

4. Výpočet hlavních charakteristik znečištění ovzduší

Hlavními charakteristikami znečištění ovzduší způsobeného danými zdroji jsou:

- 1) Maximální krátkodobé koncentrace znečišťující látky pro každou vyskytující se kombinaci třídy stability ovzduší a třídy rychlosti větru.
- 2) Maximální krátkodobá koncentrace bez ohledu na třídu stability a rychlost větru.
- 3) Průměrná roční koncentrace.
- 4) Doby během roku, po kterou jsou v daném referenčním bodě překročené nějaké zvolené hodnoty koncentrace (např. imisní limit atd.).

4.1. Výpočet maximálních krátkodobých koncentrací

Před vlastním výpočtem krátkodobých koncentrací je třeba vypočítat data dvojího typu:

- 1) Máme-li N referenčních bodů ($k = 1, \dots, N$) a P zdrojů ($i = 1, \dots, P$), pak pro každou dvojici zdroj - referenční bod speciální program zmiňovaný v kapitole 3.1. vypočítá hodnoty koeficientu ϑ_{ik} a hodnotu maximální výšky terénu na profilu zdroj - referenční bod nad úrovní úpatí komína z_{mik} . Získají se tak matice hodnot ϑ_{ik} a z_{mik} .
- 2) Pro každou dvojici zdroj - referenční bod se určí azimut δ_{ik} (ve stupních), ve kterém se nachází i -tý zdroj při pohledu z k -tého referenčního bodu. Vztah pro výpočet δ_{ik} má tvar

$$(4.1) \quad \begin{aligned} \delta_{ik} &= \arctg\left(\frac{x_d}{y_d}\right) + 90 \cdot (2 - \operatorname{sgn}(x_d) \cdot (1 + \operatorname{sgn}(y_d))) && \text{pro } x_d \neq 0 \text{ a } y_d \neq 0 \\ &= 180 - 90 \cdot \operatorname{sgn}(x_d) && \text{pro } y_d = 0 \\ &= 90 - 90 \cdot \operatorname{sgn}(y_d) && \text{pro } x_d = 0 \end{aligned}$$

kde $x_d = x_{zi} - x_{rk}$ (rozdíl x -souřadnic i -tého zdroje a k -tého referenčního bodu)

$y_d = y_{zi} - y_{rk}$ (rozdíl y -souřadnic i -tého zdroje a k -tého referenčního bodu)

a funkce $\operatorname{sgn}(x)$ je definována:

$$\begin{aligned} \operatorname{sgn}(x) &= 1 \quad \text{pro } x > 0 \\ &= 0 \quad \text{pro } x = 0 \\ &= -1 \quad \text{pro } x < 0 \end{aligned}$$

Jsou-li tyto údaje připravené, může začít výpočet krátkodobých koncentrací postupně ve všech referenčních bodech. Výpočet se provádí v jednotlivých třídách stability ovzduší pro tyto rychlosti větru:

Třída stability	Rozmezí u_{10} (m/s)
I	1,5 - 2
II	1,5 - 5
III	1,5 - 15
IV	1,5 - 15
V	1,5 - 5

V rozmezí 1,5 - 3 m/s se postupuje po 0,1 m/s,
v rozmezí 3 - 7 m/s se postupuje po 0,2 m/s a
v rozmezí 7 - 11 m/s se postupuje po 0,5 m/s.

Azimut směru větru φ se volí postupně od 0° do 359° s krokem 1° (při větším úhlovém kroku by mohlo dojít k tomu, že ve vzdálených referenčních bodech při inverzích bude kouřová vlečka výpočtem zachycena jen z malé části). Po vyčíslení efektivní výšky h každého zdroje je nutné poopravit azimut δ_{ik} o hodnotu stočení směru větru s výškou

$$(4.2) \quad \delta'_{ik} = \delta_{ik} - \frac{h_i - 10}{25}$$

Pro každý azimut směru větru φ se sčítají koncentrace vypočtené podle rovnice (3.1) od těch zdrojů, pro které platí

$$\lambda \leq 20 \quad \text{nebo} \quad \lambda \geq 340^\circ$$

kde

$$(4.3) \quad \lambda = |\varphi - \delta'_{ik}|$$

Tímto způsobem se získají hodnoty koncentrací $c_{\varphi j}$ pro každý směr větru, třídu stability a rychlost větru. Z těchto hodnot se jako charakteristiky znečištění ovzduší vyberou:

- 1) Maximální $c_{\varphi j}$ pro
 - I. tř. stability a rychlost větru 1,7 m/s
 - II. tř. stability a rychlosti větru 1,7 a 5 m/s
 - III. tř. stability a rychlosti větru 1,7 , 5 a 11 m/s
 - IV. tř. stability a rychlosti větru 1,7 , 5 a 11 m/s
 - V. tř. stability a rychlosti větru 1,7 a 5 m/s

Těchto 11 hodnot budeme nazývat maximální krátkodobé koncentrace pro dané rozptylové podmínky (ozn. c_j).

- 2) Maximální $c_{\phi j}$ bez ohledu na třídy stability ovzduší a rychlost větru. Tuto hodnotu nazveme maximální možná krátkodobá koncentrace a označíme c_{\max} . Zároveň bude uvedeno, při jaké třídě stability ovzduší, jaké rychlosti větru a při jakém směru větru se bude vyskytovat.

4.2. Výpočet průměrných ročních koncentrací

K výpočtu průměrných ročních koncentrací je nejprve nutné zkonstruovat podrobnou větrnou růžici, tj. stanovit četnosti výskytu směru větru pro každý azimut od 0° do 359° (s krokem 1°) při všech třídách stability a třídách rychlosti větru.

Větrná růžice dělená podle tříd stability a rychlosti větru, která je vstupním údajem, obsahuje relativní četnosti v procentech pro 8 základních směrů větru a četnosti bezvětrí ve všech třídách stability. V každé třídě stability nejprve rozpočítáme četnosti bezvětrí rovnomerně do všech 8 směrů větru v 1. třídě rychlosti větru a získáme tak pro 8 směrů větru přepočtené relativní četnosti $f(\varphi_s)$. Četnosti f_φ v podrobné větrné růžici pak vypočteme:

$$(4.4) \quad f_\varphi = \frac{1}{4500} \cdot \left[f(\varphi_1) + \frac{\varphi - \varphi_1}{45} (f(\varphi_2) - f(\varphi_1)) \right]$$

kde φ_1 a φ_2 jsou sousední směry větru v 8-dílné větrné růžici.

Hodnoty f_φ jsou udané jako skutečné relativní četnosti, nikoliv tedy v %. Proto bude platit

$$(4.5) \quad \sum_j \sum_\varphi f_{\varphi j} = 1$$

kde součet přes j probíhá přes všechny třídy stability a v nich se vyskytující třídy rychlosti větru (celkem 11 různých rozptylových podmínek) a φ probíhá všechny azimuty od 0 do 359° .

Dále je k výpočtu ročních průměrů potřeba pro každý zdroj určit tzv. relativní roční využití maximálního výkonu α . Tato hodnota se získá u zdrojů s přibližně stálou emisí znečišťující látky (většinou u technologií) z roční provozní doby P_r (hod.) :

$$(4.6) \quad \alpha = \frac{P_r}{8760},$$

u zdrojů se sezónními výkyvy výkonu (většinou u spalovacích procesů) z množství spáleného paliva S_h (kg/h, m³/h) za hodinu při jmenovitém výkonu spalovacího zařízení a z ročního množství S_r (kg/r, m³/r) spáleného paliva:

$$(4.7) \quad \alpha = \frac{S_r}{8760 \cdot S_h}$$

Označíme-li tedy α_i relativní roční využití max. výkonu i-tého zdroje a $c_{i\varphi j}$ koncentraci způsobenou i-tým zdrojem při směru větru φ a rozptylových podmínkách j , bude pro průměrnou roční koncentraci v daném referenčním bodě platit:

$$(4.8) \quad \bar{c} = \sum_j \sum_{\varphi} (f_{\varphi j} \cdot \sum_i \alpha_i c_{i\varphi j})$$

4.3. Výpočet doby překročení zvolených koncentrací

Před výpočtem doby překročení určité hodnoty koncentrace během roku je nutné:

- a) zvolit tuto koncentraci (označíme ji c_R)
- b) seřadit všechny zdroje podle klesajícího α . Jako první se bude počítat koncentrace od zdroje s nejvyšším α , jako poslední koncentrace od zdroje s nejmenším α .

