

EKOAIR - Služby čistotě ovzduší

RNDr Jan Maňák

ZÁKLADNÍ ČÁST METODIKY VÝPOČTU ZNEČIŠTĚNÍ OVZDUŠÍ

ZE STACIONÁRNÍCH ZDROJŮ

Druhá etapa - Konstrukce základních rovnic

výpočetního modelu

č. projektu: GA/3224/93

Praha 1993

Základní část metodiky výpočtu znečištění ovzduší ze stacionárních zdrojů

Druhá etapa - Konstrukce základních rovnic výpočetního modelu

1. Úvod

Hodnocení vlivu zdrojů plyných i prašných exhalací na znečištění ovzduší se v současné době provádí podle doporučené metodiky "Výpočet znečištění ovzduší pro stanovení a kontrolu technických parametrů zdrojů" [1]. Tato metodika byla vydána Ministerstvem lesního a vodního hospodářství v r.1979, tj. před 14 lety, z čehož je zřejmé, že nemůže odpovídat současné úrovni znalostí v tomto oboru ani úrovni obvyklé v ostatních státech Evropy. Její nedostatky v praxi ovlivňují vypočtené hodnoty znečištění ovzduší a spočívají zejména v tom, že:

- nedá se vypočítat extrémní znečištění při inverzích a bezvětrí
- nelze provést výpočet pro velmi krátké vzdálenosti pod 100 m (potřebné pro malé zdroje)
- použití horního nebo dolního odhadu znečištění se řídí subjektivním hlediskem
- při výpočtu koncentrací prachu podle metodiky a podle jejích dodatků můžeme dojít k různým výsledkům
- není řešen tepelný vznos kouřové vlečky, pokud více komínů stojí vedle sebe, což může značně ovlivnit výsledek
- při výpočtech znečištění ovzduší na delší vzdálenosti (např. pro určitou oblast) není možné zahrnout vliv depozice a transformace znečišťujících látek.

Podobných nedostatků by se dala najít ještě celá řada.

V praxi se tyto nedostatky obcházejí pomocí nejrozličnějších parametrizací a náhradních postupů, což vede k různým výsledkům i u stejných zdrojů znečištění ovzduší v závislosti na osobě autora výpočtu. Tento stav je do budoucna neudržitelný zejména vzhledem k tomu, že výpočet ovlivnění čistoty ovzduší zdrojem exhalací je vyžadován na základě zákona ČNR č.244/92 Sb. a tudíž by měl být prováděn podle jednotné metodiky.

Tato práce uzavírá první etapu tvorby nové metodiky výpočtu znečištění ovzduší ze stacionárních zdrojů. Obsahuje základní rovnice a postupy, kterých by měl výpočet koncentrací plynných látek i prachu používat. Konkrétní hodnoty některých koeficientů v rovnicích, specifikace vstupních dat, specifikace a tvar výsledků a další podrobnosti by měly být obsahem příští práce, jejímž výsledkem by měla být kompletní metodika. Při nezbytné verifikaci modelem vypočtených výsledků se možná ukáže nutnost změny některých rovnic nebo postupů.

2. Základní rovnice metodiky

Z důvodů kontinuity s předcházejícím obdobím, i proto, že k současně platné metodice je již připraveno mnoho klimatických vstupních dat, se při výpočtu rozptylu znečištění přidržíme v současnosti používaného Gaussova modelu kouřové vlečky. Znamená to, že základ výpočtu koncentrace plynné znečišťující látky šířící se z kontinuálního bodového zdroje bude popsán rovnicemi

$$(1) \quad c_D = \frac{10^6 M}{2\pi \sigma_y \sigma_z u_K} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \cdot \left(e^{-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}} \right)$$

pro dolní odhad znečištění a

$$(2) \quad c_H = \frac{10^6 M}{2\pi \sigma_y \sigma_z u_k} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \cdot 2 e^{-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}}$$

pro horní odhad znečištění.

V rovnicích (1) a (2) značí:

M - emise znečišťující látky z bodového zdroje v g/s

u_k - rychlost větru v úrovni, ve které jsou exhalace vypouštěné (např. koruna komína) v m/s

$\sigma_y(x)$, $\sigma_z(x)$ - příčný horizontální a vertikální rozptylový parametr v m

x - vzdálenost referenč. bodu od zdroje ve směru větru (m)

y - vzdálenost referenč. bodu od zdroje ve směru kolmém na vítr (m)

z - rozdíl nadmořských výšek referenčního bodu a terénu v místě zdroje (m)

h - efektivní výška zdroje (m)

Koncentrace c_D a c_H pro dolní a horní odhad pak vycházejí v $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

V dalších kapitolách se budeme věnovat jednotlivým proměnným v těchto rovnicích a vlivu zvlněného terénu na velikost koncentrace.

