný parazit (např. kůrovec), kterým by se ve zdravém stavu dokázala ubránit.

b) Škodlivé účinky LZO na živočichy (člověka)

Organismus živočichů (dále jen člověka) má odlišnou fyziologii, proto i účinky LZO mají své těžiště v jiných orgánech. Do organismu živočichů (člověka) vedou pro látky primárně znečišťující ovzduší následující cesty: *pokožka* (sliznice), *trávicí trakt* a *dýchací trakt*.



Obr. 5.6 Stavba a funkce plic

- *Pokožka* (pokud je nepoškozená) je nejméně pravděpodobná cesta pro LZO, nicméně některé organické látky, jako např. PAU (např. benzo-a-pyren), pokožkou prochází a musí si toho být vědomi především příslušníci profese, které s nimi přichází často do styku (např. kominíci), protože to jsou látky silně karcinogenní. Součástí pokožky je i sliznice (např. okolo očí), která negativně reaguje na zvýšené koncentrace některých LZO (např. pocity „štípání“ v očích při vysokých koncentracích fotooxidantů).

- *Trávicí trakt* je zatěžován LZO především sekundárně v důsledku kontaminace potravních řetězců, nebo na úkor regenerace plic (tuhé částice zachycené v plicích, jsou transportovány přes hrtan do žaludku).
- *Dýchací trakt* je nejvíce pravděpodobnou cestou LZO do lidského organismu. Příroda během evoluce počítala s přítomností určitých koncentrací LZO (z přirozených zdrojů) v ovzduší, a proto vybavila dýchací orgány (plíce) důmyslným systémem odlučování a regenerace, který je schopen do určité míry eliminovat účinky nízkých koncentrací běžných typů LZO.

Plíce svojí stavbou fungují jako účinný odlučovač vůči tuhému aerosolu, pracují na bázi setrvačných, odstředivých a adhezních sil. Současně s odlučováním mají plíce vyvinut systém regenerace (zbavování se odloučeného aerosolu) prostřednictvím řasinkového epitelu, vystylají vnitřek průduškového systému, který se synchronizovaně pohybuje a spolu s hlenem, který se roní ze stěny průdušky a poté vzlíná a rozlévá se na povrchu tohoto řasinkového koberce, je odloučený aerosol transportován do hrtanu, kde je nevědomky polknut do žaludku. Výše uvedený systém je do určité míry účinný i proti kyselým plynům a kyselému vodnímu aerosolu (mlze), protože zmíněný hlen je zásaditý, a tudíž má schopnost absorbovat a eliminovat určitou míru kyselého potenciálu těchto LZO.

Základní škodlivé účinky vybraných skupin LZO jsou následující:

- *Kyselé plyny*
Kyselé plyny při nadměrných koncentracích dráždí vnitřní sliznice plicního průduškového systému, pokud je není schopen eliminovat přítomný zásaditý hlen, poškozují látkovou výměnu organismu (tím, že prochází do krevního řečiště), nebo poškozují vnitřní stěny sliznic svým kyselým potenciálem (absorbovaným do vlhkého povlaku sliznice), čímž otevírají do organismu cestu pro již zmíněné patogenní mikroorganismy (časté záněty horních cest dýchacích). Dalším projevem kontaktu sliznic průdušek s těmito plyny je zduření sliznic, čímž se významně snižuje objem ventilovaného vzduchu a může dojít k akutnímu ohrožení života
- *Fotooxidanty*
Fotooxidanty mají při vyšších koncentracích pro lidské plíce a organismus velmi destruktivní účinky, jsou špatně rozpustné ve vodě (především O₃), pronikají až do nejhlubších partií plic, kde způsobují oxidaci tkání (enzymů, proteinů, aminokyselin, tuků až po spoluúčast na poškozování chromosomů), a tím poškozování stěn sliznic se stejnými účinky jako v případě kyselých plynů (časté záněty horních cest dýchacích), navíc dráždí a poškozují ostatní tělesné sliznice, vystavené vnějšímu prostředí (např. kolem očí).
- *Kyselé vodní srážky*
Kyselá srážka ve formě kyselého deště na člověka v důsledku nízkého kyselého potenciálu přímý vliv nemá, což se ovšem nedá říci o kyselé mlze. Ta po vdechnutí do dýchacího traktu vyvolává podobné reakce jako vdechování kyselého plynu s tím, že je vdechován již vytvořený kyselý roztok, který silně dráždí a často i přímo poškozují sliznici plic se známými účinky včetně bronchiálních záchvatů ze zúžení dýchacích cest.

- *Tuhý aerosol*

Zatímco vdechování tuhého aerosolu obsahujícího nebezpečné látky na bázi aromatických (PAU) nebo halogenovaných (PCB, PCDD/F) uhlovodíků jednoznačně zvyšuje pravděpodobnost karcinogenních účinků v organismu, vdechování *inhalabilního aerosolu* (inhalabilního pro plíce, tzn., že částice mají rozměr v intervalu cca 0,3 – 0,7 μm , které jsou pro plíce těžko odlučitelné a mohou se dostat až do oblasti plicních sklípků, které nejsou vybaveny řasinkovým epitelem, a kde se mohou vzpříčit v úzkých průdušinkách) s nebezpečnými povrchovými vlastnostmi (např. SiO_2 , nebo asbest) má účinky pestřejší.

V případě SiO_2 se jedná o částice oxidu křemičitého, které vznikly procesem zvaným *rozpojování hornin* (odštěpením, ražením, drcením, mletím atd.) a které mají porušené povrchové krystalické struktury (nevyrovnaný počet elektronů ve valenčních slupkách), a tudíž jsou povrchově velmi chemicky aktivní. V případě nadechnutí takovéto částice do oblasti plicních sklípků a jejího zaseknutí do sliznice (obvyklé ostré hrany), nebo vzpříčení ji nelze žádným způsobem odstranit. Protože tato částice dráždí chemicky okolní tkáň (a zabíjí buňky imunitního systému zvané makrofágy), vyvolá obrannou reakci imunitního systému, který dané místo zapouzdří výronem speciální bílkoviny, který má za následek trvalou ztrátu celého dotčeného „hroznu“ plicních sklípků. Pokud se tento jev opakuje po dlouhou dobu (u profesí, které jsou dlouhodobě vystaveny prostředí bohatém na inhalabilní aerosol s křemičitým podílem, jako jsou např. horníci v dolech), vyvolá u člověka velmi nebezpečnou nemoc zvanou *pneumokoniózu*, která se vyznačuje postupnou ztrátou plicní kapacity a v minulosti často vedla ke smrti (dnes se řeší u ohrožených zaměstnanců tzv. „expozičním limitem“, zjednodušeně časovým limitem, který mohou během života strávit v takovém prostředí).

V případě inhalace aerosolu tvořeného rozdrčenými minerálními vlákny (např. azbest), navíc spojené s kouřením, se opět setkáváme se zvýšenou pravděpodobností výskytu karcinomu plic, který je bohužel stále zhruba z 50 % pro jedince smrtelný. Vzhledem k celkové environmentální expozici člověka škodlivými látkami je třeba si uvědomit, že během dne průměrný dospělý člověk průměrně sní 1 – 3 kg jídla, vypije 2 – 4 kg vody, ale ventiluje cca 25 kg (cca 20 m^3) vzduchu. Přestože jsou dnes kontaminovány všechny složky životního prostředí, je třeba ve vlastním zájmu věnovat ovzduší, které dýcháme, maximální pozornost a nezhoršovat situaci takovými zlovyky, jakým je např. kouření, které ve spojení s účinkem atmosférických LZO výrazně zvyšuje riziko poškození (nebo dokonce karcinomu) plic.

5.2.3.2 Škodlivé účinky LZO na neživé objekty

- *Koroze kovů*

Problémem kovových materiálů běžně vyráběných člověkem je jejich nedostatečná (technologii výroby podmíněná) čistota. Obsah příměsí v kovech, které jsou dobrými vodiči el. proudu, vyvolává rozdíly v elektrických potenciálech, které pak v povrchových vrstvách mají tendenci se vyrovnávat v případě, že na povrchu kovů je médium, které umožní průtok kompenzačních el. proudů. Tímto médiem může být obyčejná vlhkost, vysrážená na povrchu nechráněných kovových materiálů, je-li navíc kyselá (např. kyselá mlha), o to lépe vede zmíněné el. proudy (jako elektrolyt v olověných akumulátorech). Zmíněné povrchové proudy dodávají energii pro reakci

kovů s atmosférickým kyslíkem, čímž dochází k jevu zvanému oxidace, nebo též koroze kovů se všemi ekonomickými důsledky.

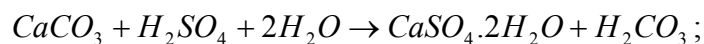
Z dříve uvedených dějů v atmosféře je logické, že pro kovy, které jsou nechráněny vystaveny účinkům LZO (především železo a ocel), je nejhorší situací dlouhodobý kyselý smog, který je navíc doprovázen tuhým aerosolem, který pomáhá na povrchu kovů vytvářet porézní vrstvu, v níž přítomné kapilární síly udržují kyselé vodní srážky po dlouhou dobu. Při ročních koncentracích SO_2 kolem 0,03 ppm dosahuje hmotný úbytek kovů 11 až 17 %. Vedení vysokého napětí má v průmyslových oblastech o 1/3 kratší životnost než v oblastech bez atmosférického znečištění. Na ochranu kovových materiálů a staveb vystavených agresivnímu prostředí (např. věží nebo mostů) se musí vynakládat velké prostředky buď již ve výrobě, nebo při následné periodické ochraně (nátěry), tyto náklady je třeba zahrnout do kolonky škod působených LZO.

- *Destrukce minerálů a stavebních hmot na bázi uhličitanu vápenatého (CaCO_3)*

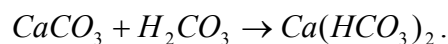
Z materiálů na bázi uhličitanu vápenatého existuje spousta minerálů (např. vápenců nebo pískovců) a stavebních hmot (např. vápno nebo cement), které jsou v současnosti nepostradatelné ve stavebním průmyslu, nebo mají obrovskou kulturní a historickou hodnotu, protože jsou z nich postaveny historické stavby (např. katedrály) nebo umělecká díla (sochy, kašny sloupy atd.).

Znečištění ovzduší (hlavně sloučeninami síry) je příčinou poškozování těchto materiálů s různými důsledky, především z následujících důvodů:

- původní zrno uhličitanu vápenatého se při styku s kyselou vodní srážkou (obsahující kyselinu sírovou) transformuje na zrno (dihydrátu) síranu vápenatého, které zaujímá o cca 100% větší objem, což způsobuje trhání povrchových vrstev (např. znehodnocování soch tím, že ztrácejí jemné kontury tvaru), viz rovnice:



- některé produkty reakcí uvedených materiálů s kyselou srážkou se následně stávají rozpustné ve vodě, čímž trpí mechanická pevnost především stavebních prvků (např. hrozí rozpad nebo zřícení nedostatečně udržovaných historických staveb, ale i poškození nekvalitních novodobých železobetonových konstrukcí), viz rovnice:



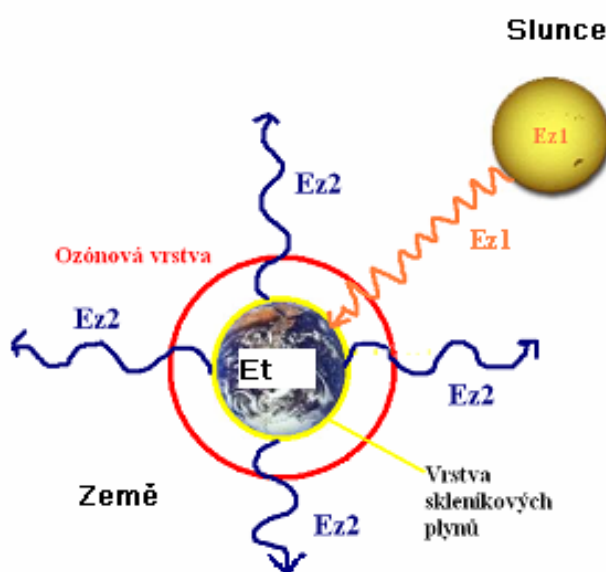
Náklady na ochranná opatření je opět třeba zahrnout do kolonky nákladů způsobených LZO.

5.2.3.3 Škodlivé účinky LZO na tepelnou a radiační bilanci biosféry

Tepelnou a radiační bilanci povrchu planety je možné po značném zjednodušení popsat následující rovnicí a vyjádřit níže uvedeným obrázkem č. 5.7. Uvedená rovnice znamená, že množství akumulované energie ve formě tepla, které je fixováno v biosféře, se rovná rozdílu mezi energií ve formě (krátkovlnného) záření, přicházející na zemský povrch za určitou časovou jednotku (např. den, nebo rok) ze Slunce, a energií ve formě (dlouhovlnného) záření, které zemský povrch za stejnou dobu vyzáří. Popsaná situace je graficky znázorněna na obr.5.7.

$$\sum E_T = \sum E_{Z1} - \sum E_{Z2},$$

kde	$\sum E_T$	suma energie ve formě tepla absorbovaná v biosféře za určité období;
	$\sum E_{Z1}$	suma energie ve formě slunečního záření dopadající na zemský povrch za stejné období;
	$\sum E_{Z2}$	suma energie ve formě terestrického záření vyzářeného zemským povrchem za stejné období.



Obr. 5.7 Grafické vyjádření tepelné a radiační bilance zemského povrchu (biosféry)

Z předchozího textu (především kap. 5.1.3.) a z výše uvedeného obrázku vyplývají dvě základní možnosti pro LZO, jak negativně ovlivňovat popsané energetické toky, a to:

- ovlivňování množství a spektra energie na zemský povrch přicházející (E_{Z1}) nebo
- ovlivňování množství a spektra energie zemský povrch opouštějící (E_{Z2}).

a) Negativní vliv LZO na energetickou bilanci na straně příjmu energie

Jak již bylo popsáno v kap. 1.3., intenzita a spektrální složení slunečního záření dopadajícího na zemský povrch je redukována vlastnostmi atmosféry. I když se nejčastěji v této souvislosti mluví o tzv. „ozonové vrstvě“, z předchozího textu je zřejmé, že koncentrace ozonu ve stratosféře filtrují pouze zbytkovou část spektra ionizujícího záření (část UV_B), zbytek zabezpečuje kyslík a horní vrstvy atmosféry.

Bohužel ozon ve stratosféře je nejslabším článkem vůči vlivu některých LZO, i když to v nepříliš vzdálené minulosti nebylo známo. Jako LZO v tomto smyslu se projevila jinak neškodná molekula určitého typu halogenovaných uhlovodíků (tzv. freonů), vyráběných jako náplň do chladících a klimatizačních jednotek nebo jako hnací plyn do sprejů. Tato molekula se ukázala být v atmosféře natolik stabilní, že se pomocí atmosférické cirkulace dostala až do stratosféry (za cca 10 – 15 let), kde se po interakci s UV_B zářením (které je v této vrstvě teprve absorbováno) rozpadá a uvolňuje radikály halogenů (především Cl[·], a F[·]).

Tyto atomy dokáží velmi účinně a cyklicky rozkládat vznikající molekuly ozonu (jeden atom chloru statisticky rozloží i 10^6 molekul ozonu), čímž narušují rovnováhu jednotlivých forem kyslíku v této vrstvě a způsobují větší průchodnost této vrstvy pro uvedené záření (tím, že molekula ozonu místo absorpce záření zaniká reakcí s halogeny). Uvedenému jevu se říká „ozonová díra“, která se zatím naštěstí v důsledku rotace planety a vlastností atmosféry vytváří především v polárních oblastech na začátku polárního jara.