Během výpočtu hodnoty $c_{\varphi j}$ (koncentrace od všech zdrojů v daném místě při směru větru φ a rozptylových podmínkách j) postupným načítáním hodnot $c_{i\varphi j}$ (koncentrací od jednotlivých zdrojů) se po každém načtení testuje, zda součet již překročil nebo ještě nepřekročil hodnotu c_R . Jestliže dojde k překročení c_R po načtení koncentrace od r -tého zdroje z řady zdrojů uspořádaných podle jejich α , pak označíme

$$t_{R\varphi j} = \alpha_r$$

Při různých směrech větru φ a rozptylových podmínkách j bude k překročení c_R docházet obecně při různých pořadových číslech zdrojů r . Celková doba překročení zvolené koncentrace c_R v daném referenčním bodě se pak dá vypočítat podle vztahu

$$(4.9) \quad T_R = 8760 \cdot \sum_j \sum_{\varphi} t_{R\varphi j} f_{\varphi j}$$

a udává se v hodinách za rok.

Čím vyšší je v rozmezí počítaných koncentrací c_j hodnota zvolené koncentrace c_R , tím více znamená T_R horní odhad doby jejího překročení a to ze dvou důvodů:

- 1) Předpokládáme, že po dobu vyjádřenou nejmenším α_j jsou v provozu všechny zdroje najednou. To je sice pravděpodobné (při nízkých teplotách v zimě bývají všechny kotelny v provozu), ale ne vždy to beze zbytku platí.
- 2) Předpokládáme provoz všech zdrojů na jejich jmenovitý výkon, což rovněž nemusí být vždy splněno.

Bez těchto dvou předpokladů by však výpočet T_R nebylo možné pro více zdrojů provést, pokud bychom neznali mnoho dalších vstupních údajů.

V praxi je výhodné počítat doby překročení několika zvolených hodnot c_R současně, výsledky pak dávají lepší přehled o úrovni znečištění ovzduší daného místa. Hodnoty c_R se pak obvykle volí jako imisní limit a jeho díly nebo násobky.

4.4. Diskuse výsledků výpočtu koncentrací

Vypočtené koncentrace by měly být v každém referenčním bodě srovnány s imisními limity (přípustnými koncentracemi). Aby se úroveň znečištění ovzduší od uvažovaného zdroje (zdrojů) dala považovat za přijatelnou, , musí platit:

$$1. \quad c_{\max} \leq 2 \cdot k_{\max}$$

tj. maximální možná krátkodobá koncentrace nesmí překročit dvojnásobek imisního limitu (přípustné koncentrace).

$$2. \quad T_R(k_{\max}) \leq 12 \text{ hod./rok}$$

tj. doba trvání situací, při kterých krátkodobá koncentrace překročí imisní limit (přípustnou koncentraci) nebude delší než 12 hodin za rok.

$$3. \quad \bar{c} \leq k_r$$

tj. vypočtená průměrná roční koncentrace nesmí překročit imisní limit (přípustnou koncentraci) pro roční průměr.

Tyto 3 podmínky musí platit současně.

5. Některé další aplikace výpočtu znečištění ovzduší

5.1. Stanovení potřebné výšky komína

Je-li třeba zjistit potřebnou stavební výšku komína H (např. u nových zdrojů znečištění ovzduší), je nutné:

- 1) vhodným způsobem zvolit referenční body v okolí komína
- 2) zvolit určitou výšku komína H a pro ni v referenčních bodech vypočítat charakteristiky znečištění ovzduší podle kapitol 3. a 4.
- 3) srovnat výsledné hodnoty s podmínkami v kapitole 4.4.
- 4) opakovat výpočty pro novou výšku komína H , až bude podmínek dosaženo.

Pro správný výsledek výšky H komína je velmi důležitý výběr referenčních bodů. Referenční body by se měly nacházet na nejexponovanějších místech z hlediska znečištění ovzduší daným zdrojem, tj. na vyvýšených místech, na svazích přivrácených ke zdroji a v případě zdroje poblíž zástavby na horních hranách fasád nejvyšších budov. V případě zdroje v rovinném nebo jen málo zvlněném terénu je nutné umístit referenční body do různých vzdáleností od zdroje a do směru, kam bude převládající vítr unášet kouřovou vlečku.

Zdroj, u kterého je třeba stanovit výšku jeho komína, se posuzuje buď samostatně nebo společně s ostatními zdroji v daném podniku nebo provozu. Není přípustné určovat výšku komína s ohledem na znečištění ovzduší, které působí zdroje jiných podniků a provozů.

Jestliže zdroj emituje více znečišťujících látek, jejichž nepříznivé účinky se mohou sčítat, je nutné dodržet při výpočtu H ve všech referenčních bodech navíc podmínku

$$\sum_{s=1}^M \frac{c_{\max s}}{k_{\max s}} \leq 2$$

kde M je počet takových znečišťujících látek, $s = 1, \dots, M$. Tato podmínka souvisí s přípustnými koncentracemi ve směsi znečišťujících látek (viz kap. 5.4.).

Skupiny látek, u kterých se předpokládá sčítání nepříznivých účinků, určují orgány Hygienické služby.

Nachází-li se zdroj v zástavbě nebo v její blízkosti, je navíc potřeba provádět korekci vypočtené výšky komína H na tuto skutečnost, protože budovy ovlivňují proudění vzduchu v nejnižší vrstvě. Za zdroj v blízkosti zástavby budeme považovat zdroj, který leží ve vzdálenosti menší než čtyřnásobek výšky jakékoliv okolní budovy. Jinými slovy, zdroj se nebude považovat za umístěný v blízkosti zástavby, pokud bude platit

$$x_l > 4.l$$

pro jakoukoliv budovu v jeho okolí (viz [9]). Přitom:

x_l (m) - vzdálenost zdroje od budovy

l (m) - výška této budovy

Pokud se zdroj nachází v blízkosti zástavby, vybereme z okolních budov, pro které platí

$$x_l \leq 4.l$$

tu nejvyšší. Označíme

l_m (m) - výšku této budovy

W (m) - šířku budovy (kolmo na spojnici zdroj - budova)

L (m) - délku budovy (ve směru spojnice zdroj - budova)

Pokud vypočtená výška komína $H \geq 2,5.l_m$, korekce H na okolní zástavbu se neprovádí a korigovaná výška komína $H' = H$. V opačném případě pro H' bude platit

$$(5.1) \quad H' = \frac{H+1,5.l_B}{1,6}$$

kde

$$(5.2) \quad l_B = \min(l_m, \max(W, L))$$

Pokud výška komína H' (nebo v případě neprovádění korekce výška H) vychází nižší než 10 m, je třeba počítat s výškou rovnou 10 m. Je to z toho důvodu, že v nejnižší vrstvě atmosféry se často vyskytují značně nepříznivé podmínky pro rozptyl znečišťujících látek (se kterými metodika nepočítá), které by v případě nízkých zdrojů mohly vést k vysokým hodnotám znečištění.

Naopak, pokud výška komína vychází vyšší než 200 m, je třeba omezit koncentrace znečišťujících látek prostřednictvím snížení emisí z daného zdroje a nikoliv stavbou velmi vysokých komínů.

5.2. Výpočet podílů jednotlivých zdrojů na znečištění ovzduší

Při zjišťování podílu zdrojů na znečištění ovzduší má smysl počítat pouze podíl jednotlivých uvažovaných zdrojů na vypočtené průměrné roční koncentraci dané znečišťující látky v daném místě. Podíly zdrojů na vypočtených maximálních krátkodobých koncentracích vypovídají o vlivu zdrojů na znečištění ovzduší podstatně méně, proto jejich výpočet zde ani neuvádíme.

Označíme-li stejně jako v kapitole 4.2. α_i relativní roční využití maximálního výkonu i -tého zdroje a $c_{i\varphi j}$ koncentraci způsobenou v referenčním bodě i -tým zdrojem při směru větru φ a rozptylových podmínkách j , pak pro podíl i -tého zdroje na průměrné roční koncentraci v daném bodě bude platit

$$(5.3) \quad p_i = \frac{100 \cdot \alpha_i}{\bar{c}} \cdot \sum_{\varphi} f_{\varphi j} c_{i\varphi j} \quad (\%)$$

kde $f_{\varphi j}$ jsou relativní četnosti směrů větru φ při rozptylových podmínkách j v podrobné větrné růžici

a \bar{c} je průměrná roční koncentrace podle rovnice (5.8).

Takto vypočítaný podíl určitého zdroje na průměrné roční koncentraci znečišťující látky v daném bodě však znamená pouze podíl vzhledem k ostatním uvažovaným zdrojům. Protože platnost metodiky je omezena vzdáleností referenčního bodu od zdroje 100 km, nelze mezi uvažované zdroje nikdy zahrnout všechny zdroje, které ve skutečnosti znečištění ovzduší v daném bodě ovlivňují. Proto podíly vypočtené podle této kapitoly nemohou nahradit podíly zdrojů počítané podle jiných modelů, které zahrnují transport znečišťujících látek na střední a větší vzdálenosti (např. modely trajektoriové), a vyjadřované vzhledem k celkovému (např. změřenému) znečištění daného místa znečišťující látkou.

5.3. Výpočet denních průměrných koncentrací

Pro některé speciální aplikace je potřeba vypočítat průměrnou denní koncentraci způsobenou daným zdrojem (danými zdroji). Tato koncentrace (ozn. c_d) se vypočítá stejným postupem jako krátkodobé koncentrace znečišťující látky, tj. podle rovnice (3.1) a postupem popsáním v kapitole 4.1., avšak se dvěma rozdíly:

- 1) Při výpočtu předpokládáme, že po celý den trvají určité stejné rozptylové podmínky a zhruba stejný směr větru. Přesto je nutné během celých 24 hodin počítat s větším rozptylem směru větru než během 30 minut, pro které platí vypočtené krátkodobé koncentrace. Větší rozptyl směru větru se dá popsat větším příčným parametrem rozptylu σ_{yd} , pro který platí

$$(5.4) \quad \sigma_{yd} = 2,17 \cdot \sigma_y$$

Tento vztah byl odvozen v práci [10]. Parametr σ_{yd} se pak dosazuje na místo σ_y do rovnic pro výpočet koncentrací.

- 2) U zdrojů, které nejsou v provozu po celých 24 hodin, je nutné úměrně snížit emisi znečišťující látky. Jestliže označíme M (g/s) původní emisi znečišťující látky ze zdroje, M_d (g/s) emisi použitou pro výpočet průměrných denních koncentrací a P_d počet hodin za den, po které je zdroj v činnosti, pak

$$(5.5) \quad M_d = \frac{P_d}{24} \cdot M$$

Vypočtené denní průměry koncentrací se dají srovnat s přípustnými denními koncentracemi k_d podle kapitoly 2.4.

5.4. Koncentrace znečišťujících látek ve směsi

Jestliže nějaký zdroj nebo více zdrojů vypoští více znečišťujících látek, jejichž nepříznivé účinky se mohou sčítat, je třeba posuzovat úroveň znečištění v daném místě nejen z hlediska každé znečišťující látky zvlášť (tj. podle kapitoly 4.4), ale i vzhledem k tzv. přípustným koncentracím ve směsi látek.

Aby mohla být úroveň znečištění ovzduší z uvažovaných zdrojů považována za přijatelnou, musí podle kap. 4.4 platit v každém referenčním bodě

$$(5.6) \quad \frac{c_{\max}}{k_{\max}} \leq 2$$

Pro více znečišťujících látek musí analogicky platit

$$(5.7) \quad S_c = \sum_s \frac{c_{\max s}}{k_{\max s}} \leq 2$$

Obecně mohou mít jednotlivé znečišťující látky, v závislosti na výškách jednotlivých komínů a dalších vstupních parametrech, různá místa výskytu svých maxim koncentrací. Proto je nutné veličinu S_c počítat z hodnot $c_{\max s}$ a nikoliv z hodnot emisí znečišťujících látek jako v dosavadní metodice.

Pro každý referenční bod pak můžeme stanovit nejvýše přípustnou koncentraci K_{ms} s-té znečišťující látky ve směsi takto:

$$(5.8) \quad \begin{aligned} K_{ms} &= \frac{c_{\max s}}{S_c} && \text{pokud } S_c > 1 \\ &= k_{\max s} && \text{pokud } S_c \leq 1 \end{aligned}$$

Pro každou znečišťující látku pak v daném bodě musí platit

$$(5.9) \quad c_{\max} \leq 2 \cdot K_{ms}$$

Analogicky je možné stanovit i další 2 podmínky. V každém referenčním bodě musí být dodrženo

$$(5.10) \quad T_R(K_{ms}) \leq 12 \text{ hod./rok}$$

$$(5.11) \quad \bar{c}_s \leq K_{rs}$$

kde K_{rs} je přípustná průměrná roční koncentrace ve směsi látek pro s-tou znečišťující látku, kterou vyjádříme obdobně:

$$(5.12) \quad K_{rs} = \frac{\bar{c}_s}{\sum_s \frac{\bar{c}_s}{k_{rs}}}$$

V případě, že se více znečišťujících látek šíří pouze z jednoho zdroje, dá se výpočet zjednodušit, protože hodnoty K_{ms} a K_{rs} pak budou záviset jen na emisích M_s jednotlivých znečišťujících látek a tedy budou stejné pro všechny referenční body. Potom

$$(5.13) \quad K_{ms} = \frac{M_s}{\sum_s \frac{M_s}{k_{\max s}}}$$

$$(5.14) \quad K_{rs} = \frac{M_s}{\sum_s \frac{M_s}{k_{rs}}}$$

a opět musí platit současně 3 uvedené podmínky pro přijatelnou úroveň znečištění ovzduší.

5.5. Výpočet doby překročení zvolených koncentrací pro zdroj se sezónně proměnnou emisí

Tento postup se týká zdrojů znečištění ovzduší, jejichž emise dosahují maximálních hodnot pouze po velmi krátkou dobu v roce a po podstatnou část své roční provozní doby emitují jen menší množství znečišťující látky. Je to typický případ vytopen a tepláren, jejichž plný výkon je využíván pouze v krátkých obdobích silných mrazů.

Pokud u takových zdrojů počítáme dobu T_R překročení předem zvolených koncentrací postupem uvedeným v kapitole 4.3., pak u vysokých předem zvolených koncentrací c_R dostáváme vyšší hodnoty T_R a u nízkých c_R menší hodnoty T_R než odpovídá skutečnosti. Chceme-li tento nedostatek odstranit, musíme zvolit následující postup:

Z křivky výkonu zdroje během roku odečteme, po jakou dobu v roce P_{ri} (hod.) je zdroj provozován na kolik procent (n_i) plného výkonu. Získáme tak p provozních režimů daného zdroje, $i = 1, \dots, p$. Je-li M (g/s) emise znečišťující látky při plném výkonu a V_s (Nm^3/s) objem spalín odcházejících komínem, pak pro jednotlivé provozní režimy bude platit:

$$(5.15) \quad M_i = M \cdot \frac{n_i}{100}$$

$$(5.16) \quad V_{si} = V_s \cdot \frac{n_i}{100}$$

a poměrná doba trvání provozního režimu v roce bude

$$(5.17) \quad \alpha_i = \frac{P_{ri}}{8760}$$

S těmito vstupními parametry provedeme výpočet koncentrací podle kapitol 3. a 4. Označíme-li $c_{i\varphi j}$ koncentraci v referenčním bodě při i -tém provozním režimu, při směru větru φ a při rozptylových podmínkách j , pak dobu trvání překročení zvolené koncentrace c_R můžeme vyjádřit

$$(5.18) \quad T_R(c_R) = 8760 \cdot \sum_j \sum_{\varphi} \left(f_{\varphi j} \cdot \sum_i \alpha_i \right)$$

kde součet $\sum_i \alpha_i$ probíhá jen přes takové provozní režimy i , pro které platí $c_{i\varphi j} > c_R$.