Možné důsledky negativního vlivu LZO na energetickou bilanci na straně příjmu energie:

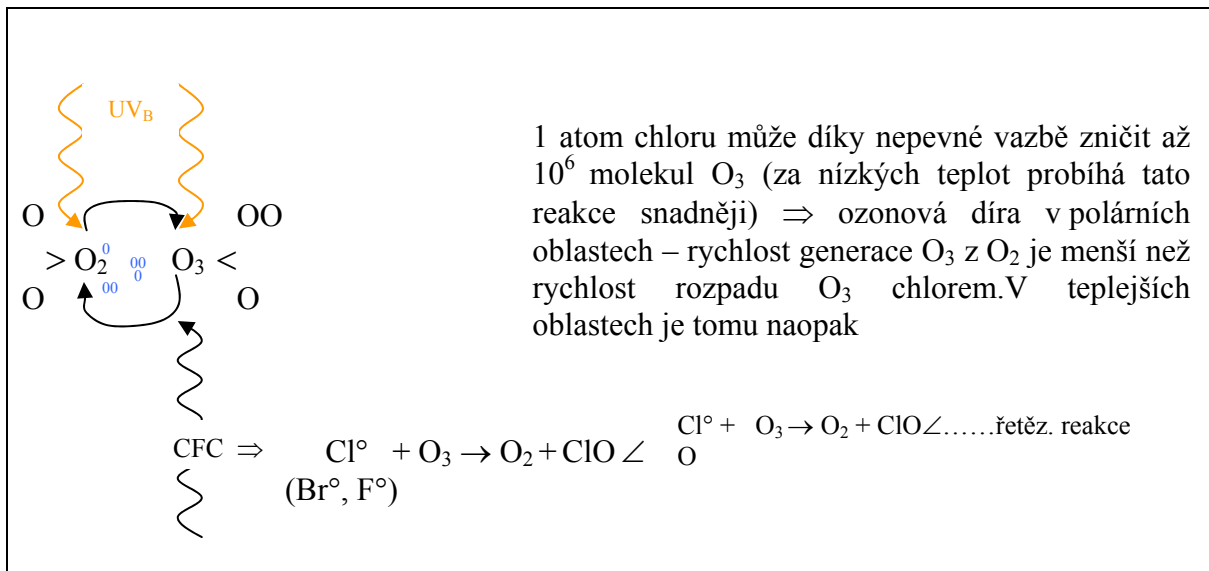
- *Negativní důsledky na energetickou bilanci biosféry*

Možným negativním důsledkem tohoto jevu by mohlo být zvýšené množství energie přicházející na zemský povrch (E_{Z1}), což by se v uvedené rovnici v případě neměnného vyzařování promítlo ve zvýšení celkového množství absorbované energie ve formě tepla (E_T) → příspěvek ke globálnímu oteplování.

$$\uparrow \sum E_T = \uparrow \sum E_{Z1} - \sum E_{Z2}$$

- *Negativní důsledky na ekosystémy*

Důsledkem zvýšeného průniku UV_B na produktivní suchozemské ekosystémy by byl především negativní vliv na fotosyntézu (chloroplasty nejsou stavěny na tak energeticky bohaté sluneční záření), a tím na primární produkci biomasy se všemi důsledky pro zmíněné ekosystémy, v menší míře též hrozí poškozování nechráněných tělesných tkání, vystavených slunečním paprskům (např. kůže nebo oční sítnice – kůže se týká především člověka, protože jiní živočichové holou pokožku sluníčku běžně nevystavují).



Obr. 5.8 Poškození ozonové vrstvy

b) Negativní vliv LZO na energetickou bilanci na straně výdeje energie

Výdejem energie se rozumí vyzařování energie celým povrchem planety prostřednictvím dlouhovlnného (infračerveného) záření, což je jev vlastní každé hmotě,

pokud se její energetický stav liší od hodnoty 0°K. Z LZO nás tedy zajímají pouze ty, které jsou schopny tento proces ovlivňovat, neboli takové plyny, které jsou schopny absorbovat elmg. energii v oblasti, ve které ji zemský povrch vyzařuje. Plynům, které to dokáží, se říká *infračerveně – aktivní* nebo též *skleníkové plyny*.

Tab. 5.1 Ukázka nejfrekventovanějších skleníkových plynů

Skleníkové	Plyn	Přírozené zdroje	Antropogenní zdroje
Oxid uhličitý	CO ₂	Vulkanická činnost, požáry, rozklad	Spalování fosilních paliv
Vodní pára	H ₂ O	Odpařování, dýchání organismů	Spalování fosilních paliv
Metan	CH ₄	Rozkladné procesy	Zemědělská činnost, skládkování
Oxid dusný	N ₂ O	Rozkladné procesy	Zemědělská činnost, skládkování
Ozon	O ₃	Atmosférické výboje	Sekundární LZO (především doprava)
Freony	-	-	Klimatizační technologie
Metylbromid	-	-	Zemědělství (pesticidy)

Přítomnost skleníkových plynů v atmosféře vyvolává tzv. „*skleníkový efekt*“ neboli situaci, kdy se zmírňují rozdíly mezi dnem a nocí (včetně různých ročních období) a průměrná teplota atmosféry je výrazně vyšší, než bez tohoto efektu. Vrstva atmosféry s koncentrací skleníkových plynů se chová podobně jako (pro energii ve formě záření) *polopropustná membrána* (např. sklo nebo fólie na zahradním skleníku), která dobře propouští krátkovlnné přicházející záření, ale hůře propouští dlouhovlnné odcházející záření.

Skleníkové plyny toho docilují tím, že absorbují část odcházející energie, kterou mění zpátky v teplo, čím se ohřívá celá příslušná vrstva atmosféry, a kterou okamžitě všesměrně vyzařují, tudíž i zpět na zemský povrch, který se tím opět ohřívá. Tento jev se opakuje a ustane pro konkrétní záření až tehdy, když jeho vlnová délka je neustálou degradací přenesena do oblasti spektra IR záření, kde již skleníkové plyny neabsorbují.

Klimatické modely naznačují, že průměrná teplota atmosféry na zemském povrchu by bez vlivu skleníkových plynů byla cca minus 2°C. Za to, že v současné době je tato teplota na hodnotě cca plus 15 °C, vděčíme právě současné koncentraci skleníkových plynů. V této souvislosti je třeba poznamenat, že od celkové průměrné teploty v biosféře se odvíjí jak celkové, tak lokální klima na planetě, tzn. např. vládne-li doba ledová nebo meziledová (rozdíl v řádu jednotek °C !!!), nebo jaká je poloha a rozměr základních klimatických pásů (tropického, subtropického, mírného a polárního), které nastavují podmínky pro existenci především suchozemských ekosystémů

Možné důsledky negativního vlivu LZO na energetickou bilanci na straně výdeje energie:

V předcházející kapitole byl vysvětlen pojem skleníkový efekt, který zabezpečuje současné klima na naší planetě, na které je současná biosféra adaptována. Tento efekt byl donedávna způsobován koncentracemi skleníkových plynů z přírodních zdrojů. V tab. 2.1. jsou kromě přírodních zdrojů uvedeny také antropogenní zdroje základních skleníkových plynů, které jsou zodpovědné za postupný nárůst jejich koncentrací v atmosféře (např. dodatečný CO₂ ze spalování fosilního paliva již není schopen být absorbován přírodními procesy), což vede k postupnému zesilování tohoto jevu, pro který se vžil pojem „*globální oteplování*“.

Níže uvedená rovnice dokládá, že snižování množství energie, které dokáže opustit planetu v určitém období, vede (beze změny na straně příjmu) opět ke zvyšování množství energie ve formě tepla.

$$\uparrow \sum E_T = \sum E_{Z1} - \downarrow \sum E_{Z2}$$

Popsat možné vývojové scénáře globálního oteplování není v možnostech této publikace, proto zde uvádím pouze příklady možných řetězců příčin a následků pro biosféru a lidskou civilizaci:

Možné vývojové scénáře globálního oteplování:

- A. Globální oteplování → tání ledovců → zvyšování hladin oceánů (*předpoklad 3 – 5 m do konce století*) → zaplavování území slanou mořskou vodou (*především agrární ekosystémy*) → nedostatek potravin a pitné vody → možná vznik válek (*mezistátních i občanských*) v důsledku nedostatku zdrojů
- B. Globální oteplování → tlak na posuny klimatických pásů (od rovníku k pólům) → postupná změna ekosystémů na zemském povrchu jako důsledek pohybu klimatických pásů → devastace současných agrárních ekosystémů (*změna klimatu, nedostatek vody*) → nedostatek potravin (*a pitné vody*) v mnoha regionech → možnost vzniku lokálních i globálních válek o zdroje potravin a vody
- C. Globální oteplování → zvýšení tepelné energie v atmosféře, zesílení lokálních (*bouřky, tornáda*) i regionálních (*hurikány, tajfuny, aj..*) ničivých projevů počasí → velké ekonomické škody.

Na závěr této kapitoly je vhodné poznamenat, že náhled na příčiny a důsledky globálního oteplování není (v důsledku nedostatečných dat a klimatických modelů) ve vědecké komunitě jednotný, v zásadě panují dva rozdílné názory:

1. Globální oteplování je důsledkem emisí antropogenních skleníkových plynů a je třeba maximálně tyto emise omezit i za cenu velkých aktuálních finančních obětí a snižování růstu HDP (názor je zastáván především v rámci EU).
2. Globální oteplování je důsledkem vlivů na činnosti člověka nezávislých, prostředky na omezování emisí skleníkových plynů je třeba investovat do přípravy infrastruktury na přežití lidstva ve změněném klimatu (názor je zastáván především v USA).

5.3 Zdroje znečišťování ovzduší (ZZO)

5.3.1 Rozdělení ZZO

5.3.1.1 Rozdělení ZZO podle geometrického hlediska

Zdroje ve smyslu geometrického tvaru dělíme na:

- *bodové* (obvykle samostatně stojící komíny větších emisních toků);
- *plošné* (velké množství bodových zdrojů pohromadě, povrchová prašnost, hořící skládky nebo důlní odvaly);
- *liniové* (dopravní linie po které jezdí dopravní prostředky emitující LZO).

Rozhodnutí o tom, kdy a které zdroje posuzovat jako bodové nebo naopak jako plošné, eventuelně liniové, záleží také na velikosti měřítka, ve kterém je posuzujeme. To, co se v malém měřítku může jevit jako samostatný bodový zdroj (tovární komín), se může ve velkém měřítku jevit jako zdroj plošný (celá průmyslová aglomerace).

5.3.1.2 Rozdělení ZZO podle přirozenosti výskytu

Podle přirozenosti výskytu dělíme ZZO na:

- přirozené;
- antropogenní.

Přirozené ZZO

Látky vznikající přirozenými procesy provázejí atmosféru od počátku jejího formování (emise při sopečné činnosti, eroze půd, lesní a stepní požáry, pyl stromů a rostlin, kosmický prach apod.).

- *Vulkanickou činnost* doprovází emise obrovského množství popela, prachu a plynů do atmosféry, což se může stát skutečnou přírodní katastrofou, způsobující smrt velkého počtu živých organismů.
- *Požáry lesů, stepí a savan* jsou příčinou znečišťování atmosféry značným množstvím popelovin, oxidů uhlíku, ale i dioxinů, které jsou často vlivem konvence vynášeny až do stratosféry.
- *Bouřky, cyklony a vlnobití* vyvolávají hlavně emise tuhých částic různých solí (vzniklých po odpaření vody z kapiček vodní tříště), často desítky kilometrů od břehů moře do vnitrozemských oblastí. Mezi nezanedbatelné přirozené látky znečišťující ovzduší musíme nutně započítat i *pyl různých druhů rostlin a stromů*.

Antropogenní ZZO

LZO antropogenního původu mají často podobný charakter jako přirozené, avšak podstatný rozdíl je v tom, že počty jejich druhů už představují téměř 10^6 a denně další druhy díky novým technologiím vznikají. Příčin přírůstků antropogenního znečišťování atmosféry je několik, z těch nejdůležitějších je to především zvyšování spotřeby energie na obyvatele naší planety, která je stále z větší části kryta spalováním fosilních paliv (při tom se do ovzduší uvolňuje oxid uhličitý, který byl po dlouhá geologická období fixován v zemské kůře ve formě uhlovodíku).

Příspěvek lidské činnosti je udáván přibližně 10%. Tento předpoklad by mohl vést k závěru, že znečištění ovzduší přirozenými procesy je rozhodující a že tedy ohrožení přírodního prostředí lidskou činností není tak závažné. Je však nutno brát v úvahu, že uvedený poměr je jen dočasný, neboť technologický rozvoj postupuje rychle kupředu a v souvislosti s tím se zvyšuje i znečištění ovzduší, které má svůj původ v lidské činnosti. Mnohem významnějšími faktory jsou ovšem následující skutečnosti:

- látky produkované lidskou činností vykazují většinou daleko vyšší toxicitu než látky z přírodních procesů;
- antropogenní zdroje jsou dnes rozptýleny po celém světě a jejich dlouhodobá produkce LZO mnohonásobně překračuje asimilační schopnost okolní přírody a vytváří tak reálné nebezpečí vzniku jejího nevratného poškození.

Největšími antropogenními ZZO současnosti co do emitovaných objemů LZO jsou především termické procesy (např. spalování fosilních paliv a odpadů, hutnictví, koksárenství atd.) a chemické procesy (především úprava fosilních paliv, výroba umělých hmot, průmyslových hnojiv, barev, laků, ředidel atd.).

5.4 Velikost a tvar částic

Velikost a tvar částic patří mezi nejdůležitější veličiny, které charakterizují částice a rozhodují o jejich odlučování z plynného prostředí. Závisí na nich pohybové vlastnosti, které u mechanických a elektrických odlučovačů rozhodují o odlučovacích rychlostech, a tedy i o jejich konečném stupni odloučení, na velikosti částice závisí velikost elektrického náboje, který je částice schopna nést a rozhoduje tak u elektrických odlučovačů o možnostech odlučování. Rovněž difúze částic, která se rozhodujícím způsobem uplatňuje při procesu filtrace, je silně závislá na velikosti částice. Na velikosti částic závisí i jejich optické vlastnosti, kterých se využívá k měření koncentrace i zrnitosti částic.

Vznik tuhých částic

Velikost i tvar částic, které mají být odloučeny, závisí zejména na způsobu jejich vzniku. Tuhé částice vznikají buď přírodní nebo lidskou činností a podle toho je lze dělit na *částice přírodní a částice vzniklé lidskou činností*.

Částice přírodní jsou zejména:

- kosmický prach;
- anorganický prach pozemského původu (geologický prach), vznikající vulkanickou činností, přírodními požáry, písečnými bouřemi, erozí hornin;
- organické částice (biologické částice), např. pyl z květin, výtrusy z hub, mechů a lišejníků, semena rostlin, viry.

Částice vzniklé lidskou činností lze dále rozdělit na částice primárně vzniklé lidskou činností a částice sekundární, vzniklé konverzí některých znečišťujících látek z plynného skupenství na skupenství tuhé v atmosféře.

Částice primárně vzniklé lidskou činností jsou zejména:

- částice vznikající při spalování paliv a částice z průmyslových odpadních plynů;
- částice vznikající při výrobě a zacházení se sytkými materiály (cement, vápno, sádra, hnojiva, uhelný prach, mouka, aj.);
- částice vznikající otěrem při zpracování nebo obrábění materiálů.

Podle druhu výrob se na celkových emisích tuhých částic podle množství podílí zejména tato průmyslová odvětví:

- spalovací procesy a zařízení na výrobu páry a energie;
- hutní průmysl;
- průmysl stavebních hmot;
- chemický průmysl;
- těžba a zpracování rud a uhlí;
- doprava a ostatní průmyslová odvětví.