Hodnoty c_{\max} , c_j a roční průměry koncentrací počítáme podle původního postupu popsaného v kap. 4.1. a 4.2. Výpočet maximálních krátkodobých koncentrací je totiž potřeba

provádět z hodnot M a V_s při jmenovitém výkonu zdroje a vypočtenou hodnotu ročních průměrů koncentrací by nový postup stejně neovlivnil.

Celý postup popsaný v této kapitole je však možné použít jen pro jediný zdroj znečištění ovzduší. Při více proměnných zdrojích bychom se dostali do velkých komplikací při určování vzájemných kombinací jednotlivých provozních režimů zdrojů.

5.6. Výpočet depozice plyných znečišťujících látek a spadu prachu

Hodnoty depozice W plyných znečišťujících látek se dají vyjádřit vztahem

$$(5.19) \quad W = c \cdot v_g$$

kde c ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) je koncentrace znečišťující látky

a v_g (m/s) je depoziční rychlost pro danou látku

Hodnoty W pak vycházejí v jednotkách $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Pro přepočet na častěji užívané jednotky $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{rok})$ je nutné výsledek násobit konstantou 31,536, přičemž je za c možné dosazovat roční průměrnou hodnotu koncentrace \bar{c} .

Průměrné depoziční rychlosti pro jednotlivé znečišťující látky uvádí následující tabulka:

Látka	depoziční rychlost [cm/s]
oxid siřičitý	0,6
oxidy dusíku	0,4
sirovodík	0,02
ozon	0,5
oxid uhelnatý	0,05

U prachu je situace poněkud komplikovanější, protože prašné emise obsahují vždy prašné částice o různých velikostech a tedy s různou pádovou rychlostí v_g . Krátkodobou hodnotu prašného spadu v $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ můžeme vypočítat podle vztahu

$$(5.20) \quad c = \frac{10^6 \cdot M}{2\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u_h + V_s} \cdot \exp\left(-\frac{y_L^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \sum_{i=1}^{r_c} \frac{\alpha_{pi}}{100} \cdot v_{gi} \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z'-(h_1-h_{gi}))^2}{2\sigma_z^2}\right) + (1-\vartheta) \cdot \exp\left(-\frac{(z''+h_1+h_{gi})^2}{2\sigma_z^2}\right) + \vartheta \cdot \exp\left(-\frac{(z'''-(h_1+h_{gi}))^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

který se liší od rovnice (3.58) pro výpočet koncentrace prachu právě vynásobením koncentrací v jednotlivých třídách velikostí částic příslušnou pádovou rychlostí.

Při výpočtu ročního spadu prachu pak postupujeme podobně jako při výpočtu průměrné roční koncentrace v kapitole 4.2., to znamená, že označíme-li $W_{i\varphi j}$ krátkodobý spad prachu od i-tého zdroje při směru větru φ a rozptylových podmínkách j , bude roční spad prachu

$$(5.21) \quad \bar{W} = 31,536 \cdot \sum_j \sum_{\varphi} \left(f_{\varphi j} \cdot \sum_i \alpha_i W_{i\varphi j} \right)$$

a to v jednotkách $t/(km^2/rok)$.

6. Výpočet koncentrací z plošných zdrojů

Při výpočtu koncentrací znečišťujících látek šířících se z plošného zdroje postupujeme tak, že plošný zdroj rozdělíme na dostatečný počet čtvercových plošných elementů, vypočítáme v referenčním bodě koncentraci od každého z nich a jednotlivé koncentrace sečteme.

Pro stanovení koncentrace c_E ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) způsobené jedním plošným elementem použijeme modifikovanou rovnici (3.1):

$$(6.1) \quad c_E = \frac{10^6 M_E}{2\pi(\sigma_y + \sigma_{y0}) \cdot (\sigma_z + \sigma_{z0}) \cdot u_h} \cdot \exp\left(-\frac{y_L^2}{2(\sigma_y + \sigma_{y0})^2}\right) \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z' - h_1)^2}{2(\sigma_z + \sigma_{z0})^2}\right) + (1 - \vartheta) \cdot \exp\left(-\frac{(z'' + h_1)^2}{2(\sigma_z + \sigma_{z0})^2}\right) + \vartheta \cdot \exp\left(-\frac{(z''' - h_1)^2}{2(\sigma_z + \sigma_{z0})^2}\right) \right]$$

kde symboly mají stejné významy jako v rovnici (3.1),

M_E (g/s) je emise znečišťující látky z elementu plochy

a σ_{y0} , σ_{z0} (m) jsou počáteční rozptylové parametry (pro $x = 0$), které souvisí s rozměry elementů podle vztahů

$$(6.2) \quad \sigma_{y0} = \frac{y_0}{\sqrt{2\pi}}$$

$$(6.3) \quad \sigma_{z0} = \sigma_z \left(\frac{y_0}{2} \right)$$

Přitom předpokládáme, že element plochy tvoří čtverec o straně y_0 , tj. že středy elementů jsou od sebe vzdálené právě y_0 metrů.

Vzdálenost y_0 (tj. velikost elementů) nemůžeme volit nezávisle. Při příliš velkých y_0 by mohlo docházet v blízkých referenčních bodech k vlnovému průběhu koncentrací v závislosti na úhlu směru větru. Aby k takovým jevům nedocházelo, je potřeba volit y_0 v závislosti na vzdálenosti x_0' nejbližšího referenčního bodu podle tabulky:

Vzdálenost x_0' (m) nejbližšího referenčního bodu	Nejvyšší možná hodnota y_0 (m)
do 100 m	$x_0'/3$
100 - 300 m	$x_0'/4$
300 - 900 m	$x_0'/5$
nad 900 m	$x_0'/6$

Pokud plošný zdroj nebo jeho element tvoří část obce se zástavbou a lokálními topeništi, za efektivní výšku h se dosazuje střední výška budov v daném elementu zvýšená o 10 m.

7. Výpočet koncentrací z liniových zdrojů

Liniovými zdroji se rozumí zejména silnice s automobilovým provozem. Stejně jako u plošných zdrojů koncentraci od liniového zdroje vypočítáme tak, že liniový zdroj rozdělíme na dostatečný počet délkových elementů, vypočteme koncentraci od každého z nich a tyto koncentrace sečteme.

Pro koncentraci c_E ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) způsobenou jedním elementem liniového zdroje v referenčním bodě platí vztah podobný vztahu (6.1) pro koncentraci z elementu plošného zdroje:

$$(7.1) \quad c_E = \frac{10^6 \cdot M_L \cdot y_0}{2\pi(\sigma_y + \sigma_{y0}) \cdot (\sigma_z + \sigma_{z0}) \cdot u_h} \cdot \exp\left(-\frac{y_L^2}{2(\sigma_y + \sigma_{y0})^2}\right) \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z' - h_1)^2}{2(\sigma_z + \sigma_{z0})^2}\right) + (1 - \vartheta) \cdot \exp\left(-\frac{(z'' + h_1)^2}{2(\sigma_z + \sigma_{z0})^2}\right) + \vartheta \cdot \exp\left(-\frac{(z''' - h_1)^2}{2(\sigma_z + \sigma_{z0})^2}\right) \right]$$

kde M_L ($\text{g}/(\text{m} \cdot \text{s})$) je délková intenzita emise znečišťující látky
 y_0 (m) je délka elementu liniového zdroje.

Za rychlost větru se dosazuje rychlost u_{10} ve výšce 10 m nad zemí, protože se předpokládá, že v liniovém zdroji vznikají přízemní emise, tj. že $h = 0$.

Odlišné od plošných zdrojů je však vyjádření počátečních rozptylových parametrů σ_{y0} a σ_{z0} . Jejich význam vyplývá z případu, kdy $x_L = y_L = 0$ a $z' = z'' = z''' = h_1 = 0$, tj. ze situace přímo v místě zdroje. Koncentrace znečišťující látky zde je (po dosazení do rovnice (7.1)):

$$(7.2) \quad c_E = \frac{10^6 \cdot M_L \cdot y_0}{\pi \cdot \sigma_{y0} \cdot \sigma_{z0} \cdot u_{10}}$$

Výraz ve jmenovateli (7.2) má význam objemu vzduchu, ve kterém jsou obsažené exhalace přímo ve zdroji, přičemž předpokládme, že v tomto objemu vzduchu je znečišťující látka rozložena rovnoměrně. Tento předpoklad zhruba odpovídá skutečnosti, protože při průjezdu vozidel po silnici vzniká silná mechanická turbulence, která znečišťující látky rozptýlí do výšky několika m. Rozptylové parametry je pak možné vyjádřit

$$(7.3) \quad \sigma_{y0} = \frac{y_\zeta}{\sqrt{2\pi}}$$

$$(7.4) \quad \sigma_{z0} = \frac{z_\zeta}{\sqrt{\frac{\pi}{2}}}$$

kde y_ζ je průmět elementu ve směru větru

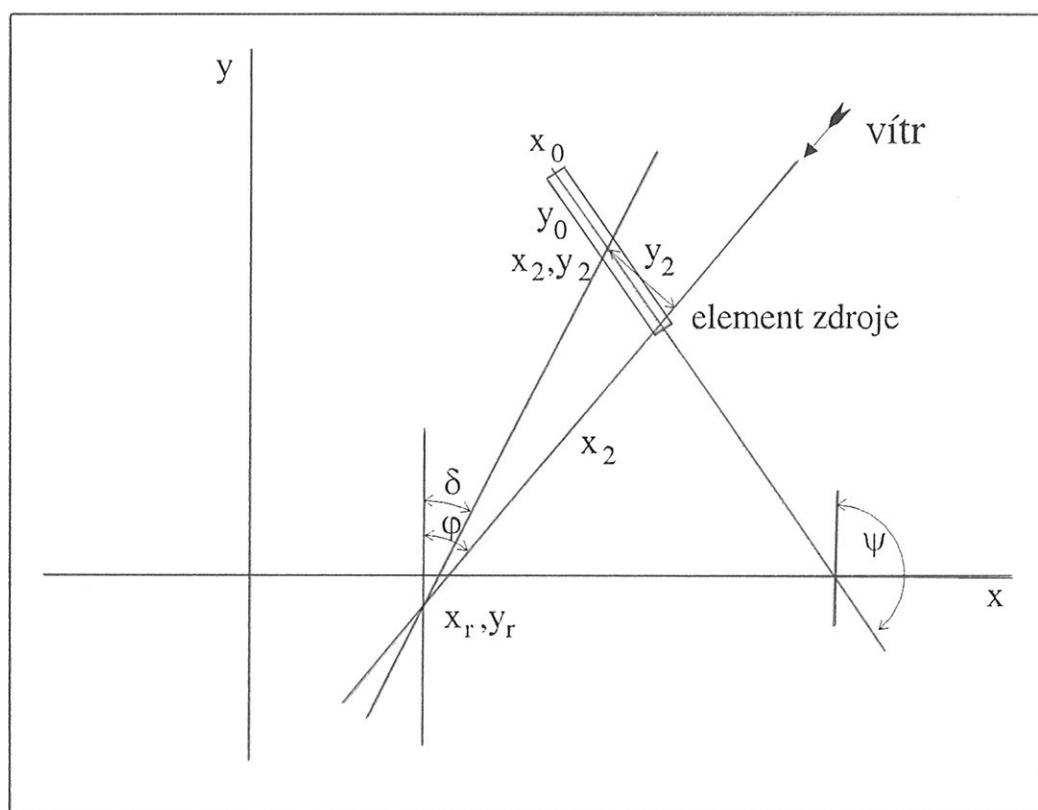
a z_ζ je výška, do které sahá přibližně rovnoměrná koncentrace znečišťující látky nad silnicí.

Potom objem elementu (za časovou jednotku) je skutečně

$$(7.5) \quad V_E = y_\zeta \cdot z_\zeta \cdot u_{10}$$

Veličiny y_ζ a z_ζ však závisejí nejenom na délce y_0 a šířce x_0 elementu liniového zdroje, ale i na úhlu ζ , který svírá azimut φ směru větru a azimut ψ směru elementu silnice.

Pro úhel ζ platí (viz obr. 3):



obr. 3

$$(7.6) \quad \begin{aligned} \zeta &= |\varphi - \psi| && \text{pro } 0 \leq |\varphi - \psi| < 90^\circ \\ &= 180 - |\varphi - \psi| && \text{pro } 90 \leq |\varphi - \psi| < 180^\circ \\ &= |\varphi - \psi| - 180 && \text{pro } 180 \leq |\varphi - \psi| < 270^\circ \\ &= 360 - |\varphi - \psi| && \text{pro } 270 \leq |\varphi - \psi| < 360^\circ \end{aligned}$$

Azimut ψ směru elementu silnice vypočítáme jako průměr azimutů ze středu elementu ke středům sousedních elementů. Pokud máme liniový zdroj rozdělený na p

elementů ($i = 1, \dots, p$), se souřadnicemi středů x_{zi}, y_{zi} , pak pro jednotlivé elementy bude platit:

$$\begin{aligned}
 (7.7) \quad & \psi_1 = \psi_1' \\
 & \psi_2 = (\psi_1' + \psi_2')/2 \\
 & \dots \quad \dots \\
 & \psi_i = (\psi_i' + \psi_{i+1}')/2 \\
 & \dots \quad \dots \\
 & \psi_p = \psi_{p-1}',
 \end{aligned}$$

kde

$$\begin{aligned}
 (7.8) \quad & \psi_i' = \arctg\left(\frac{x_i}{y_i}\right) + 90 \cdot (2 - \operatorname{sgn}(x_i) \cdot (1 + \operatorname{sgn}(y_i))) \quad \text{pro } x_i \neq 0, y_i \neq 0 \\
 & = 180 - 90 \cdot \operatorname{sgn}(x_i) \quad \text{pro } y_i \neq 0 \\
 & = 90 - 90 \cdot \operatorname{sgn}(y_i) \quad \text{pro } x_i \neq 0
 \end{aligned}$$

Veličiny x_i a y_i znamenají $x_i = x_{zi+1} - x_{zi}$

$$y_i = y_{zi+1} - y_{zi}$$

a funkce $\operatorname{sgn}(x)$ je definovaná v kapitole 4.1.

Veličiny y_ζ a z_ζ pak vypočítáme podle vztahů

$$(7.9) \quad y_\zeta = y_0 \cdot \sin \zeta + x_0 \cdot \cos \zeta$$

$$(7.10) \quad z_\zeta = z_0 + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \sigma_z \left(\frac{x_\zeta}{2} \right)$$

kde

y_0 - délka elementu

x_0 - šířka elementu (silnice)

z_0 - výška, do které se přízemní exhalace dostanou vlivem turbulence způsobené průjezdem automobilů. Pro silnice s nízkou rychlostí jízdy (např. ve městě) předpokládáme $z_0 = 2$ m, pro silnice s vyšší rychlostí jízdy předpokládáme $z_0 = 5$ m.

x_ζ - vzdálenost, po kterou proudění prochází nad elementem silnice, platí

$$(7.11) \quad x_\zeta = \min \left(\frac{x_0}{\sin \zeta}, \frac{y_0}{\cos \zeta} \right)$$

Volba délky elementů liniového zdroje v závislosti na vzdálenosti nejbližšího referenčního bodu se řídí stejným kritériem jako u plošných zdrojů.

8. Výpočet extrémního znečištění ovzduší při inverzích a bezvětrí

Použitá metoda Gaussovského rozptylu kouřové vlečky neumožňuje výpočet koncentrací znečišťujících látek v ovzduší za extrémně nepříznivých podmínek, při bezvětrí a současných inverzích. Přitom tyto podmínky nastávají často zejména v údolích, trvají řadu hodin nebo i dní a jsou příčinou kalamitních situací z hlediska znečištění ovzduší.

Pro odhad koncentrací při těchto situacích použijeme metodu upraveného box-modelu popsanou v práci [12]. Zde se předpokládá uzavřené údolí nebo kotlina, ve které jsou zdroje znečištění ovzduší, bezvětrí, inverzní teplotní zvrstvení a kde ve výšce L nad dnem kotliny je horní hranice směšovací vrstvy.