Charakteristický rozměr a tvar částic

Tvar částic závisí zejména na způsobu jejich vzniku. Nejjednodušší pravidelné tvary (koule) vznikají při kondenzaci. Tento způsob vzniku se uplatňuje zejména u spalovacích procesů a částice kulových tvarů najdeme v jemných frakcích elektrarenských popílků.

Pravidelných tvarů nabývají rovněž částice vznikající krystalizací. Naopak složitý tvar mívají částice vznikající při mechanických operacích, jako je mletí a drcení.

Vědní obor, zabývající se tvarem částic, se nazývá *morfologie* částic. Při klasifikaci částic podle tvaru rozlišujeme tři základní druhy:

- částice *izometrické* (korpuskulární), u nichž všechny tři rozměry jsou vzájemně srovnatelné;
- částice *laminární* (ploché), u nichž dva rozměry převládají nad třetím;
- částice *fibrilární* (vláknité), u nichž je jeden rozměr podstatně větší než zbývající dva.

Částice laminární a fibrilární se společně nazývají jako *neizometrické*. Jejich chování při pohybu v plynném prostředí nelze většinou jednoznačně definovat, neboť závisí především na poloze částice vůči směru jejího relativního pohybu vzhledem k okolnímu prostředí.

Složitě tvary mohou vznikat rovněž koagulací (shlukováním). Částice vytvářejí shluky (agregáty) buď izometrického tvaru, nebo vznikají lineární útvary – řetězce.

Zrnitost částic

Při odlučování tuhých částic se v praxi setkáváme se soubory, které jsou tvořeny částicemi různých velikostí. Pro jednoduchost předpokládejme, že všechny částice jsou kulového tvaru. Obsahuje-li soubor částice pouze v úzkém intervalu velikostí, hovoříme o *monodisperzním souboru*. S takovými soubory se setkáváme velmi zřídka, např. se jim blíží částice vznikající kondenzací za určitých podmínek nebo prachy z výtrusů rostlin. Ve zkušebnictví nebo v oblasti výzkumu odlučování se monodisperzní částice většinou vytvářejí uměle nebo tříděním s vysokou ostrovní tříděním. Obsahuje-li soubor částice různých velikostí, jedná se o *polydisperzní soubor*.

Základní charakteristikou každého polydisperzního souboru částic je jeho *zrnitost* (disperzita, granulometrické složení, rozdělení velikostí částic). V závislosti na použité metodě měření lze rozdělení velikostí částic vyjádřit pomocí:

- počtu částic N ;
- průmětu částic A ;
- hmotnosti částic M .

Podle tohoto hlediska budeme hovořit o *druhu rozdělení*. Rozdělení velikostí částic daného souboru lze vyjádřit buď jako *diferenciální křivku zrnitosti*, nebo *kumulativní křivku zrnitosti*.

Analytické funkce, které popisují rozdělení velikostí částic, lze v zásadě rozdělit na *dvou a tříparametrové funkce*. Protože se analytické funkce skutečnému rozdělení velikostí částic více či méně pouze přibližují, nazývají se rovněž jako *aproximační funkce*.

Ve většině případů zrnitostí částic, se kterými se při odlučování setkáváme, lze při volbě vhodné aproximační funkce vystačit s dvouparametrovými funkcemi: *normálním rozdělením, logaritmicke-normálním rozdělením a rozdělením dle Rosina a Rammlera*.

Charakteristické velikosti souboru nekulových částic

Teoretické přepočty mezi jednotlivými druhy rozdělení velikostí částic a vztahy pro stanovení charakteristických velikostí souboru částic platí přesně pro částice kulového tvaru. Čím více se tvar částic odchyluje od izometrického, kulového tvaru, tím větší je

nepřesnost. Při volbě metody stanovení zrnitosti částic je proto nutno vycházet vždy z účelu analýzy. Je správné volit takovou metodu, která přímo poskytuje požadovaný druh rozdělení velikostí částic.

Mezi nejčastěji používané analýzy zrnitosti částic patří sedimentace částic v kapalině s gravimetrickým vyhodnocením. Tato analýza poskytuje údaje o rozdělení dle hmotnosti v závislosti na aerodynamické velikosti částice a uplatní se u většiny odlučovacích principů, kde o odlučování částic rozhodují aerodynamické vlastnosti částic (Hemerka, 1996).

5.4.1 Povrchové vlastnosti částic

Při odlučování částic se mohou výrazně projevit jevy, které nastanou při vzájemném styku částic nebo při styku částic se stěnou (odlučovací plocha, obtékané těleso). Pro tyto jevy se v odlučování používá název *adheze* částic, i když v případě vzájemného styku částic se přesně jedná o *kohezi* částic. Adhezní vlastnosti částic určují *lepivost* částic, která může výrazným způsobem ovlivnit spolehlivost chodu odlučovačů. V některých případech, např. při filtraci atmosférického vzduchu bez regenerace filtrační vrstvy, naopak přispívají adhezní vlastnosti k dosažení vysokého odlučovacího efektu.

Důležitým hlediskem spolehlivosti chodu odlučovačů je *abraze (opotřebení) materiálu*, vyjadřující následek vzájemného styku částic a stěny odlučovače či potrubí. Abraze materiálu je opět silně závislá na povrchových vlastnostech částic. Významnou povrchovou vlastností je *smáčivost* částic, uplatňující se výrazně u mokrého způsobu odlučování. S povrchovými vlastnostmi úzce souvisí i *výbušnost* prachů. Při konstrukci výsypek a zásobníků odloučených prachů hrají významnou roli další povrchové vlastnosti prachu jako *sypný úhel*, *úhel skluzu* a *úhel vnitřního tření*. Mezi povrchové vlastnosti lze zařadit i *sypnou hmotnost prachu*.

Měrný povrch částic

Většina povrchových vlastností částic závisí na měrném povrchu částic, který je možno vztahovat buď k jednotce hmotnosti nebo jednotce objemu. Hmotnostní měrný povrch S_M (m^2/kg) vyjadřuje celkový povrch částic o hmotnosti 1 kg, objemový měrný povrch S_V (m^2/m^3) vyjadřuje celkový povrch částic o objemu 1 m^3 .

Měrný povrch reálného souboru částic S_M se nejnázve určí měřením hydraulického odporu vrstvy částic při laminárním průtoku vzduchu. Je zvykem vyjadřovat veličinu S_M v jednotkách (cm^2/g). U jemných prachů dosahuje tato veličina hodnot řádově $10^3 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Adheze částic a lepivost

Přestože je *lepivost prachů* při odlučování běžně používaný pojem, není vlastností, která by byla jednoznačně fyzikálně definovaná. Lepivost prachů je souhrnem jevů, které způsobují jednak ulpívání částic na stěnách odlučovače, jednak soudržnost shluků částic. V praxi se pod pojmem lepivost prachů spíše rozumí pouze ulpívání částic na stěnách a z toho pramenící nebezpečí zanášení odlučovače, u průmyslové filtrace je lepivost prachů vázána na schopnost regenerace filtrační textilie. Lepivost je proto možno chápat jako jednu z nejdůležitějších vlastností prachů z hlediska spolehlivosti odlučovacích zařízení.

Lepivost má svůj původ v adhezi částic, způsobené *adhezními silami*. Adhezní síly lze rozdělit podle původu na:

- síly molekulární (Van der Waalsovy síly);
- síly kapilární;

- síly elektrostatické.

Molekulární adheze

Při vzájemném styku částic nebo částice a povrchu stěny se uplatňují síly molekulárního původu – síly Van der Waalsovy. Tyto síly jsou elektrostatického charakteru a vyplývají ze stavby atomů a molekul – kladných jader a záporných elektronů. Van der Waalsovy síly jsou velmi malé a se vzdáleností povrchů velmi rychle klesají. Při vzdálenosti řádově desetiny mikrometrů lze již tyto síly zanedbat.

Kapilární adheze

Kapilární adheze vzniká v místě styku částice se stěnou, nebo v místě styku dvou částic. Vlivem povrchové vlhkosti dojde při styku obou povrchů k vzájemnému propojení můstkem vody, který má zpravidla vydutý povrch. Protože je nad takovým tvarem povrchu kapaliny nižší rovnovážný tlak par než nad rovným povrchem kapaliny, dochází zde k další kondenzaci par až do okamžiku, než se tento tlak vyrovná s parciálním tlakem par v okolním plynu. Tento mechanismus kondenzace okolní vlhkosti v místě styku povrchů probíhá pozvolna a nazývá se *kapilární kondenzace*. Mezi částicí a rovným povrchem tak vzniká *kapilární adhezní síla*, která je daná nejenom *adhezním napětím* mezi kapalinou a plynem (povrchové napětí), ale i tlakovou silou vyvolanou skutečností, že v průběhu kapilární kondenzace je nad povrchem kapaliny nižší parciální tlak vodní páry a teda i nižší celkový tlak než v okolí. Kapilární adheze se výrazným způsobem projevuje u plynů s relativní vlhkostí větší než 65 %, kde převládá nad ostatními složkami adheze.

Elektrostatická adheze

Dostane-li se částice, která je nositelem určitého elektrického náboje, do blízkosti nenabitě vodivé stěny, vytváří se mezi částicí a stěnou elektrostatické pole. Mezi částicí a stěnou pak vzniká přitažlivá *elektrostatická síla*.

Kromě uvedených adhezních sil přispívá k adhezi částic i členitost (drsnost) povrchu stěny i částice samotné. U drsného povrchu se částice „zaklíní“ a hovoříme o *mechanické adhezi*.

Poznatky z praxe ukazují, že v souladu s teoretickými úvahami je lepivost prachu ovlivněna především vlhkostí plynu a elektrickým nábojem. Lepivost silně vzrůstá se zvětšujícím se měrným povrchem částic S_M , resp. S_V . Lze konstatovat, že všechny jemné prachy, obsahující částice o velikosti menší než 10 μm , jsou vždy silně lepivé.

Abraze materiálu

Opatřebením materiálů stěn odlučovacích zařízení i potrubních sítí při proudění plynů obsahujících částice je způsobeno *abrazí*. Abrazi neboli ořez materiálu, lze vysvětlit dvěma mechanismy. K *rázovému ořezu* dochází při dopadu částice na stěnu pod velkým úhlem. Dopad částice vyvolává v materiálu podpovrchový lom a dochází k postupnému vylamování povrchové vrstvy. Druhý mechanismus ořezu je tzv. *smykový ořez*, ke kterému dochází při menších úhlech dopadu. Jedná se o obdobu třiskového obrábění.

Abraze se vyjadřuje úbytkem materiálu stěny. Tento úbytek závisí na těchto faktorech:

- době expozice a koncentraci částic;
- vlastnostech materiálu částic a stěny;
- úhlu dopadu a rychlosti dopadu částice;
- normálové síle při posuvu částice po stěně.

U měkkých materiálů dochází k vyššímu opotřebení v oblasti menších úhlů, způsobenému vyšším smykovým otěrem. U tvrdých a křehkých materiálů je smykový otěr podstatně nižší než u měkkých materiálů, opotřebení však výrazně vzrůstá v oblasti úhlu blízkého se k 90° vlivem rázového otěru.

Za nejdůležitější vlastnosti částic z hlediska abraze materiálu se považují tvrdost materiálu částic a měrný povrch. Abraze materiálů způsobuje značné problémy zejména u vírových odlučovačů a vzhledem k vysoké koncentraci i u pneumatické dopravy, zejména u oblouků. Zvyšování životnosti zařízení se řeší zesílením stěn na exponovaných místech nebo použitím speciálních odolných materiálů v závislosti na úhlu dopadu. Mezi tyto materiály (např. u oblouků) patří tavený čedič, který jako tvrdý a křehký materiál má při uvažovaných úhlech dopadu výhodnější charakteristiky než běžně používaná ocel.

Smáčivost částic

Smáčivost částic je důležitá vlastnost částic u mokrých odlučovačů. U tohoto způsobu odlučování přichází částice do styku s kapalinou a správná funkce odlučovače závisí na tom, zda bude částice kapalinou pohlcena, či nikoliv. Absolutní hodnota smáčivosti není v současné době definována. Existují různé metody stanovení smáčivosti, které udávají pro různé látky pouze relativní hodnoty smáčivosti a výsledky testů podle různých metod nelze přesně vzájemně porovnávat.

Výbušnost prachů

Důležitou vlastností částic z hlediska bezpečnosti provozu odlučovacích zařízení je *výbušnost prachů*. Schopnost explodovat je schopnost rychle shořet za současného vývinu tlaku. Aby ve směsi hořlavého prachu s plynem mohlo dojít k výbuchu, musí být v daném místě splněny tyto podmínky:

- koncentrace prachu se pohybuje mezi dolní a horní mezí výbušnosti;
- plyn obsahuje určité minimální množství kyslíku;
- k zážehu musí být do směsi prachu a plynu dodáno dostatečné množství tepelné energie;
- prach musí být dostatečně jemný, s vysokou hodnotou měrného povrchu.

Mezi nejznámější hořlavé prachy, které ve směsi s plynem mohou tvořit výbušnou směs, patří dřevěný brusný prach, hnědohelný prach, hliníkový prach, cukrový prach, mouka, gumový prach, saze.

Spodní meze výbušnosti se u jednotlivých druhů prachu pohybují v oblasti kolem 10 g/m^3 , *horní meze výbušnosti* bývají řádově vyšší. Za iniciační zdroje je možno považovat elektrické výboje, jiskry mechanického původu, žhnoucí ohniska, horké plyny zahřáté spalováním, zářením nebo stlačením, horké plochy vzniklé třením nebo zahřáté sáláním, samovzněcovací procesy, manipulaci s otevřeným ohněm.

Mezi aktivní opatření (protivýbuchovou ochranu) lze zařadit:

- inertizaci inertním plynem;
- inertizaci inertním prachem;
- sledování koncentrace prachu;
- vyloučení iniciačního zdroje.

Základ opatření je však již v návrhu odlučovacího zařízení i potrubních tras, kde vhodným konstrukčním řešením lze vyloučit vznik nebezpečných koncentrací.

Mezi pasivní opatření patří:

- uvolnění exploze do volného prostoru;
- automatické potlačení exploze;
- zabránění přenosu exploze;
- udržení exploze v zařízení odolném tlakovému rázu.

5.4.2 Elektrické vlastnosti částic

Základními elektrickými vlastnostmi částic, které se uplatňují při odlučování, jsou *náboj částic* a *elektrický odpor vrstvy částic*. Obě elektrické vlastnosti se přímo uplatňují u elektrických odlučovačů. U souborů částic, které jsou nositeli nábojů obou polarit, může docházet vlivem elektrických sil ke shlukování částic – koagulaci.

Přirozený náboj částic

Promíneme-li elektrické odlučování, kde částice získávají náboj uměle, řízeným procesem, setkáváme se při odlučování s nenabitými částicemi jen výjimečně. Tuhé i kapalné částice již při vzniku nebo krátce poté získávají určitý elektrický náboj – *přirozený náboj*. Základní jednotkou náboje je *elementární náboj* $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C, rovný hodnotě náboje elektronu. Výsledný elektrický náboj může být pouze násobkem elementárního náboje e .

U prachů, vznikajících mechanickými operacemi jako mletí, drcení, broušení, získávají částice elektrický náboj při procesu dělení. Při proudění kanály získávají částice náboj nárazem na stěny – tzv. *triboelektrický náboj*. Velikost i polarita náboje jsou závislé na chemickém složení materiálu částice, tak materiálu stěny. Tento jev může mít u daného technologického zařízení nepříznivé důsledky. Mohou vznikat jiskrové výboje, způsobující u výbušných prachů iniciaci výbuchu. Elektrický náboj může způsobovat vytváření nánosů prachu na vnitřních částech zařízení. Proto je nutné předcházet těmto následkům uzemněním a vodivým propojením částí zařízení.