Horní hranice směšovací vrstvy je často i horní hranicí inverze, může však být totožná s horní hranicí mlhy nebo nízké oblačnosti, pokud inverzní zvrstvení pokračuje i do větších výšek. Tato horní hranice směšovací vrstvy tvoří plochu, skrz kterou exhalace neprostupují (s výjimkou prorážení inverze kouřovou vlečkou těsně nad komínem) a chová se tedy stejně jako "odrazová" plocha zemského povrchu, jelikož exhalace mají pak ještě více zmenšený prostor k rozptylu.

Při použití box-modelu předpokládáme, že po začátku trvání podmínek bezvětrí a inverze jsou koncentrace v kotlině závislé pouze na době trvání inverze, výšce horní hranice směšovací vrstvy a na vertikální souřadnici z . Horizontálně jsou koncentrace v celé kotlině v každém okamžiku stejné.

Vertikální rozptyl exhalací záleží na podmínkách rozptylu v inverzní vrstvě, předpokládáme přitom rozptylové podmínky ve II. třídě stability atmosféry.

Dále je třeba rozlišit, ze kterých zdrojů se exhalace dostanou nad horní hranici směšovací vrstvy a ze kterých nikoliv. Pokud koruna komína zasahuje nad hranici směšovací vrstvy ($H > L$), je zřejmé, že kouřová vlečka se bude pohybovat nad touto hranicí. Pokud efektivní výška $h = H + \Delta h_0$ počítaná pro rychlost větru 1 m/s nedosáhne hranice směšovací vrstvy, je opět zřejmé, že tentokrát exhalace zůstanou pod touto hranicí. V ostatních případech přijmeme následující předpoklad:

Pokud

$$H + \frac{\Delta h_0}{2} > L$$

pak tepelný vznos kouřové vlečky prorazí hranici směšovací vrstvy, exhalace se dostanou nad ní a koncentrace v kotlině neovlivní.

Pokud

$$H + \frac{\Delta h_0}{2} \leq L$$

pak tepelný vznos kouřové vlečky na proražení hranice směšovací vrstvy nestačí a exhalace zůstanou pod touto hranicí. Efektivní výška vlečky je pak rovna výšce směšovací vrstvy L .

Údolí, ve kterém se výpočet provádí, rozdělíme vertikálně na n vrstev o tloušťce Δz . Výšky horních hranic těchto vrstev označíme z_k , $k = 1, \dots, n$, potom $z_n = L$.

Plochy údolí ve výškách z_k označíme P_k . Objemy vzduchu v jednotlivých vrstvách pak budou

$$(8.1) \quad V_k = \frac{\Delta z}{3} \cdot \left(P_{k-1} + \sqrt{P_{k-1}P_k} + P_k \right)$$

Ve výškách z_k zároveň vypočítáme fiktivní koncentrace c_{fi} od všech zdrojů, jejichž exhalace zůstávají uvnitř inverze:

$$(8.2) \quad c_{fi}(z_k) = \frac{10^6 M_i}{2\pi \sigma_{yi} \sigma_{zi} u} \cdot (E_{1i} + E_{2i} + E_{3i} + E_{4i} + E_{5i} + E_{6i})$$

kde

$$(8.3) \quad E_{1i} = \exp\left(-\frac{(z_k - h_i)^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

$$(8.4) \quad E_{2i} = \exp\left(-\frac{(z_k + h_i)^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

$$(8.5) \quad E_{3i} = \exp\left(-\frac{(z_k - h_i - 2L)^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

$$(8.6) \quad E_{4i} = \exp\left(-\frac{(z_k + h_i - 2L)^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

$$(8.7) \quad E_{5i} = \exp\left(-\frac{(z_k - h_i + 2L)^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

$$(8.8) \quad E_{6i} = \exp\left(-\frac{(z_k + h_i + 2L)^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

Rovnice (8.2) popisuje rozptyl exhalací pod hranicí směšovací vrstvy s vyloučením bočního horizontálního rozptylu. Za rychlost větru u se dosazuje hodnota 0,5 m/s a za h_i hodnota $H_i + \Delta h_{0i}$. Dále předpokládáme, že za bezvětří exhalace nevystupují podél svahů vzhůru, takže neplatí vzájemné ovlivňování výšek h_i a z .

Rozptylové parametry σ_y a σ_z závisí na vzdálenosti od zdroje x (m). V případě výpočtu za bezvětří za hodnotu x bereme vzdálenost, do které by se exhalace dostaly při rychlosti větru 0,5 m/s za dobu trvání inverze, tj.

$$(8.9) \quad x = 1800 \cdot T$$

kde T je doba trvání bezvětří a inverze v hodinách.

Fiktivní koncentrace c_{fi} od všech zdrojů, jejichž exhalace zůstávají ve směšovací vrstvě, se pro každou výšku sečtou:

$$(8.10) \quad c_f(z_k) = \sum_i c_{fi}(z_k)$$

Součet M_f násobků celkových fiktivních koncentrací a objemů vzduchu, ve kterých se vyskytují, přes všechny nadmořské výšky až do horní hranice směšovací vrstvy L (výška hranice nad dnem kotliny) znamená vlastně fiktivní obsah znečišťující látky v inverzi:

$$(8.11) \quad M_f = \sum_k c_f(z_k) \cdot V_k$$

Ve skutečnosti je však za dobu T hodin emitováno do ovzduší celkové množství M_c znečišťující látky:

$$(8.12) \quad M_c = 3600 \cdot T \cdot \sum_i M_i$$

kde M_i jsou emise jednotlivých zdrojů v g/s a suma probíhá přes ty zdroje, jejichž exhalace zůstávají ve směšovací vrstvě.

Skutečný vertikální profil koncentrací $c(z)$ pod hranicí směšovací vrstvy pak bude

$$(8.13) \quad c(z_k) = c_f(z_k) \cdot \frac{M_c}{M_f}$$

a pokud $M_f = 0$, pak i $c(z_k) = 0$.

Pro tento skutečný vertikální profil pak bude platit

$$(8.14) \quad M_c = \sum_k c(z_k) \cdot V_k$$

tj. že množství znečišťující látky rozptýlené ve vzduchu v kotlině se rovná jejímu množství emitovanému do ovzduší v kotlině ze zdrojů exhalací za dobu trvání inverze.

Pro výpočet krátkodobé koncentrace v referenčním bodě za podmínek bezvětrí a inverze pak postačí z vypočtených hodnot vertikálního profilu koncentrací vypočítat lineární interpolací správnou hodnotu pro danou nadmořskou výšku referenčního bodu.

Určitým nedostatkem této metody je fakt, že tímto způsobem je možné počítat extrémní znečištění pouze v údolích, kotlinách atd. (i když zde k němu dochází nejčastěji), protože v rovinném terénu nejsou zřejmé hranice uzavřeného objemu vzduchu, do kterého zdroje znečištění exhalují. Tento nedostatek se dá obejít v oblastech, kde již delší dobu probíhá měření znečištění ovzduší. V těchto oblastech se hranice uzavřeného objemu vzduchu dají zhruba stanovit v místech, kde podle průměrných ročních koncentrací končí území s vysokým znečištěním ovzduší.

Vzhledem k tomu, že pro převážnou většinu míst v ČR nejsou k dispozici žádná meteorologická data o četnosti výskytu horních hranic inverzí při současném bezvětrí ani o době trvání bezvětrí při inverzích, je možné popsanou metodu využívat pouze k výpočtu extrémních krátkodobých koncentrací za předem stanovených podmínek.

9. Rozptyl exhalací z chladících věží tepelných elektráren

Metoda výpočtu rozptylu z chladících věží elektráren předpokládá, že spaliny z elektrárny nejsou vypouštěné komínem, ale jsou zavedené do chladících věží a spolu s vlhkým vzduchem z věže unikají do ovzduší. Metoda je v podstatě shodná s běžnými výpočty rozptylu, jiným způsobem se počítá pouze převýšení exhalační vlečky Δh . Za základ pro výpočet Δh byl převzatý postup Škulce a Janiskové z práce [13].