U dýmů, kde jemné částice vznikají kondenzací par kovů, získávají částice náboj difusí iontů vznikajících při vysokých teplotách.

Při vzniku mlhy kondenzací vodní páry prakticky nevzniká žádný elektrický náboj. Vznikají-li však kapalné částice mechanickými pochody, např. rozstříkáváním, jsou tyto částice nositelem určitého elektrického náboje.

Umělé nabíjení částic

Aby mohlo dojít k účinnému elektrickému odlučování, musí být částice nositelem dostatečně vysokého monopolárního elektrického náboje, který částice získají umělým nabíjením. Základní způsob nabíjení, používaný u elektrických odlučovačů, je nabíjení volnými ionty, vznikajícími při koronovém výboji. Při tomto způsobu nabíjení se uplatní dva principy – nabíjení částic *elektrickým polem* a nabíjení částic *difusí iontů*.

Nabíjení difusí probíhá mnohem pomaleji než nabíjení po siločarách (elektrickým polem) a rovnovážného stavu se dosahuje teoreticky po uplynutí nekonečně dlouhé doby. V praxi se používá pro výpočet náboje Q zjednodušený vztah

$$Q \doteq 10^8 a e l \quad (5.1)$$

kde velikost částice a se udává v m. Tento vztah dobře vyhovuje běžným poměrům v odlučovacích zařízeních (teplota, koncentrace iontů, doba zdržení).

I když některý z uvedených principů převládá, probíhá u malých i velkých částic současně nabíjení po siločarách (elektrickým polem) i nabíjení difusí iontů. Zjednodušeně lze však proces nabíjení popsat podle velikosti částice pouze dvěma vztahy. Pro částice a větší než $1 \mu\text{m}$ je $Q \sim a^2$ a pro částice a menší než $1 \mu\text{m}$ je $Q \sim a$.

Elektrické síly působící na částice

Elektrické síly působící na částice vyplývají z rozložení nábojů na povrchu částice a intenzity elektrického pole lze je odvodit ze základního Coulombova zákona

$$\vec{F} = Q\vec{E}, \quad (5.2)$$

kde Q je náboj a \vec{E} intenzita elektrického pole.

Při odlučování částic se můžeme setkat s případy, kde:

- nenabitá částice se nachází v homogenním nebo nehomogenním elektrickém poli;
- nabitá částice se nachází v blízkosti nenabitě stěny;
- nabitá částice se nachází v elektrickém poli.

Zde připomeňme, že ve fyzice se kladný smysl elektrického pole, vyvolaného usměrněným napětím, značí od kladné k záporné elektrodě. Nachází-li se v elektrickém poli elektron, kladný nebo záporný iont, kladně nebo záporně nabitá částice, vzniká síla, která má dle Coulombova zákona směr intenzity elektrického pole v daném místě a u kladného iontů, resp. kladně nabitě částice, je smysl síly shodný se smyslem elektrického pole, u elektronu, resp. záporného iontu či záporně nabitě částice, je smysl síly opačný.

Elektrický odpor vrstvy částic

Elektrický odpor vrstvy částic má u elektrického odlučování prvořadý význam a může být jedním ze zhoršujících činitelů, které nepříznivě ovlivňují odlučovací proces. Elektrický odpor vrstvy částic se vyjadřuje pomocí *měrného odporu vrstvy částic* ρ_v (Ωm).

Měrný odpor vrstvy částic úzce souvisí s funkcí elektrických odlučovačů. Přesáhne-li intenzita elektrického pole v odlučovači kritickou hodnotu $E_{krit} \approx 10^6$ V/m, dochází ke koronovému výboji a ionizaci plynu. Podle vztahu (Hemerka, 1996) vzniku intenzity elektrického pole E_v pak dojde ve vrstvě prachu ke koronovému výboji – *zpětné koruně*.

Protože se při zpětné koruně nabíjejí částice v okolí sběrací elektrody na opačnou polaritu než u vysokonapěťové elektrody, působí tento jev na odlučovací proces negativně, je tedy nežádoucí. Pro běžné podmínky elektrických odlučovačů se jako hranice pro ρ_v uvádí $\rho_v < 2 \cdot 10^8 \Omega\text{m}$.

Druhý extrémní případ nastává při velmi malém odporu ρ_v (vodivé částice). Jestliže je $\rho_v < 10^2$ až $10^3 \Omega\text{m}$, dochází při styku nabitých částic s odlučovací plochou k jejich rychlému vybíjení a částice od sběrací elektrody odskakují. Následkem toho odlučivost odlučovače klesá, sběrací (usazovací) elektrody jsou téměř čisté, bez vrstvy částic.

Mezi oběma extrémy se nacházejí částice s měrným odporem vrstvy, při kterých elektrické odlučování většinou nedělá potíže.

Měrný elektrický odpor vrstvy částic je komplikovanou veličinou a je nutno jej při konkrétních aplikacích určovat experimentálně. Jestliže v praxi není při elektrickém

odlučování splněná podmínka $\rho_V \ll 2 \cdot 10^8 \Omega m$, musí se provést opatření k jeho snížení např. přidáváním vodní páry do plynu, dále přidáváním aditiv SO_3 nebo čpavku ve stopových množstvích.

5.4.3 Pohybové vlastnosti částic

U dvoufázových systémů tuhá (kapalná) částice – plyn je základem odlučování jejich přenos z proudu plynu k odlučovacím plochám. Přenos částic je výsledkem působení sil hmotnostních – gravitační, setrvačná, odstředivá, popř. magnetická a sil povrchových – aerodynamický odpor, elektrická síla, molekulární síla.

Podle převládající síly, která při odlučování vyvolává pohyb částice k odlučovacím plochám, hovoříme pak o principu gravitačním, setrvačném, odstředivém, elektrickém, difusním. Při objasnění jednotlivých principů se zpravidla vychází z řešení *pohybu individuální částice*. Pod pojmem *pohybové vlastnosti* pak rozumíme řešení základních případů pohybu částice, ze kterých vychází definice některých základních veličin, charakterizujících vlastnosti částic při jejich pohybu v plynném prostředí.

Většina teoretických řešení odlučování částic z laminárního proudu plynu vychází z pohybové rovnice částice. Řešením této rovnice v obecném případě křivočarého pohybu je trajektorie částice, ze které lze pro zvolenou velikost částice usuzovat o odlučovacích schopnostech daného typu odlučovače. V některých případech postačí zjednodušené řešení pohybové rovnice částice v okolí odlučovací plochy (za předpokladu zjednodušených proudových obrazů a ustáleného pohybu částice) vedoucí ke stanovení odlučovací rychlosti částice. Tento přístup k řešení je založen na tzv. kvazistacionárním pohybu částice.

Obecná pohybová rovnice částice, ze které se vychází při obecném řešení pohybu částicemi má tvar

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{F}_\tau + F_v + F_e \quad (5.3)$$

kde \vec{F}_1 a \vec{F}_2 jsou *setrvačné síly* v rovnováze s ostatními silami, mezi které patří *aerodynamický odpor* \vec{F}_τ , *vztlak* F_v a obecně ostatní *vnější síly* F_e jako např. gravitační síla, elektrická síla (Hemerka, 1996).

5.4.4 Přenosové vlastnosti částic

Pohybové vlastnosti částic jsou důležitou přenosovou vlastností částic, jestliže při popisu odlučování vycházíme z pohybu individuální částice.

Pohyb tuhých i kapalných částic v plynném prostředí je ovlivňován nárazy molekul plynu a částice kromě svého pohybu vyvolaného vnější silou vykonává i náhodný pohyb. Tento náhodný pohyb vyvolává *difusi částic*, která se v některých případech, např. při odlučování jemných částic ve vláknitých vrstvách (filtrace), stává hlavním odlučovacím principem. Difusí částic lze vysvětlit i změny koncentrací částic při proudění plynů v kanálech, zejména při směšování proudů. Difuse je důležitou přenosovou vlastností částic zejména u jemných částic.

Při vzájemném nárazu částic v plynném prostředí dochází u částic s vhodnými povrchovými vlastnostmi k jejich shlukování – *koagulaci*. Koagulace částic je jev, který se k odlučování částic přímo nepoužívá, může však za určitých okolností odlučování ovlivnit.

Obdobným přenosovým jevem je *termoforéza*. Tento přenos částic silami molekulárního původu se u odlučovačů jako odlučovací princip rovněž nevyužívá, ale může při proudění horkých plynů výrazným způsobem ovlivnit dlouhodobé odlučování částic na stěnách kanálu.

5.4.5 Základní odlučovací principy

Základem každého odlučovacího procesu tuhých i kapalných částic je separace částic z proudu plynu na odlučovací plochy. U tuhých částic může být podle druhu odlučovače odlučovací plochou přímo stěna odlučovače (např. gravitační a vírové odlučovače), nebo ji tvoří vestavba odlučovače (např. elektrické a rotační odlučovače), dále ji může tvořit povrch vláken nebo zrnitého materiálu (filtrace ve vláknité či zrnité vrstvě), nebo povrch již odloučených částic ve vrstvě (filtrační koláč u průmyslové filtrace). Odlučovací plochu mohou tvořit i kapalně částice v proudu plynu či vodní pěna (některé druhy mokřých odlučovačů).

Charakter síly, která se v daném případě podílí na separaci částic, určuje odlučovací princip. *Gravitační princip* je založen na působení gravitační síly, *setrvačný princip* na využití setrvačnosti částic. *Odstředivý princip* se uplatňuje při proudění plynu ve válcových komorách, kde pohyb částice při rotaci plynu je dán zejména působením odstředivé síly. *Elektrický princip* vychází z působení elektrické síly na částice. Síly molekulárního původu, vyvolávající difuzi částic, jsou základem *difusního principu*. Částice, pohybující se v blízkosti odlučovací plochy, se mohou na tuto plochu odloučit díky své konečné velikosti. Tento princip se nazývá *intercepční*.

U odlučovačů zpravidla při separaci částic některý z principů převládá a podle tohoto principu bývá odvozen i název odlučovače (např. gravitační, setrvačný, elektrický). V některých případech působí současně více principů. Typickým případem je filtrace. Kromě uvedených základních odlučovacích principů mohou odlučování ovlivňovat i doprovodné jevy jako koagulace a termoforéza.

Principy odlučování charakterizují prvou, nejdůležitější fázi odlučování – *separaci částic* – a určují technické možnosti odlučovačů. Sama separace částic na odlučovací plochy však ještě neznamená zajištění správné funkce odlučovacích zařízení. U většiny odlučovačů se musí částice z odlučovacích ploch buď kontinuálně, nebo v časových intervalech odstraňovat, průmyslový filtr se musí regenerovat. U těchto odlučovačů se ve druhé fázi odlučování – odstraňování odloučených částic z odlučovacích ploch – výrazně uplatní povrchové vlastnosti částic (adheze, lepivost, úhel skluzu). U mokřých způsobů odlučování je předpokladem správné funkce dobrá smáčivost částic použitou kapalinou, u elektrických odlučovačů se předpokládají vhodné elektrické vlastnosti částic.

U suchých způsobů odlučování je nedílnou součástí odlučovacího procesu odsun odprašků do zásobníků, jejich vyprazdňování a způsob likvidace odprašků. V této třetí fázi se opět výrazně projevují povrchové vlastnosti částic. U mokřých způsobů odlučování je nedílnou součástí odlučovačů kalové hospodářství.

Správná funkce odlučovacích zařízení tak vyžaduje splnění celé řady požadavků. Základem však zůstává separace částic na odlučovací plochy, tedy náležité využití odlučovacích principů. Ostatní navazující fáze odlučování mohou výsledný odlučovací efekt pouze zhoršit.

5.4.6 Obecné vlastnosti odlučovačů

Různé druhy odlučovačů mají určité společné vlastnosti, podle kterých lze odlučovače roztrždit do několika základních skupin (Šiška, 1980).

Mezi *základní hlediska*, podle kterých se *hodnotí funkce* odlučovacích zařízení, patří:

- dosažená *celková odlučivost*, resp. *koncentrace částic na výstupu* z odlučovače, daná odlučovacími schopnostmi odlučovače a zrnitostí a koncentrací vstupujícího prachu;
- *spotřeba energie* na odlučování, daná u většiny odlučovačů pouze *tlakovou ztrátou* odlučovače;
- *investiční a provozní náklady*.

Jestliže připadá v úvahu použití více druhů odlučovačů, je nutno při volbě odlučovače vycházet z *celkového hodnocení odlučovače* na základě vyhodnocení různých *ukazatelů*. Základním předpokladem při volbě odlučovače je však (při jmenovitém provozním stavu) splnění zákonného *emisního limitu* pro tuhé znečišťující látky.

Třídění odlučovačů

Ve světě i u nás se ustálilo třídění odlučovačů do čtyř základních skupin, které lze dále podle některých společných vlastností dělit do následujících podskupin:

Suché mechanické odlučovače:

- gravitační;
- setrvačné;
- vírové;
- rotační.

Mokrý mechanické odlučovače:

- sprchové;
- setrvačné;
- vírové;
- proudové;
- pěnové;
- rotační.

Filtry:

- průmyslové;
- atmosférického vzduchu.

Elektrické odlučovače:

- komorové;
- trubové.

Základními odlučovacími principy u suchých mechanických odlučovačů jsou setrvačný, odstředivý a gravitační princip. U mokrých mechanických odlučovačů se využívá k odlučování částic setrvačný, případně odstředivý princip. U filtrů působí prakticky všechny odlučovací principy – difusní, intercepční, setrvačný, případně i elektrický. U průmyslových

filtrů po určité době provozu dochází k odlučování částic pouze na povrchu filtrační vrstvy, tvorbě tzv. filtračního koláče a následnému odlučování částic na vrstvě již odloučených částic. Elektrické odlučovače jsou založeny na využití elektrického principů.

5.4.7 Celková a frakční odlučivost

Úkolem každého odlučovače je odloučení příměsí z proudu plynu. Základní veličinou, charakterizující míru odloučení příměsí, je *celková odlučivost* O_c , nazývaná rovněž jako celková účinnost odlučování.

Označíme-li hmotnostní toky částic na přívodu (vstupu), výstupu a v záchytu jako \dot{M}_p , \dot{M}_v , \dot{M}_z , lze pro výpočet celkové odlučivosti použít některý ze vztahů (Hemerka, 1996)

$$O_c = \frac{\dot{M}_z}{\dot{M}_p} = \frac{\dot{M}_p - \dot{M}_v}{\dot{M}_p} = 1 - \frac{\dot{M}_v}{\dot{M}_p} = \frac{\dot{M}_z}{\dot{M}_z + \dot{M}_v}. \quad (5.4)$$

Protože *celkový průnik* P_c je definován jako

$$P_c = \frac{\dot{M}_v}{\dot{M}_p}, \quad (5.5)$$

platí s ohledem na výše uvedený vztah

$$P_c = 1 - O_c. \quad (5.6)$$

Hmotnostní toky částic na vstupu a výstupu se zpravidla určují měřením hmotnostní koncentrace částic C_p a C_v (většinou v jednotkách mg/m^3) a měřením objemových průtoků \dot{V}_p a \dot{V}_v (m^3/s). Potom lze vztah pro výpočet celkové odlučivosti psát ve formě

$$O_c = \frac{\dot{V}_p C_p - \dot{V}_v C_v}{\dot{V}_p C_p} = \frac{\dot{V}_{p,N} C_{p,N} - \dot{V}_{v,N} C_{v,N}}{\dot{V}_{p,N} C_{p,N}}, \quad (5.7)$$

kde indexy N označují příslušné veličiny při normálních podmínkách. Jestliže při průtoku plynu odlučovačem nedochází k jeho přisávání ani k částečnému odvádění, zjednoduší se vztah na

$$O_c = \frac{C_{p,N} - C_{v,N}}{C_{p,N}}. \quad (5.8)$$

Pokud nedochází při průtoku plynu ke změně teploty, lze při běžných tlakových ztrátách odlučovačů celkovou odlučivost vyjádřit přímo pomocí změřených koncentrací

$$O_c \doteq \frac{C_p - C_v}{C_p}. \quad (5.9)$$

Celková odlučivost O_c závisí na zrnitosti vstupujícího prachu, vyjádřené např. křivkou zbytků $Z_p(a)$, a na odlučovacích schopnostech odlučovače, vyjádřených při daném provozním stavu závislostí *frakční odlučivosti* na velikosti částice $O_f(a)$, tedy

$$O_c = f[Z_p(a), O_f(a)]. \quad (5.10)$$

Celková odlučivost proto není vlastností odlučovače. *Základní vlastností* odlučovače z hlediska jeho odlučovacích schopností je závislost $O_f(a)$, která udává, jak se za daného provozního stavu odlučují jednotlivé velikosti částic – *frakce*. Závislost $O_f(a)$ u jednotlivých druhů odlučovačů vychází z odlučovacích principů, které se při odlučování uplatňují. Lze ji vypočítat z příslušných kritériálních rovnic, nebo stanovit experimentálně.

5.4.8 Tlaková ztráta odlučovačů

Tlakovou ztrátu odlučovače lze po odlučovacích schopnostech hodnotit jako druhou nejdůležitější charakteristiku odlučovače, neboť u většiny odlučovačů představuje převážnou část spotřeby energie na odlučování a podstatnou měrou tak působí na ekonomii provozu.

Tlaková ztráta odlučovače Δp_z (Pa) je definována jako rozdíl celkových tlaků na vstupu a výstupu z odlučovače, lze tedy na základě Bernoulliho rovnice psát (Hemerka, 1996)

$$\Delta p_z = (v_1^2 - v_2^2) \frac{\rho}{2} + (p_1 - p_2), \quad (5.11)$$

kde indexy 1 a 2 se vztahují na vstupní, resp. výstupní průřez odlučovače, \mathbf{v} (m/s) je střední rychlost v uvažovaném průřezu, p (Pa) statický tlak a ρ (kg/m³) hustota plynu, zpravidla uvažovaná u odlučovačů jako konstantní, daná podmínkami na vstupu do odlučovače.

U většiny odlučovačů (suché mechanické, elektrické) se tlaková ztráta vyjadřuje pomocí *ztrátového součinitele* ξ_A jako

$$\Delta p_z = \xi_A \frac{v_A^2}{2} \rho, \quad (5.12)$$

kde v_A střední rychlost v určitém *charakteristickém průřezu* odlučovače, např. ve vstupním průřezu u gravitačních odlučovačů nebo fiktivní rychlost plynu ve válcové komoře u vírových odlučovačů.

Ztrátový součinitel ξ_A je obecně funkcí Reynoldsova kritéria Re , tedy $\xi_A = f(Re)$. Re bývá definováno jako

$$Re = \frac{v_A l \rho}{\eta}, \quad (5.13)$$

kde l (m) je charakteristický rozměr odlučovače, určující charakteristický průřez, např. průměr válcové komory u vírových odlučovačů. Protože průtok plynu má u většiny odlučovačů turbulentní charakter, jsou obvyklé provozní stavy odlučovačů již v oblasti automodelnosti ξ_A vůči Re a lze tedy předpokládat $\xi_A = \text{konst.}$ Pro tlakovou ztrátu potom platí, podobně jako při průtoku plynu potrubím,

$$\Delta p_z \sim v_A^2. \quad (5.14)$$

U některých druhů mokrých odlučovačů, kde se do proudu plynu vstříkuje voda (proudové odlučovače), dochází k urychlování kapaliny proudem plynu a tlaková ztráta je kromě součinitele ξ_A závislá i na měrné spotřebě vody m , tedy

$$\Delta p_z = f(\xi_A, m). \quad (5.15)$$

Odlišný charakter má tlaková ztráta filtrů. Zvláštní kapitolu tvoří proces zanášení filtrační vrstvy a postupný růst tlakové ztráty u filtrů atmosférického vzduchu, či změna tlakové ztráty u průmyslových filtrů v závislosti na cyklickém procesu zanášení a regenerace

filtrační textilie. Nehledě na tento proces změny tlakové ztráty filtrů uskutečněný zanášením, je tlaková ztráta závislá na objemovém průtoku plynu filtrační vrstvou, resp. na charakteristické rychlosti plynu ve vrstvě v . Protože tlaková ztráta u filtrační vláknité vrstvy vychází z aerodynamického odporu při obtékání vlákna a charakter proudění při obtékání vlákna je při nižších filtračních rychlostech laminární, je teoreticky $\Delta p_z \sim v$. Ve skutečnosti se u filtrů tlaková ztráta od této lineární závislosti mírně odchyluje a lze ji vyjádřit jako

$$\Delta p_z \sim v^n, \quad (5.16)$$

kde exponent n je blízký 1, $n > 1$.

5.4.9 Suché mechanické odlučovače

Suché mechanické odlučovače patří mezi nejstarší a v praxi rozšířené odlučovače. Jsou založeny na využití gravitačního, setrvačného a odstředivého principu k odlučování částic.

Charakteristickými vlastnostmi celé této skupiny odlučovačů jsou:

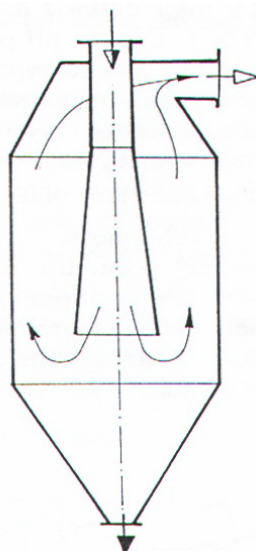
- jednoduchá konstrukce;
- provozní spolehlivost;
- nenáročnost na obsluhu a údržbu;
- nižší pořizovací náklady;
- nižší spotřeba energie;
- vhodnost i pro vyšší teploty plynu.

Nevýhodou těchto odlučovačů je nízká odlučivost pro jemné frakce. Mez odlučivosti různých typů těchto odlučovačů se pohybuje v širokém rozmezí velikosti $a_m = 2$ až $100 \mu\text{m}$. Měrná spotřeba energie je nízká a pohybuje se přibližně v mezích $K_p = 0,1$ až $0,3 \text{ kWh}/1000 \text{ m}^3$. Tlaková ztráta Δp_z se určuje pomocí součinitele vřazeného odporu ξ , vztaženého k dynamickému tlaku charakteristické rychlosti.

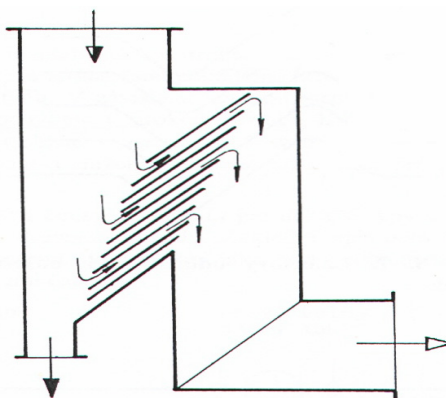
Tyto odlučovače samotně použité splňují jen výjimečně požadavky na emisní limity, a proto se většinou používají jako první stupeň u vícestupňových odlučovacích systémů k odloučení hrubších frakcí částic.

Jak již bylo uvedeno, rozdělují se suché mechanické odlučovače do čtyř skupin - na *gravitační, setrvačné, vírové a rotační*.

Gravitační odlučovače neboli tíhové odlučovače patří mezi nejjednodušší odlučovače, využívající k odloučení částic gravitačního principu. Nejběžnějším typem těchto odlučovačů je *usazovací komora*. Všeobecně lze gravitační odlučovače hodnotit jako odlučovače s nízkou odlučivostí, kde vhodnou volbou rozměrů lze docílit meze odlučivosti až $30 \mu\text{m}$. Gravitační princip odlučování lze kombinovat se setrvačným principem. Příkladem těchto odlučovačů jsou *prašníky* obr.5.9, obr. 5.10.



Obr. 5.9 Prašík – kombinace gravitačního a setrvačného odlučovaciho principů



Obr. 5.10 Gravitační a setrvačný předodlučovač

Setrvačné odlučovače jsou založeny na využití setrvačného principu při průtoku plynu vhodně profilovanými překážkami. Patří sem tzv. *lamelový setrvačný odlučovač*, *žaluziový odlučovač*. Nevýhodou těchto typů odlučovačů je nevhodnost pro vysoké koncentrace a pro lepidivé a abrazivní prachy. Jako výhodné se jeví ukazatele měrné spotřeby materiálu a měrné prostorové ukazatele. Žaluziový odlučovač vyžaduje doplňkové zařízení pro odloučení částic z dílčího proudu.

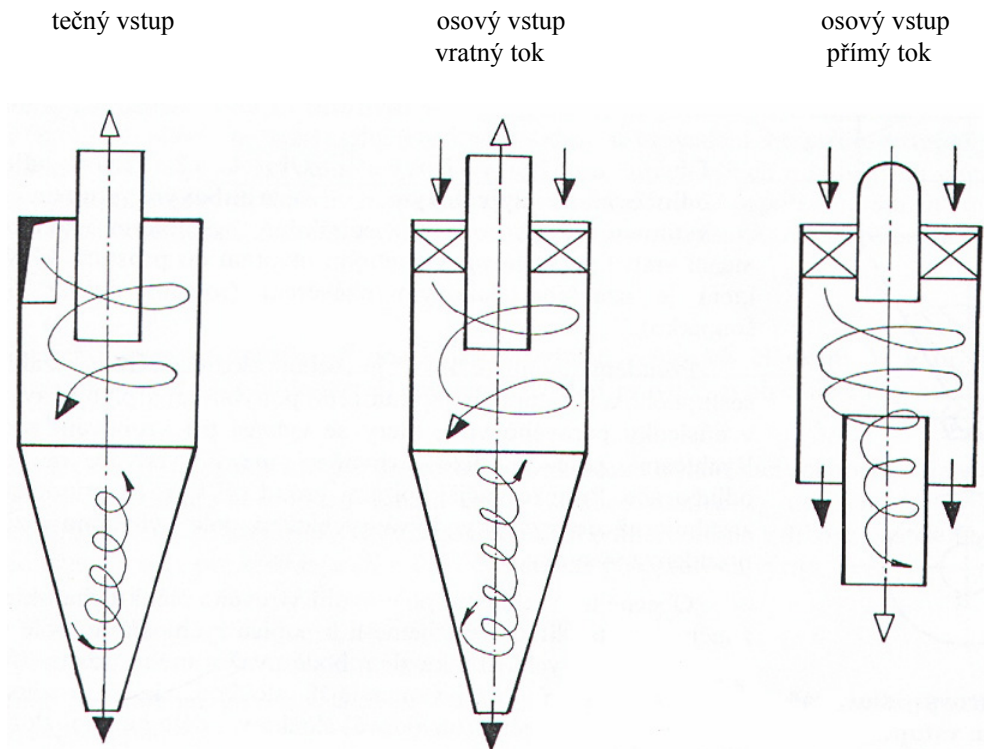
Vírové odlučovače neboli *cyklony*, patří mezi široce rozšířené suché mechanické odlučovače. Tyto odlučovače patří mezi nejstarší druhy a od svého prvního uplatnění již v 19. století prošly dlouholetým konstrukčním vývojem, takže dnes existuje celá řada různých typů a provedení obr. 5.11.

Základem všech typů je využití odstředivé síly na částice při spirálním průchodu plynu válcovou a případně i kuželovou částí odlučovače a vyvolává v radiálním směru relativní rychlost částice, kolmou k odlučovacím plochám.

Charakteristickými znaky vírových odlučovačů je jednoduchá konstrukce, malá spotřeba materiálu, nenáročná obsluha a snadná údržba, poměrně malá tlaková ztráta. Jsou použitelné pro náročnější provoz při vyšších koncentracích částic i vyšších teplotách plynu.

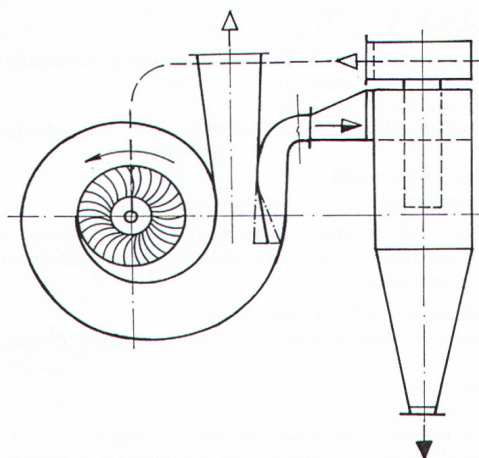
Nevýhodou těchto odlučovačů je náchylnost k zalepování, snížená životnost při použití pro abrazivní prachy a nízká odlučivost pro jemné částice.

Jako samostatné odlučovače vyhoví dnes zákonným emisním limitům jen některé typy a pouze u vybraných technologií. Základní uplatnění vírových odlučovačů lze spatřovat jako součást odlučovacího systému, kde působí jako první odlučovací stupeň zejména u technologií s vysokými vstupními koncentracemi částic.



Obr. 5.11 Základní typy vírových odlučovačů – článků

Rotační odlučovače se u nás prakticky nevyskytují. Jsou charakteristické tím, že část odlučovače vykonává *rotační pohyb* a přivádí plyn do rotace. Podle způsobu, jakým se plyn přivádí do rotace, dělíme tyto odlučovače na typy *odstředivkové* a *ventilátorové* obr. 5.12.



Obr. 5.12 Ventilátorový typ rotačního odlučovače

5.4.10 Mokrý mechanický odlučovač

Mokrý mechanický odlučovač jsou založeny na využití setrvačného a odstředivého odlučovacího principu. K odloučení částic do kapaliny dochází v zásadě čtyřmi způsoby:

- odloučením částic na kapičkách vlivem setrvačného principu;
- odloučením částic na smáčeném povrchu obtékaných těles vlivem setrvačného, resp. odstředivého principu;
- odloučením částic na hladině kapaliny vlivem setrvačného principu;
- odloučením částic na povrchu bublin plynu při průchodu plynu vrstvou kapaliny.

Podle typického způsobu vytvoření kontaktního povrchu plyn – kapalina (odlučovací plocha) a uplatňujícího se odlučovacího principu se mokrý mechanický odlučovač rozdělují do šesti základních podskupin: sprchové, setrvačné, vírové, pěnové, proudové a rotační.

Mezi kladné charakteristické znaky mokrých odlučovačů patří tyto vlastnosti:

- v porovnání se suchými mechanickými odlučovači se dosahuje vyšších odlučivostí pro jemné částice;
- jsou vhodné i pro lepkavé a abrazivní částice;
- současně s tuhými částicemi lze zachycovat i plynné znečišťující látky;
- mohou se použít i pro vysoké koncentrace částic;
- kondenzace plynu nenarušuje odlučovací proces, ale spíše jej v oblasti jemných částic zlepšuje;
- jsou vhodné i pro odlučování výbušných prachů, neboť se minimalizuje vznik nebezpečných koncentrací;
- v porovnání s průmyslovými filtry i elektrickými odlučovači jsou vhodnější měrné ukazatele obestavěného prostoru;
- v okolí odlučovačů se dosahuje nízká povrchová prašnost.