Pro výpočet převýšení exhalační vlečky z chladících věží platí:

a) pro stabilní teplotní zvrstvení (tj. pro I., II. a III. třídu stability)

$$(9.1) \quad \Delta h = \frac{1,6 \cdot F^{\frac{1}{3}} \cdot x_L^{\frac{2}{3}}}{u_H} \quad \text{pro } x_L < x_h'$$
$$= 2,9 \cdot \left(\frac{F}{u_H \cdot s_g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{pro } x_L \geq x_h'$$

kde

$$(9.2) \quad x_h' = \frac{2,4 \cdot u_H}{\sqrt{s_g}}$$

$$(9.3) \quad s_g = \frac{g}{T_e} \cdot (\gamma_d - \gamma)$$

V těchto rovnicích značí:

F (m^4/s^2) - počáteční vztlaková síla vzduchu opouštějícího chladící věž

x_L (m) - vzdálenost referenčního bodu od chladící věže ve směru větru

u_H (m/s) - rychlost větru ve výšce H

H (m) - výška chladící věže

T_e ($^{\circ}\text{K}$) - teplota vzduchu v okolí chladící věže

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ - tíhové zrychlení

$\gamma_d = 0,01^{\circ}\text{C/m}$ - adiabatický vertikální teplotní gradient

γ ($^{\circ}\text{C/m}$) - aktuální vertikální teplotní gradient v atmosféře, pro jednotlivé třídy stability předpokládáme:

Třída stability	γ ($^{\circ}\text{C/m}$)
I	-0,020
II	-0,011
III	0

b) pro indiferentní a labilní podmínky v atmosféře (IV. a V. třída stability) bude platit:

$$(9.4) \quad \Delta h = \frac{1,6 \cdot F^{\frac{1}{3}} \cdot (3x_L)^{\frac{2}{3}}}{u_H} \quad \text{pro } x_L < x_h''$$

$$(9.5) \quad = \frac{5,56 \cdot F^{\frac{3}{5}} \cdot H^{\frac{2}{5}}}{u_H} \quad \text{pro } x_L \geq x_h''$$

kde

$$(9.6) \quad x_h'' = 2,16 \cdot F^{\frac{2}{5}} \cdot H^{\frac{3}{5}}$$

a ostatní symboly mají stejný význam jako v (9.1).

Počáteční vztlakovou sílu vzduchu opouštějícího chladicí věž F vypočítáme podle rovnice:

$$(9.7) \quad F = \frac{w g D_v^2}{4} \cdot \left(1 - \frac{T_e}{T_{ch}} + (q_{ch} - q_e) \cdot \left(0,61 + \frac{f_{rt} \cdot L_v}{c_p \cdot T_{ch}} \right) \right)$$

ve které

w (m/s) - výstupní rychlost vzduchu z chladicí věže

D_v (m) - průměr chladicí věže v koruně

T_e (°K) - teplota okolního vzduchu, T_e = t_e + 273

T_{ch} (°K) - teplota vzduchu vystupujícího z chladicí věže, T_{ch} = t_{ch} + 273

q_e (-) - směšovací poměr v okolním vzduchu

q_{ch} (-) - směšovací poměr ve vzduchu z chladicí věže

L_v = 2,5 · 10⁶ J/kg - latentní teplo výparu vody

c_p = 1004 J/(kg.K) - měrné teplo při stálém tlaku

f_π (-) - korekční faktor na kondenzaci vodní páry

K jednotlivým veličinám nyní podrobněji:

Směšovací poměr v okolním vzduchu q_e vypočteme:

$$(9.8) \quad q_e = \frac{r}{100} \cdot \frac{0,622}{p_0} \cdot E_T(T_e)$$

kde r (%) je relativní vlhkost vzduchu

p₀ = 101325 Pa je normální tlak vzduchu na zemi

E_T(T_e) je tlak nasycených vodních par při teplotě T_e. Tento tlak při teplotě T vypočteme podle Clausius-Clapeyronovy rovnice

$$(9.9) \quad E_T(T) = E_r \cdot \exp\left(-\frac{L_v}{R_v} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)\right)$$

kde $E_r = 611 \text{ Pa}$ je tlak nasycených par při teplotě 0°C

$T_r = 273 \text{ °K}$ je normální teplota vzduchu

$R_v = 461 \text{ J/(kg.K)}$ je plynová konstanta pro vodní páru

Směšovací poměr q_{ch} ve vzduchu opouštějícím chladicí věž vypočítáme za předpokladu 100%-ní relativní vlhkost podle

$$(9.10) \quad q_{ch} = \frac{0,622}{p_0} \cdot E_T(T_{ch})$$

Pro výstupní rychlost w platí:

$$(9.11) \quad w = \frac{4 \cdot V_{ch}}{\pi \cdot D_v^2}$$

kde V_{ch} (m^3/s) je objem vzduchu opouštějícího chladicí věž (včetně zavedených spalin). Tento objem se skládá z objemu zavedených spalin V_s (m^3/s) a objemu vzduchu V_{ch}' (m^3/s), který prochází věží bez zavedených spalin, tj.

$$(9.12) \quad V_{ch} = V_s + V_{ch}'$$

Hodnota V_s i závislost V_{ch}' na vnější teplotě t_e a relativní vlhkosti r mají být obsažené ve vstupních údajích (viz 2.1.4.). Pokud závislost V_{ch}' na teplotě t_e a vlhkosti r počítáme pouze z několika změřených hodnot, předpokládáme o ní, že je lineární vzhledem k t_e a D , kde D je sytostní doplněk ve vzduchu:

$$(9.13) \quad D = \frac{100-r}{100} \cdot \frac{E_T(T_e)}{R_v \cdot T_e}$$

protože podstatné je, kolik vlhkosti se do vzduchu ještě vejde.

Podobně teplota vzduchu T_{ch} odcházejícího z chladicí věže (včetně zavedených spalin) se dá vyjádřit pomocí teploty spalin T_s ($^\circ\text{K}$) a teploty T_{ch}' ($^\circ\text{K}$) vzduchu, který odchází z věže, pokud spaliny do ní nejsou zavedené:

$$(9.13) \quad T_{ch} = \frac{M_s \cdot T_s + M_{ch}' \cdot T_{ch}'}{M_s + M_{ch}'}$$

kde M_s je hmotnost spalin

$$(9.14) \quad M_s = \frac{p_0 \cdot V_s}{R_s \cdot T_s}$$

$$(9.15) \quad R_s = R_d \cdot (1 + 0,61 \cdot s_1(T_s))$$

a M_{ch}' je hmotnost vzduchu, který prochází chladicí věží bez zavedených spalin:

$$(9.16) \quad M'_{ch} = \frac{p_0 \cdot V'_{ch}}{R'_{ch} \cdot T'_{ch}}$$

$$(9.17) \quad R'_{ch} = R_d \cdot (1 + 0,61 \cdot s_1(T'_{ch}))$$

Ve vzorcích (9.15) a (9.17) značí $s_1(T)$ měrnou vlhkost nasycených vodních par, která závisí na teplotě T :

$$(9.18) \quad s_1(T) = \frac{0,622 \cdot E_T(T)}{p_0 - 0,378 \cdot E_T(T)}$$

a $R_d = 287 \text{ J/(kg.K)}$ je plynová konstanta pro suchý vzduch.

Teplota T'_{ch} bude podobně jako objem V'_{ch} záviset na vnější teplotě t_e a relativní vlhkosti r . Pokud tato závislost nebude známá a bude nutné ji počítat z několika změřených hodnot, budeme ji považovat rovněž za lineární vzhledem k t_e a D , kde D je sytostní doplněk podle (9.13).

Závislosti $V'_{ch} = V'_{ch}(t_e, D)$ a $T'_{ch} = T'_{ch}(t_e, D)$ jsou vnitřními parametry dané chladicí věže, obecně jsou pro každou věž jiné a měly by být obsahem vstupních údajů.

Bezrozměrný parametr f_{rt} vyjadřuje průměrné relativní množství zkondenzované vodní páry při dané kombinaci teploty t_e a relativní vlhkosti r okolního vzduchu. V praxi se dá nahradit poměrem

$$(9.20) \quad f_{rt} = \frac{D_{m,rt}}{D_{rt}}$$

kde $D_{m,rt}$ je trvání situací s výskytem mlhy při relativní vlhkosti r a teplotě t_e

D_{rt} je celková doba trvání situací s relativní vlhkostí r a teplotou t_e

Matice hodnot f_{rt} pro různé třídy t_e a r musí být obsahem klimatických vstupních údajů pro dané místo zdroje (viz 2.2.2.).