Mezi nevýhody mokrých odlučovačů patří:

- spotřeba vody na odpar, která může být limitujícím faktorem při odlučování plynů o vyšší teplotě;
- potřeba kalového hospodářství;
- nebezpečí koroze;
- nebezpečí zamrzání;
- vyšší tlaková ztráta u některých typů odlučovačů;
- nežádoucí ochlazení plynu před jeho vypouštěním do atmosféry;
- nevhodnost použití pro cementující prachy;
- náročnost na obsluhu a údržbu.

Důležitým předpokladem použití mokrých odlučovačů pro daný prach je jeho dobrá *smáčivost*. Z provozních důvodů (nežádoucí tvorba pěny) i z finančních důvodů se smáčivost

částic zpravidla neupravuje, a proto je přirozená smáčivost částic limitujícím faktorem použitelnosti těchto mechanických odlučovačů.

Charakteristickým ukazatelem mokrých odlučovačů je *měrná spotřeba vody* m (l/m^3), definovaná jako poměr množství přivedené vody k objemu plynu

$$m = \frac{V_v}{V_p}, \quad (5.17)$$

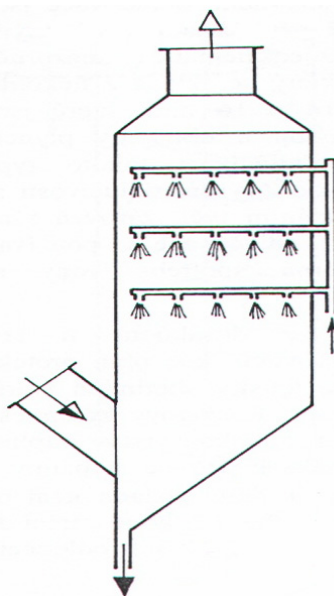
Čím větší je u daného typu odlučovače hodnota m , tím větší lze dosáhnout kontaktní plochu mezi znečištěným plynem a kapalinou a tím větší bývá i odlučivost. Na druhé straně se zvyšuje i spotřeba energie na dezintegraci kapaliny. Jednotlivé druhy odlučovačů mají měrnou spotřebu vody rozdílnou. Pohybuje se od několika desetin až do několika l/m^3 .

Nedílnou součástí mokrého odlučovače je *kalové hospodářství*. Pouze výjimečně se u malých jednotek používá průtoková voda, většinou voda cirkuluje a k oddělení vody od odloučených částic se používají kalové nádrže a usazený kal se odstraňuje vyhrabávacím zařízením. Do cirkulujícího vodního okruhu je nutno dodávat určité množství doplňkové vody ke krytí odpařené vody a vody odvedené s kalem. Odpar závisí zejména na dvou parametrech – teplotě plynu a velikosti kapiček - a jak již bylo řečeno, bývá limitujícím faktorem pro použití mokrých odlučovačů při vyšších teplotách plynu.

Tlaková ztráta mokrých mechanických odlučovačů je velmi rozdílná a pohybuje se v širokém rozmezí $\Delta p_z = 100 \text{ Pa}$ až 10 kPa . Rozdílným hodnotám měrné spotřeby vody m i tlakové ztráty Δp_z odpovídá i široký rozsah hodnot měrné spotřeby energie K_p , která se pohybuje od několika desetin do cca $5 \text{ kWh}/1000 \text{ m}^3$. Velikost meze odlučivosti a_m se rovněž pohybuje v poměrně širokém rozmezí hodnot, od několika desetin do několika μm . Z uvedeného vyplývá, že mokré mechanické odlučovače jsou charakteristické širokým rozsahem hodnot uvedených ukazatelů.

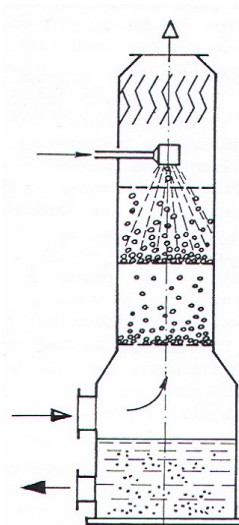
Mokré mechanické odlučovače, jak již bylo uvedeno, rozdělujeme na: sprchové, setrvačné, vírové, proudové, pěnové a rotační.

Mezi nejjednodušší druhy mokrých odlučovačů patří *sprchové odlučovače*, kde je odlučování částic založeno na využití setrvačného principu při obtékání kapek plynem, obr. 5.13.



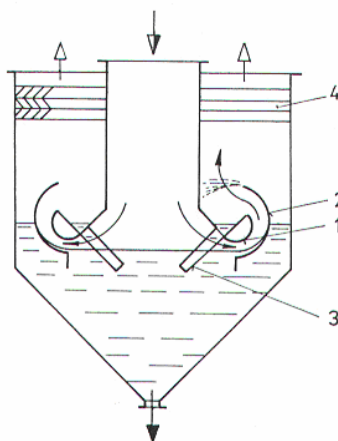
Obr. 5.13 Sprchová věž

Jedním z nových progresivních typů odlučovačů, které lze využít jak k odlučování tuhých, tak i plynných příměsí, je *odlučovač se skrápěnou pohyblivou vrstvou*, obr. 5.14.



Obr. 5.14 Odlučovač se skrápěnou pohyblivou vrstvou

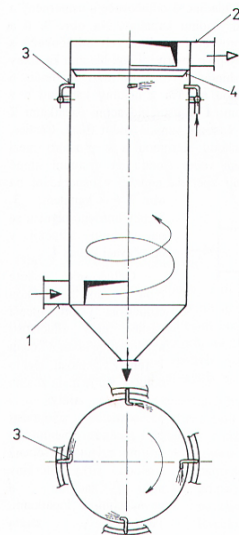
Mezi nejznámější a nejvíce rozšířené mokré setrvačné odlučovače patří *hladinové odlučovače*. Tento typ lze dále rozdělit na dvě základní provedení, a to s kolmým a tečným přívodem plynu, obr.5.15. Uspořádání odlučovače s kolmým přívodem plynu proti hladině kapaliny je méně časté.



Obr. 5.15 Hladinový odlučovač s tečným přívodem plynu

Legenda: 1, 2 - naváděcí a usměrňovací lopatky plynu, který s sebou strhává z hladiny kapalinu,
3 – kanál, kterým stékají částice s kapalinou zpět do nádrže,
4 - odlučovač kapek.

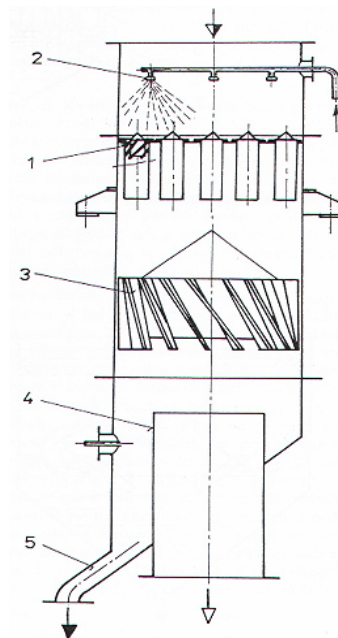
Mokré vírové odlučovače lze podle způsobu přívodu kapaliny a provedení vírových článků v zásadě rozdělit na dvě různá provedení. U prvního provedení zajišťuje přívod kapaliny (vody) pouze *smáčení stěn* odlučovací komory, takže částice se po odloučení na stěnu odvádějí ve formě kalu, obr.5.16.



Obr. 5.16 Mokrý vírový odlučovač se smáčenými stěnami

Legenda: 1 - tangenciální vstup plynu v spodní části válcové odlučovací komory,
 2 - tangenciální odvádění vyčištěného plynu, který proudí spirálovým pohybem vzhůru,
 3 - přívod vody tryskami v horní části komory.

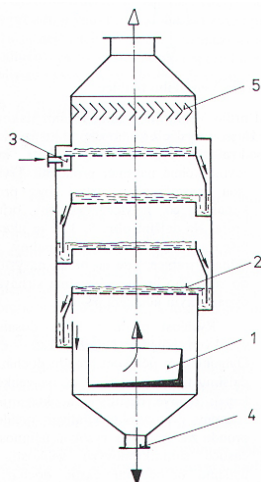
Příklad tohoto druhého provedení, mokrého vírníkového odlučovače, je na dalším obrázku 5.17. Jako vírové články jsou použity tzv. vírníky, články s axiálním vstupem a přímým tokem, kde rotaci plynu zajišťují lopatky na vstupu.



Obr. 5.17 Mokrý vírníkový odlučovač

Legenda: 1 - vírníky, články s axiálním vstupem a přímým tokem plynu,
 2 - trysky přívodu kapaliny,
 3 - odlučovač kapek,
 4 - středová odváděcí trubka čistého plynu,
 5 - výtoková trubka kalu.

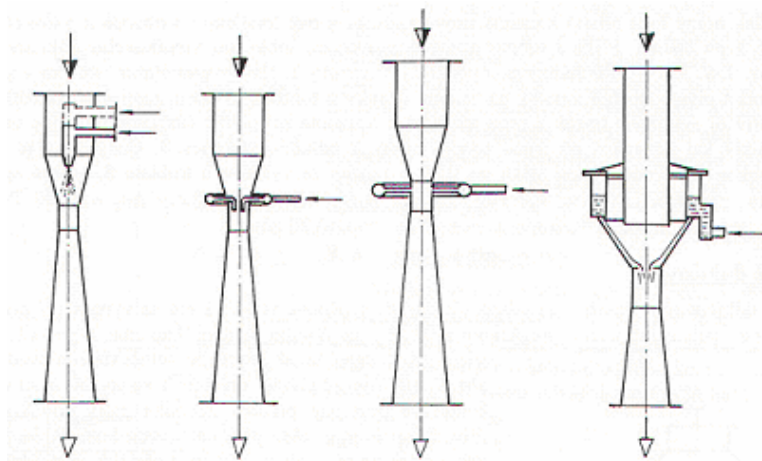
Pěnový odlučovač je založen na odlučování částic v *pěnové vrstvě*, která vytváří při průchodu plynu vhodnou rychlostí porézní překážkou (roštem), na kterou natéká kapalina, zpravidla voda, obr. 5.18.



Obr. 5.18 Pěnový odlučovač

- Legenda: 1 - přívod plynu ve spodní části válcové komory,
 2 - plyn protéká několika patry odlučovače,
 3 - přívod kapaliny přes nátokovou komoru,
 4 - odvádění kalu hrdlem,
 5 - odlučovač kapek

Z mokrých odlučovačů nejvyšších odlučivostí, ale i nejvyšší tlakové ztráty, se dosahuje u *proudových odlučovačů*. U těchto typů se k odlučování využívá setrvačný odlučovací princip při vysoké relativní rychlosti mezi plynem obsahujícím částice a kapalinou, která se různým způsobem přivádí do hrdla Venturiho trubice. Některé ze způsobů řešení přívodu kapaliny jsou uvedeny na obrázku 5.19.



Obr. 5.19 Některé ze způsobů řešení přívodu kapaliny do hrdla Venturiho trubice

5.4.11 Filtry

Filtrační zařízení pro odlučování tuhých částic z nosných plynů vytváří velice široký sortiment odlučovacích zařízení, které lze rozdělit do dvou základních oblastí – *filtraci atmosférického vzduchu a filtraci průmyslovou*. Obě tyto oblasti mají sice společný teoretický základ ve formě odlučování částic ve *vláknité či zrnité vrstvě*, vlastní provedení, vstupní parametry plynu a částic, místa záchytu částic ve filtrační vrstvě, regenerace se však podstatně liší.

Filtrace atmosférického vzduchu se používá ve větrání a klimatizaci, při úpravě pracovního prostředí, při úpravě vzduchu u vysoce účinné technologické filtrace (čisté prostory). Maximální vstupní koncentrace částic se zde pohybuje v jednotkách mg/m^3 , teplota vzduchu se blíží standardním podmínkám. Částice se odlučují ve vrstvě (hloubková filtrace) a filtrační materiály se s výjimkou hrubých filtrů neregenerují.

U filtrace průmyslové se maximální koncentrace částic pohybuje v jednotkách g/m^3 , částice bývají zpravidla větší než u atmosférického prachu, teplota plynů může dosáhnout až několika set °C. Částice se po určité náběhové době odlučují na povrchu filtračního materiálu (povrchová filtrace) a dochází k vytváření vrstvy odloučených částic – filtračního koláče, který se v přiměřených časových intervalech odstraňuje – filtrační materiál se regeneruje.

Při filtraci atmosférického vzduchu i u filtrace průmyslové se mohou uplatnit prakticky všechny odlučovací principy. Filtraci lze všeobecně charakterizovat jako odlučovací proces, při kterém lze dosáhnout nejvyšších odlučivostí i pro submikronové částice, ovšem za cenu vysokých pořizovacích i provozních nákladů a velkých prostorových nároků. Základní omezení průmyslové filtrace vyplývá z omezené teplotní a chemické odolnosti filtračních materiálů vůči nosnému plynu i odloučeným částicím.

Filtry atmosférického vzduchu

Podle způsobu provedení se filtry atmosférického vzduchu rozdělují na *vložkové a pásové*, další základní dělení podle případného použití smáčecí kapaliny je na *suché a smáčené*. U vložkových filtrů je filtračním členem jedna nebo více výměnných vložek, u pásových filtrů je filtračním členem posuvný pás filtračního materiálu.

Filtrace průmyslová

Základem účinné průmyslové filtrace je kvalitní filtrační vrstva, která v samém počátku filtrace zabraňuje pronikání částic vrstvou. Vzhledem k vysokým koncentracím a zpravidla větším částicím než při filtraci atmosférického prachu se velmi rychle zaplňují póry na čelní straně vrstvy, částice se zpravidla odlučují na již odloučených částicích a dochází tak k vytváření shluků plošného charakteru. Tímto způsobem dochází velmi rychle k přemostění vláknité vrstvy částicemi a jsou vytvořeny podmínky k vytvoření tzv. *filtračního koláče*. K dalšímu odlučování částic dochází pak síťovým efektem na vrstvě již odloučených částic, takže další změna tlakové ztráty je úměrná tloušťce filtračního koláče. Při překročení určité tlakové ztráty, dané zejména mechanickými vlastnostmi filtračních materiálů, je nutno filtrační vrstvu regenerovat.

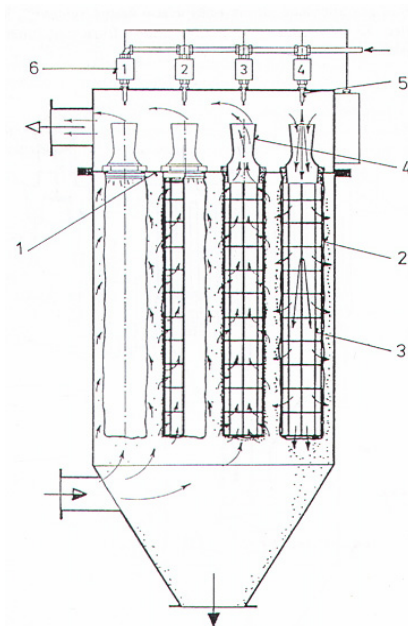
Filtrační materiály používané pro průmyslovou filtraci lze v zásadě rozdělit do tří skupin – *filtrační textilie, zrnité vrstvy a porézní hmoty*. Dominantní postavení mezi filtračními materiály zaujímají filtrační textilie. Jsou to vláknité vrstvy vyráběné *tkaním* nebo *vpichovací technologií*. Tkaním se dnes vyrábějí filtrační materiály většinou pouze pro vysoké teploty z teplotně odolných vláken (skleněná, uhlíková, kovová). Většina filtračních textilií se vyrábí vpichovací technologií.

Při volbě filtrační textilie je nutno sledovat několik základních hledisek: strukturu filtrační vrstvy a dále mechanické, tepelné, chemické a elektrické vlastnosti vrstvy.

Struktura filtrační vrstvy (průměry vláken, poréznost a rovnoměrnost vrstvy, tloušťka vrstvy) rozhoduje zejména o odlučovacích schopnostech a tlakové ztrátě. *Mechanické vlastnosti* závisí kromě struktury vrstvy na materiálu vláken a zejména technologii výroby a rozhodují o životnosti textilie a způsobu regenerace. *Tepelné a chemické vlastnosti* jsou určeny materiálem vláken a rozhodují o životnosti textilie. *Elektrické vlastnosti* závisí rovněž na materiálu vláken a jsou důležitou vlastností při filtraci výbušných prachů nebo lze těchto vlastností využít ke zvýšení odlučovacích schopností vrstvy.

Při volbě filtrační textilie, ale i obecněji filtračního materiálu, je nutno přihlédnout i k fyzikálně-chemickým vlastnostem odlučovaných částic, jako jsou: velikost částic, koncentrace, abrazivní vlastnosti, chemické působení částic na filtrační materiál, lepidlost, navlhavost, elektrické vlastnosti. Rovněž je nutno přihlédnout k vlastnostem nosného plynu jako jsou:

- nejnižší a zejména nejvyšší možná teplota plynu;
- vlhkost plynů a teplota rosného bodu;
- výskyt plynů, které mohou napadat svými chemickými účinky filtrační materiál;
- přítomnost par kyselin, zásad a rozpouštědel;
- přítomnost výbušných plynů.



Obr. 5.20 Hadicový filtr s regenerací pulsním profukem

- Legenda:
- 1 - dělicí rovina mezi znečištěnou a čistou částí filtru,
 - 2 - na přírubách jednotlivě zavěšeny hadice, filtrace probíhá zvenku dovnitř,
 - 3 - drátěné vestavby, na kterých jsou nasunuty hadice, které brání zborcení filtrační plochy,
 - 4 - dýzové nástavce, kterými protéká vyčištěný plyn,
 - 5 - dýzy kterými se přivádí tlakový vzduch na regeneraci filtrační textilie,
 - 6 - solenoidové ventily

Filtry průmyslové

Provedení průmyslových filtrů je velmi rozmanité a závisí na použitém druhu filtračního materiálu a způsobu regenerace. Nejběžnějším filtračním materiálem jsou filtrační textilie s různou teplotní odolností. U těchto filtrů je filtrační plocha uspořádána do tvaru hadic nebo hlubokých kapes. Podle toho se filtry dělí na *hadicové* (obr.5.20) a *kapsové*. Jestliže filtrační materiál tvoří zrnitá vrstva, hovoříme o filtrech se *zrnitou vrstvou*. V poslední době se v praxi začínají více používat i filtry se *slinutou porézní filtrační vrstvou*.

Základní způsob *regenerace* u hadicových a kapsových filtrů je *zpětný proplach* nebo *pulsní profuk*. U hadicových filtrů lze regeneraci zpětným proplachem navíc kombinovat s *mechanickými způsoby* – kmitavým pohybem hadic v podélném směru nebo vytřásáním v rovině kolmé k ose hadic. V případě filtrace hrubších částic, jako je tomu např. u hrubého dřevního odpadu, lze u hadicových filtrů zajistit dostatečnou regeneraci pouze mechanickými způsoby.

První *hadicový filtr* s regenerací zpětným proplachem byl vyroben již na konci 19. století. Hadicové filtry se vyrábějí v kruhovém nebo řadovém uspořádání. U kruhového uspořádání jsou hadice uspořádány v kruhové komoře, přičemž komora je z důvodů regenerace rozdělena na několik sektorů.

5.4.12 Elektrické odlučovače

Elektrické odlučování je proces, při kterém jsou tuhé či kapalné částice odstraňovány z nosného plynu na základě působení *elektrických sil*. Pro elektrické odlučovače se často používá i nepřesný název elektrostatické odlučovače. Elektrické pole vytvořené u odlučovačů mezi elektrodami je sice elektrostatické, pohybem iontů a nabitých částic však vzniká mezi elektrodami proud, takže název elektrostatický odlučovač není zcela přesný.

První elektrické odlučovače byly použity na počátku tohoto století a od té doby se staly nejrozšířenějšími odlučovači pro čištění plynů s vysokými objemovými průtoky. Prakticky dominantní je dnes jejich použití v energetice u velkých zdrojů při čištění plynů ze spalovacích procesů.

Typickými vlastnostmi elektrických odlučovačů jsou:

- vyšší odlučovací schopnosti i pro jemné částice;
- nízká tlaková ztráta do 200 Pa, daná spíše ztrátami v rozvodech než při průchodu plynu vlastním odlučovačem;
- vhodnost pro velké objemové průtoky plynů;
- nízká měrná spotřeba energie 0,06 až 0,25 kWh/1000 m³;
- možnost použití i pro vysoké teploty plynů;
- menší citlivost na abrazivní částice;
- vysoké investiční náklady;
- vysoké nároky na půdorysný i obestavěný prostor;
- náročnost na obsluhu a údržbu, nutnost kvalifikované obsluhy;
- omezená vstupní koncentrace prachu, $C_{\max} \approx 100 \text{ g/m}^3$;
- citlivost na změny ve složení prachu (měrný elektrický odpor);

- nevhodnost pro odlučování prachu s vysokým nebo naopak s příliš nízkým měrným elektrickým odporem.

K účinnému elektrickému odlučování musí být splněny některé základní podmínky, které lze spolu s dosud uvedenými poznatky shrnout do následujících bodů.

- Vnější silou, která rozhoduje o konečné odlučovací rychlosti u usazovacích elektrod je elektrická Coulombova síla.
- Částice musí být nabitá na náboj opačné polarita, než je polarita usazovacích elektrod.
- U usazovacích elektrod musí být vytvořena dostatečně vysoká intenzita elektrického pole.
- K monopolárnímu nabití částic musí nosný plyn obsahovat volné ionty dané polarita, tj. v nosném plynu musí existovat monopolární prostorový náboj iontů.
- Zdrojem volných iontů je elektrický výboj v silně nehomogenním elektrostatickém poli, označovaný jako korona.
- Větší částice ($a > 1 \mu\text{m}$) získávají v elektrickém poli náboj z prostorového náboje iontů převážně pohybem iontů po siločarách. Částice musí mít vhodné dielektrické vlastnosti, vyjádřené hodnotou permitivity částice.
- Menší částice získávají z prostorového náboje iontů náboj převážně difusí iontů.
- Částice nesmí mít ve vrstvě ani příliš nízký měrný elektrický odpor ρ_v . Jinak dochází na usazovacích elektrodách ke vzniku zpětné korony, respektive k odskakování částic. Oba jevy mají za následek snížení odlučivosti zařízení.

Provedení elektrických odlučovačů

Podle uspořádání soustavy elektrod se odlučovače dělí na *komorové* a *trubové*. U komorových odlučovačů jsou elektrody uspořádány dle obrázku 13 a odlučovač se skládá z více paralelně řazených komor.

Trubové odlučovače se skládají z odlučovacích prvků, z nichž každý je tvořen osově symetrickou válcovou nebo voštinovou sběrací elektrodou, v jejíž ose se nachází jedna elektroda vysokonapěťová (ionizační). Po stránce elektrické i z hlediska průtoku plynu jsou jednotlivé prvky řazeny paralelně.

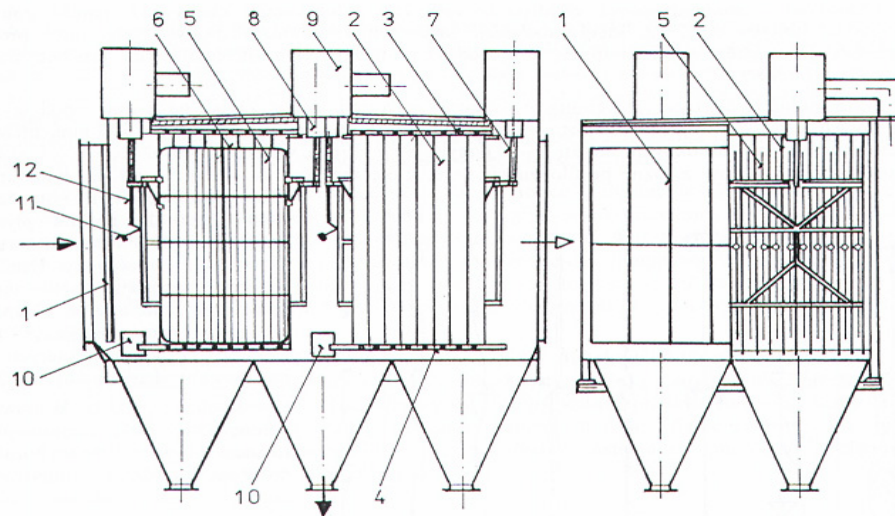
Podle směru průtoku plynu se odlučovače dělí na *horizontální* (většina komorových) a *vertikální* (trubové). Podle způsobu odvodu odloučených částic z usazovacích elektrod lze rozlišovat odlučovače *suché* a *mokrě*. Podle toho, zda je či není u odlučovače oddělena zóna ionizační od zóny odlučovací, dělíme odlučovače na *dvouzónové* (odlučovače s předřazenou ionizací) a *jednozónové*.

Komorové odlučovače se ve směru průtoku plynu zapojují po elektrické stránce do *sekcí*. Maximální počet sekcí bývá čtyři až pět, každá sekce má samostatné napájení zpravidla různě vysokým napětím. U větších objemových průtoků lze odlučovače řadit i dva vedle sebe. Takové uspořádání se nazývá *zdvojené*. Nové konstrukce elektrických odlučovačů pro střední objemové průtoky (kotelny) jsou *modulové* a požadovaná velikost odlučovače se volí vhodnou volbou počtu paralelně řazených modulů.

Podle oblasti použití se elektrické odlučovače dělí na odlučování částic z průmyslových odpadních plynů a odlučování částic z atmosférického vzduchu v pracovním prostředí.

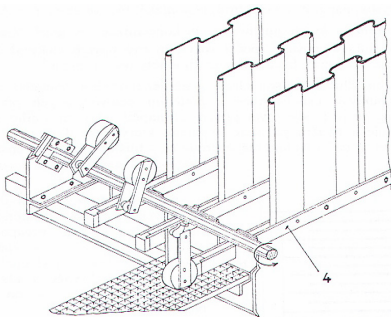
Nejrozšířenější typ elektrických odlučovačů pro čištění odpadních plynů je suchý horizontální komorový odlučovač. Trubové odlučovače se v praxi používají pouze

ve speciálních případech pro odlučování kapalných příměsí, jako dehtu, olejů a mlhy z různých technologií (koksárenský a generátorový plyn, výroba kyseliny sírové). Tyto odlučovače mají jen jednu sekci elektrod a jsou tvořeny paralelně řazenými troubami o poloměru 100 až 125 mm, případně šestihrannými voštinami.

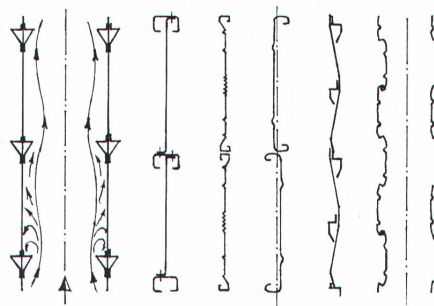


Obr. 5.21 Schéma suchého horizontálního komorového elektrického odlučovače

- Legenda: 1 - rozváděcí lopatky, které usměřují proudění plynu do vstupního a případně i výstupního průřezu
 2 - ve skříni rovnoběžně umístěné usazovací elektrody, které tvoří soustavu komor (detail na obr. 5.22)
 3 - svisle uspořádané profilované pásy usazovacích elektrod, které jsou pomocí čepů zavěšeny na podélném závěsném trámci
 4 - v dolní části jednotlivé pásy pevně uchyceny na oklepávací trámec
 5 - vysokonapěťové elektrody zavěšené v trubkovém rámu
 6 - trubkový rám uprostřed mezi usazovacími elektrodami
 7 - závěsné trubky
 8 - izolátory s ochrannou trubkou
 9 - bučky, ve kterých jsou izolátory s ochrannou trubkou
 10 - oklepávací mechanismus usazovacích elektrod (detail na obr. 14)



Obr. 5.22 Ukázka řešení vedení oklepávacích trámců a oklepávání předpádávajícími kladivky



Obr. 5.23 Příklady provedení pásů usazovacích elektrod

5.4.13 Odlučování plynných emisí

Pro separaci plynných škodlivin a aerosolů jsou používány následující technologické postupy:

- *absorpce* (fyzikální, s chemickou reakcí);
- *adsorpce* (fyzikální, s chemickou reakcí);
- *spalovací procesy* (termické, katalytické, selektivní);
- *kondenzační* (kryogenní technika);
- *biotechnologie* (biologická destrukce kontaminantů).

Nejrozšířenější technologie čištění odpadních plynů je absorpce – zejména pro svoji univerzálnost. Při absorpci je možné zachycovat současně škodliviny plynného charakteru, kapalně aerosoly i tuhé znečišťující látky (Pětioký, 1997).

Absorpce

Absorpce je pochod, při němž je plynná složka odstraňovaná z čištěné plynné směsi a pohlcována vhodnou kapalinou. Převod hmoty z plynu do kapaliny se uskutečňuje difusí. Podmínkou sdílení hmoty mezi oběma fázemi je, že nesmějí být v rovnovážném stavu, tj. koncentrace odstraňované složky je větší v plynné fázi než ve fázi kapalně. Plynnou směs, z níž chceme absorpcí oddělit určitou složku, přivedeme do kontaktu s absorbující látkou. Pohlcovaná složka přechází z čištěného plynu ve směru nižší koncentrace. Absorbující látka musí být dostatečně selektivní, aby pohlcovala pokud možno pouze složku, kterou je třeba odstranit a k zbývající plynné směsi byla inertní

Rychlost absorpce je ovlivňována různými faktory, především tlakem a teplotou. Se stoupajícím tlakem rychlost absorpce vzrůstá. Závislost na teplotě je většinou velmi významná. Absorpce probíhá lépe za nižších teplot.

Opačným procesem je *exsorpce*. Změnou podmínek, např. snížením tlaku nad kapalinou nebo zvýšením teploty absorpčního roztoku, se pochod obrátí a pohlcovaný plyn se z kapaliny uvolňuje. To umožňuje provést absorpci s exsorpčí jako cyklický proces s koncentrováním a využitím odlučované složky, která by při své původní koncentraci v čištěném plynu nebyla využitelná.

K absorpci škodlivin se často používá roztoků vhodných látek, s nimiž zachycovaná složka plynné směsi reaguje za vzniku nové chemické sloučeniny nebo několika sloučenin, čímž je vázána v kapalině. V takových případech se může k jejímu uvolnění použít rozklad nebo vytěsnění jinou látkou.

Absorpce ovšem nemusí probíhat pouze v kapalině nebo v roztoku účinné látky. V některých případech lze provést absorpci v suspenzi účinné látky, tj. ve směsi tuhé látky a kapaliny, která ji nerozpouští. Příkladem je použití suspenze mletého vápence k pohlcování kyselých plynů, např. oxidu siřičitého (Bretschneider, Kurfürst, 1978).

Adsorpce

Adsorpci nazýváme difusní pochod, při němž dochází k zvýšení koncentrace plynné nebo kapalně látky na fázovém rozhraní, a to jejím vázáním na povrchu vhodné tuhé nebo kapalně látky.