Popsaným způsobem se tedy pro danou třídu t_e a r a danou třídu stability ovzduší vypočte veličina F a z ní převýšení Δh . Jestliže stojí více chladících věží vedle sebe, provede se dále korekce Δh na možné vzájemné ovlivnění vleček podle kapitoly 3.3.4. Získáme tak převýšení vlečky Δh_{jrt} při třídě stability j , třídě okolní teploty t a třídě relativní vlhkosti r . Efektivní výška vlečky se pak vypočte:

$$(9.21) \quad h_{jrt} = H + \Delta h'_{jrt}$$

Protože tímto způsobem získáme velké množství hodnot efektivní výšky (při 10 třídách t_e , 7 třídách r a 5 třídách stability je to 350), což je pro další výpočty zcela

nepraktické, zprůměrujeme hodnoty efektivních výšek pro každou třídu stability ovzduší pomocí váženého průměru. Vahou zde bude četnost výskytu dané kombinace třídy teploty t_e a třídy vlhkosti r v dané třídě stability j . Matice těchto relativních četností g_{jrt} musí být pro každou třídu stability obsahem klimatických vstupních údajů. Pro efektivní výšku h_j vlečky při třídě stability j pak bude platit

$$(9.22) \quad h_j = \sum_r \sum_t h_{jrt} \cdot g_{jrt}$$

S takto získanými hodnotami efektivní výšky pro danou třídu stability (a danou rychlost větru) pak již počítáme stejně jako při výpočtu znečištění z bodových zdrojů.

U tepelných elektráren často nastává stav, kdy jeden nebo více bloků (a tedy jedna nebo více chladících věží) není v provozu. Proto je vhodné vyjadřovat dobu překročení T_R zvolených koncentrací c_R podle kapitoly 5.5. na základě jednotlivých provozních režimů. Tento postup však lze provést pouze pro jediný zdroj a nikoliv pro více chladících věží současně. Protože však výpočty znečištění ovzduší od elektráren se obvykle provádějí pro větší území (nikoliv na velmi krátké vzdálenosti), dopustíme se pouze zanedbatelné chyby, pokud chladící věže elektrárny nahradíme věží jednou umístěnou v geometrickém středu nahrazovaných věží. Všechny ostatní vstupní údaje přitom zůstanou stejné, až na emisi znečišťujících látek, která bude součtem emisí z jednotlivých věží, které budou v jednotlivých provozních režimech v provozu. Stejně tak při výpočtu korekce převýšení podle kapitoly 3.3.4. počítáme se skutečným počtem provozovaných chladících věží při daném provozním režimu.

10. Interpretace výsledků

Jako výsledek výpočtu je třeba uvádět zejména hlavní charakteristiky znečištění ovzduší (viz kapitola 4) ve všech zvolených referenčních bodech, nejlépe tabelární formou. Vybrané údaje (např. maximální možnou koncentraci c_{\max} , roční průměry aj.) je vhodné zobrazit formou map znečištění ovzduší.

Při interpretaci výsledků je nutné mít na paměti několik skutečností:

- 1) Výpočetní rovnice byly stanovené za předpokladu maximální vzdálenosti referenčního bodu od zdroje 100 km. Pro delší vzdálenosti nelze metodiku použít.
- 2) Při výběru referenčních bodů nelze většinou postihnout podrobně všechny nerovnosti terénu. Protože program vyhodnocující terénní profily pracuje pouze s nadmořskými výškami v místech referenčních bodů a zdrojů, může se stát, že se nějaký terénní útvar (např. úzké údolí) "ztratí". Při konstrukci map znečištění ovzduší je nutné k těmto možnostem přihlídnout.
- 3) Klimatické vstupní údaje znamenají zprůměrované hodnoty jednotlivých veličin za delší časové období. Skutečný průběh meteorologických charakteristik v daném určitém roce se může od průměru značně lišit (např. větrná růžice nebo výskyt inverzí).
- 4) Přestože autoři metodiky byli vedeni snahou o maximální věrohodnost všech použitých postupů, je zřejmé, že základem metodiky je matematický model, který již svou podstatou znamená zjednodušení a nemožnost popsat všechny děje v atmosféře, které ovlivňují rozptyl znečišťujících látek. Proto jsou i vypočtené výsledky nutně zatížené nějakou chybou a nedají se interpretovat zcela striktně.
- 5) V metodice se nepočítá s pozadovým znečištěním ovzduší. Veškeré vypočtené výsledky se týkají pouze zdrojů zahrnutých do výpočtu.

Přesto předpokládáme, že předkládaná metodika může být spolehlivým základem pro hodnocení úrovně znečištění ovzduší v daných místech.

11. Závěr

Popsaná metodika je uceleným návodem, jak počítat a hodnotit znečištění ovzduší způsobené různými typy zdrojů. Cílem celého projektu je vytvoření obecně závazného předpisu pro výpočet znečištění ovzduší.

V dalším období je nutné verifikovat metodiku na dostatečně rozsáhlém souboru dat. Při této verifikaci ještě může dojít k některým změnám oproti současnému popisu.

Literatura

- [1] J.Maňák,J.Bubník,J.Keder,J.Macoun: Základní část metodiky výpočtu znečištění ovzduší ze stacionárních zdrojů (EKOAIR, ČHMÚ, Program péče o životní prostředí MŽP ČR, projekt GA/3224/93, listopad 1994)
- [2] Metodický pokyn odboru ochrany čistoty ovzduší MŽP ČR o použití emisních faktorů pro výpočet poplatků za znečišťování ovzduší (MŽP ČR, Praha 1994)
- [3] J.Bubník,M.Koldovský: Typizace počasí se zřetelem ke znečištění ovzduší (V: B.Böhm a kol.: Znečištění ovzduší v Podkrušnohoří, Sborník prací HMÚ Praha, sv.20, 1974, část 7.5.3., s.101-106)
- [4] CORINAR working group on emission factors for calculating 1990 emissions from road traffic (Commission of the European Communities, ECSC-EEC-EAEC, Brussel-Luxembourg 1993)
- [5] D.Jost: Die Neue TA-Luft (WEKA Fachverlag für technische Führungskräfte GmbH, Augsburg, 1993)
- [6] J.Bubník: Výpočet znečištění ovzduší pro stanovení a kontrolu technických parametrů zdrojů (MLVH, Praha 1979)
- [7] G.A.Briggs: Plume Rise from Multiple Sources (In: Cooling Towers and Environment - 1974, USA ERDA, Tennessee, 1976, s.161-179)
- [8] J.Maňák: Sekundární prašnost ze skládek popílku (MFF UK, Praha 1987)
- [9] J.Bubník: Stanovení optimálních výšek komínů v městské zástavbě (MFF UK, Praha 1987)
- [10] M.Nowicki: Gaussian plume dispersion coefficients dependent on roughness parameter and height above ground (7th World Clean Air Congress, Sydney 25.-29.8.1986, Referat strand B)
- [11] Opatření Federálního výboru pro životní prostředí ze dne 1.10.1991 k zákonu č.309 ze dne 9.7.1991 o ochraně ovzduší před znečišťujícími látkami ve znění Opatření FVŽP ze dne 23.6.1992, Příloha č.4.
- [12] J.Maňák: Rozptylová studie pro SO₂ v Děčíně a jeho blízkém okolí (EKOAIR, č.z.28/91, Praha 1991)
- [13] Š.Škulec, M.Janisková: Posúdenie alternatív vyvedenia odsírených spalín Elektrárne Chvaletice do komína alebo do chladiacich veží (SHMÚ, Jaslovské Bohunice, 1991)

- [14] J. Šantroch: Vybrané kapitoly z chemie ovzduší a vody (MLVH ČSR, Praha 1987)
- [15] P. Brimblecombe: Sostav i chimija atmosfery (Mir, Moskva 1988)
- [16] D. Houghton: Applied Meteorology (John Wiley & Sons Inc., New York 1985)