Adsorpce může probíhat tak, že se molekuly adsorbované látky zachycují na povrchu tuhé látky působením van der Waalsových sil při teplotě vyšší, než je teplota kondenzace. Mezi molekulami adsorbované látky a adsorbentu přitom nenastává chemická interakce ani se

nevytváří chemická vazba. Takový pochod se nazývá *fyzikální adsorpce*. Povrch tuhé látky se při ní pokrývá vrstvou molekul adsorbované látky, přičemž může dojít k pokrytí povrchu adsorbentu mnoha vrstvami molekul adsorbované látky. Fyzikální adsorpce probíhá nejčastěji velmi rychle a vybavuje se při ní teplo, které se většinou rovná 1,5 až 2 násobku tepla kondenzačního. Vázanou látku lze snadno opačným pochodem (desorpcí) uvolnit (např. snížením tlaku nebo zvýšením teploty), adsorpční hmotu znovu využít v cyklickém procesu a uvolněnou látku dále zpracovávat nebo přímo využívat.

Je-li adsorbující látka pórovitá a póry jsou větší, než je průměr molekul adsorbované látky, mohou její molekuly vnikat do pórů sorbentu a zachycovat se na povrchu pórů. Sorpční kapacita se tím může mnohonásobně zvětšit. U kondenzovatelných plynů a par mají póry další význam. V dostatečně úzkých pórech (jednotky až desítky nm) nastává zkapalnění páry za nižšího tlaku, než je tlak nasycené páry za dané teploty. Tento mechanismus vázání páry v pórech se nazývá *kapilární kondenzace*. Sorpční kapacita se tímto způsobem významně zvětšuje.

Proto jsou pro vázání škodlivých plynů a par výhodné pórovité látky, které mají obrovský aktivní povrch. Tak např. 1 g aktivního uhlí může mít povrch až 1000 m² i větší. Mezi adsorbenty tohoto charakteru patří dále *silikagel*, *molekulová síta (syntetické zeolity)*, *alumina*, *bentonit* atd.

Druhý případ adsorpce je tzv. *chemisorpce*, při níž dochází k přenosu nebo sdílení elektronů mezi adsorbovanou látkou a adsorbentem jako v chemických sloučeninách. Jelikož dochází k chemické reakci mezi adsorbovanou a adsorbující látkou a ke vzniku v podstatě nové povrchové sloučeniny, je uvolněné teplo zpravidla podstatně vyšší než při fyzikální adsorpci a dosahuje řádově desítek až stovek kilojoulů na mol. Vazba chemisorbované látky na povrch sorbentu bývá tak pevná, že většinou jde o nevratný pochod, tj. chemisorbovanou látku nelze převést zvýšením teploty nebo snížením tlaku zpět do plynné fáze. Často dochází k rozpadu molekuly na povrchu adsorbentu na menší celky (fragmentace molekul). Při chemisorpci se molekuly zachycované látky vážou na povrchu tuhé látky, a proto zreaguje pouze povrchová vrstva tuhé látky a uvnitř jejich částic zůstává nevyužitá hmota nezreagovaného jádra. Proto se účinný povrch chemisorpční látky zvětšuje např. tím, že se účinná látka nanáší v tenké vrstvě na jemně rozptýlený inertní nosič.

Z obecného vztahu povrchu k objemu částic vyplývá, že sorpční kapacita je tím větší, čím jsou částice adsorbentu menší. V praxi má ovšem zvyšování povrchu částic snižováním jejich velikosti určité meze dané jednak technickými podmínkami, zejména parametry adsorpčního zařízení, jednak ekonomickými podmínkami, tj. náklady na dezintegraci drcením, mletím ap.

Spalovací procesy

Termické odbourávání kontaminantů (spalování) spočívá v oxidaci organických příměsí vzdušným kyslíkem za vysokých teplot na CO₂ a H₂O. Technologie dosahuje účinnost přes 90 % a může pracovat v širokém rozpětí koncentrace škodlivin.

Proces může být realizován na katalyzátoru při nižších teplotách nebo bez katalyzátoru (termické spalování) při vyšších teplotách. Katalytické spalování probíhá při teplotách cca 350 až 500 °C.

Vzhledem k nižším provozním teplotám je energetická náročnost procesu menší, ale tato skutečnost je převážena vysokou pořizovací cenou katalyzátoru, jeho omezenou životností a nebezpečím tzv. „otravy katalyzátoru“, tj. stavu, kdy katalyzátor je znečištěn

prachem nebo výpary jiných látek a prakticky okamžitě ztrácí svou funkci. Z výše uvedených důvodů se tento proces příliš nerozšířil.

Termické spalování probíhá při teplotách 800 až 1000 °C a v klasické podobě je energeticky vysoce náročné. V současné době jsou dodávány systémy regenerativní, které rekuperují až 96 % vložené tepelné energie. Spalování probíhá ve více komorách, přičemž směr průtoku plynu jednotlivými spalovacími prostory se mění v intervalu cca 60 až 120 vt. a spalovaný plyn je vždy vyhříván vytopenou komorou. Zařízení musí mít dokonalý systém přepojovacích klapek, aby nedocházelo k průstřelům nezoxidovaného (nespalovaného) plynu. Použité vyzdívký umožňují provozní start zařízení za cca 60 až 90 min. Odpadá tak energeticky a časově náročné najíždění a odstavování zařízení.

Jsou dodávány jednotky o výkonu od 1000 do 100 000 m³/h. Jedná se o perspektivní systém zpracování organických látek s předpoklady rychlého rozšíření.

Technologie je vhodná pro separaci škodlivin organických kontaminantů z lakoven a sušáren nalakovaných výrobků, laminoven a pod., zejména tam, kde jsou používána organická rozpouštědla typu benzen, toluen, xylen, aceton a pod. a kde koncentrace kontaminantů v odpadním plynu je nad 1000 mg/m³_n.

Biotechnologie

Tyto technologie využívají intenzifikované biologické procesy probíhající v přírodě, při kterých účelově selektivně vybrané a napěstované kmeny bakterií při svém látkovém metabolismu transformují organické škodliviny na vodu a oxid uhličitý. Nevznikají žádné nežádoucí odpady, jedná se tudíž o klasickou bezodpadovou technologii. Biokultury mohou být namnoženy na nosiči (substrátu), kterým prochází zpracovávaná vzdušina (biofiltry) nebo na náplni absorpčních kolon a zejména v zásobnících sorbentu (biopračky), obr. 4.16. (Pětioký, 1997).

Biofiltry

Biofiltr se skládá z vlhčícího kontaktoru (pračky) a vlastního biofiltru. V pračce se upraví relativní vlhkost vzdušiny na hodnotu nad 90 %, teplota na hodnoty v rozpětí cca 15 až 35 °C a dále se zachytí případné úlety pevných látek.

Biofiltr je tvořen betonovou vanou nebo kovovým kontejnerem s perforovaným dnem, na kterém je umístěn nosič (substrát) osídlený biokulturami. Substrát se účelově vybírá pro každý proces a bývá tvořen přírodními látkami (vřes, kompost, drcená borová kůra, rozvlákněné kořeny, rašelina, drcené skořápky kokosu, švestek, ořechů, a pod.). Kvalitnější a trvanlivější jsou nosiče na bázi elementů z napěněných plastových materiálů, jejichž pořizovací cena je několikanásobně vyšší.

Kontaminovaná vzdušina prochází vrstvou substrátu (obvyklá výška 800 až 1500 mm), na kterém se nejprve adsorpčně zachytí škodlivé příměsi (případně naabsorbují v kapalinovém filmu na substrátu) a následně jsou biokulturami zpracovávány na H₂O a CO₂. Nejčastěji je biofiltr otevřený, tzn., že zpracovaná vzdušina odchází přímo do atmosféry.

Seriózní dodavatelé před každou průmyslovou aplikací realizují laboratorní test, protože každá kombinace organických látek je svým způsobem originální a vyžaduje speciální biokulturu.

Potřebné mikroorganismy jsou přirozenou součástí přírody, ale je nutné je usídlit a namnožit na substrátu.

Nejčastěji se potřebné mikroorganismy naočkují na substrát postříkáním vody s namnoženými mikroorganismy. Potřebný roztok se nakultivuje v laboratoři, nebo lze někdy nalézt vhodnou ČOV (čistíren odpadních vod), která s potřebnými mikroorganismy pracuje.

Při biologickém odbourávání vzniká teplo v množství dostačujícím, aby biofiltr nezamrzal v zimním období.

Biofiltry jsou vhodné pro koncentrace škodlivin do cca 1000 mg/m³. Efektivita odbourávání je pro jednotlivé škodliviny různá. Výborná je pro toluen, xylen, aceton, formaldehyd, pachy z biologických čistíren odpadních vod a potravinářských výrob a pod., kde jsou dosahovány hodnoty 80 až 90 %. Obtížné je biologické odbourávání chlorovaných organických látek typu perchlor, trichlor.

Významné zvýšení efektivity (přes 90 %) lze dosáhnout přidáváním biokatalyzačního roztoku do vlhčící kapaliny v pračce.

Výhody biofiltrů jsou:

- technologie je bezodpadová;
- minimální provozní náklady (tlaková ztráta cca 0,8 – 1,5 kPa);
- minimální údržba;
- vysoká účinnost.

Nevýhody biofiltrů jsou:

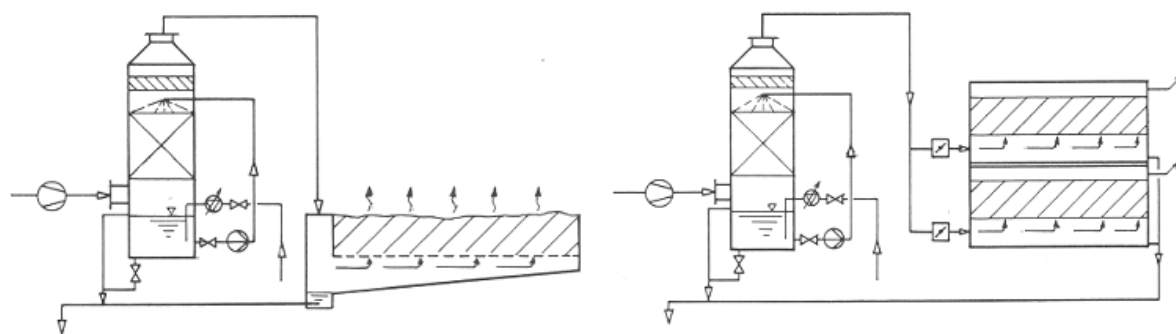
- relativně velké půdorysné nároky (1 m² zpracuje cca 100 až 300 m³/h vzdušiny),
- jestliže zdroj znečištění pracuje přerušovaně, je nutné v přestávkách zajistit biokulturám náhradní živiny a přísun kyslíku, aby nedošlo k poklesu účinnosti.

Životnost substrátu je závislá na jeho složení. Substráty plastové mají životnost větší než 7 let, substráty na bázi drcených skořápek nebo rozvlákněných kořenů do cca 5 let, substráty z vřesu, drcené kůry a pod. cca 3 roky.

Biopračky

Funkční princip biopraček je shodný s biofiltry, tj. biologická destrukce organických kontaminantů na elementární látky (CO₂, H₂O).

Proces je realizován v náplňových absorbérech, kde na povrchu náplně je usídlena biokultura (biofilm). Do absorbéru je nastříkována kapalina obohacená biokulturou (naočkování biokultury je shodné jako u biofiltru) a proces biologické destrukce se realizuje na povrchu vestavby v biofilmu a především v cirkulačním zásobníku sorbentu, provedeném jako provzdušňovaný bioreaktor s regulovaným doplňováním živin. Biopračky se realizují zejména v kafilerních provozech, kde je vysoká koncentrace škodlivin.



Obr. 5.24 Aparátorové celky biopračky a biofiltrů

Seznam použité literatury:

- [1] ANDĚL, A. *Mechanické pochody*. Praha : České vysoké učení technické, 1992. 141 s.
- [2] BÖHM, J. *Elektrické odlučovače*. Praha : SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1977. 98 s.
- [3] BRETSCHNEIDER, Boris; KURFÜRST, Jiří. *Technika ochrany ovzduší*. 1. vyd. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1978. 258 s.
- [4] FRIEDLANDER, S. K. *Smoke, Dust and Haze : fundamentals of Aerosol Behaviour*. 1st ed. Oxford : J. Wiley and Sons, 1977. 215 s.
- [5] FRIEDLANDER, S. K. *Smoke, Dust and Haze : fundamentals of Aerosol Dynamics*. 2nd ed. Oxford : J. Wiley and Sons, 2000. 217 s.
- [6] HAČUNDA, Peter. *Technické zariadenia na ochranu ovzdušia*. 1. vyd. Bratislava : ALFA, 1984. 221 s.
- [7] HIDY, G. M., BROCK, J. R. *The Dynamics of Aeroconlloidal Systems*. Pergamon Press, 1970. 162 s.
- [8] HEJMA, J., BUDÍNSKÝ, K., VÁVRA, A., DRKAL, F. *Vzduchotechnika v dřevozpracovávacím průmyslu*. 1. vyd. Praha : SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [9] HEMERKA, Jiří. *Odlučování tuhých emisí*. 1. vyd. Praha : České vysoké učení technické, 1994. 138 s. ISBN 80-01-01088-0.
- [10] HOLOUBEK, Dušan. *Spalovací zariadenia, výmenníky tepla a kotly*. 1. vyd. Košice : Technická univerzita Košice, 2002. 215 s. ISBN 80-7099-832-6.
- [11] KONCZ, I. *Odstraňovanie a odlučovanie prachu*. 1. vyd. Bratislava : ALFA, 1969. 99 s.
- [12] MIŠKOVSKÝ, J. a kol. *Provoz základních technologií z hlediska ochrany čistoty ovzduší a jeho kontrola*. Praha : neprodejná publikace MLVH ČSR, 1986. 115 s.
- [13] PĚTIOKÝ, K. *Nové trendy v odlučování plyných emisí*. In: Ochrana ovzdušia. Bratislava : DT ZSVTS, 1997. 133 s.
- [14] SMOLÍK, Jan. *Technika prostředí*. 1. vyd. Praha : SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1985. 317 s.
- [15] SMOLÍK, J. *Odlučování tuhých částic*. 1. vyd. Praha : České vysoké učení technické, 1977. 250 s.
- [16] ŠIŠKA, František. *Ochrana ovzdušia*. 1. vyd. Bratislava : ALFA, 1981. 330 s.
- [17] ŠTORCH, O., HEJMA, J., KLOBOUK, B., KURFÜST, J. *Údržba, obsluha a provoz odlučovacích zařízení*. 1. vyd. Praha : ČSVTS, 1986. 196 s.
- [18] WEBER, E., BROCKE, W. *Apparate und Verfahren der industriellen Gasreinigung*. Berlin : R. Oldenbourg Verlag, 1973. 277 s.
- [19] WHITE, H. J. *Industrial Electrostatic Precipitation*. 1st ed. Addison : Wesley Publishing Company, 1963. 301 s.
- [20] BAUMBACH, Günter a kol. *Luftreinhaltung*. 3. vyd. Berlin : Springer Verlag, 1990. 453 s. 3-540-56823-9.

- [21] ŠIŠKA, František. *Ochrana ovzdušia*. 1. vyd. Bratislava : Alfa, 1993. 330 s.
- [22] ŠIŠKA, František a kol. *Banské vetranie*. 1. vyd. Bratislava : Alfa, 1981. 352 s.
- [23] TKÁČ, Teodor. *Ovzdušie a jeho znečistenie*. 1.vyd. Bratislava : SEI-EA, 1996. 333 s.
- [24] HERČÍK, Miloslav. *Životní prostředí : úvod do studia*. 1. vyd. Ostrava : VŠB – TU Ostrava, 1996. 134 s. ISBN 80-7078-340-0.
- [25] Kolektiv autorů. *Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2001*. Praha : ČHMÚ, 2002. 161 str.