3. Vliv zvlněného terénu na výpočet koncentrací

3.1. Koeficient pro zvlněný terén

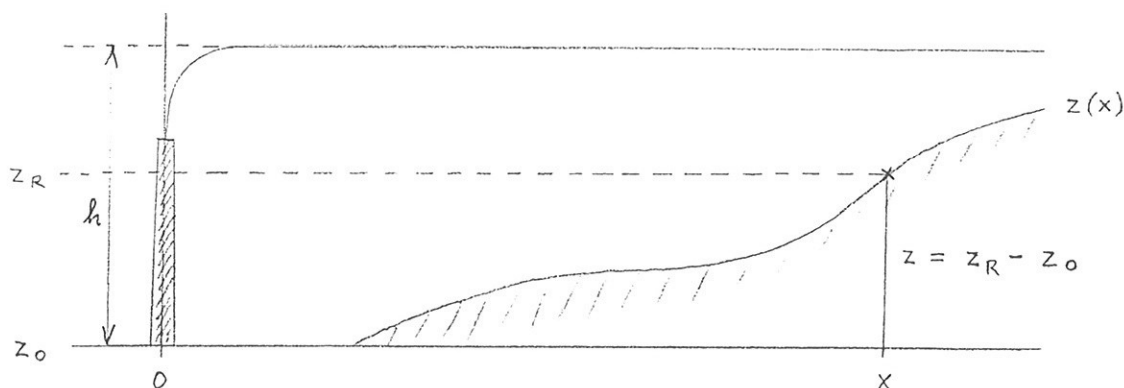
Současně platná metodika řeší vlivy zvlněného terénu na výpočet koncentrace znečišťující látky pomocí horního a dolního odhadu znečištění podle rovnic (1) a (2) s tím, že skutečnost se pohybuje někde mezi těmito odhady a blíží se

spíše té hodnotě, které lépe odpovídá terén mezi zdrojem a referenčním bodem. Přitom se předpokládá platnost dolního odhadu, pokud referenční bod vyvýšený nad úroveň paty komína leží na "izolovaném kopci" (rovina odrazu prochází patou komína) a platnost horního odhadu, pokud referenční bod leží na náhorní rovině (rovina odrazu prochází referenčním bodem). Výsledkem jsou 2 různé hodnoty koncentrací a zcela subjektivní rozhodování o tom, kterému z odhadů, jež se mohou lišit až o 100 %, dát v daném případě přednost.

Tento nedostatek lze odstranit zavedením koeficientu α pro zvlněný terén, pomocí kterého lze vhodně kombinovat oba odhady. Skutečná koncentrace c se pak dá vyjádřit rovnicí

$$(3) \quad c = (1-\alpha)c_D + \alpha c_H, \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$

přičemž koeficient α bude roven poměru plochy, kterou vytváří terén na vertikálním řezu mezi zdrojem a referenčním bodem, a plochy obdélníka, jehož jednu stranu tvoří vzdálenost mezi zdrojem a ref. bodem a druhou stranu rozdíl jejich nadmořských výšek - viz obr.1.



Obr.1. Vertikální řez terénem mezi zdrojem a ref. bodem

Na obr.1 značí:

z_R - nadmořská výška referenčního bodu

z_0 - nadmořská výška terénu v místě zdroje (paty komína)

$z = z_R - z_0$

x - vzdálenost referenčního bodu od zdroje

h - efektivní výška zdroje

$z(x)$ - profil terénu v řezu

V jednoduchém případě zobrazeném na obr.1 pak bude platit

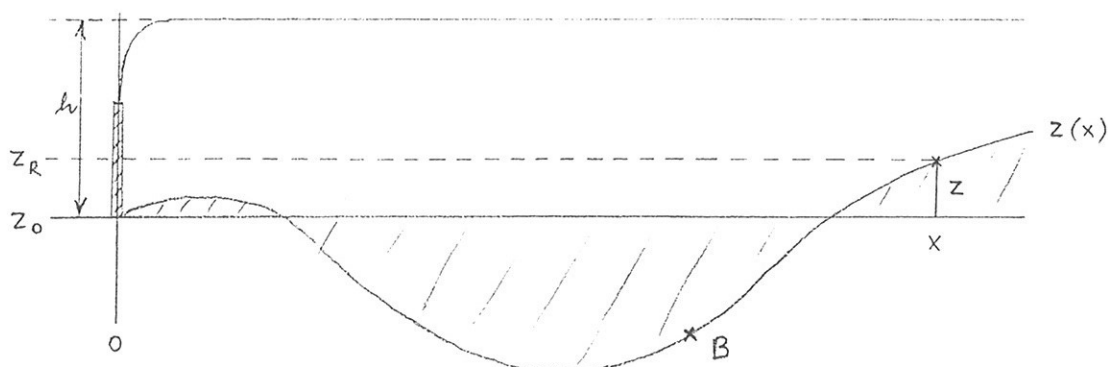
$$(4) \quad \psi = \frac{1}{xz} \cdot \int_0^x z(x) dx$$

Pro rovinný terén v hladině z_0 s referenčním bodem vyvýšeným nad něj o výšku z pak bude $\psi = 0$ a podle rovnice (3) $c = c_D$, naopak pro náhorní rovinu ve výšce z_R od komína až k referenčnímu bodu bude $\psi = 1$ a $c = c_H$.

V praxi však mohou nastat i složitější případy profilu terénu:

a) hluboké údolí mezi zdrojem a ref. bodem

V tomto případě by použití vztahu (4) vedlo k záporné hodnotě ψ (viz obr.2).



Obr.2. Profil údolí mezi zdrojem a referenčním bodem

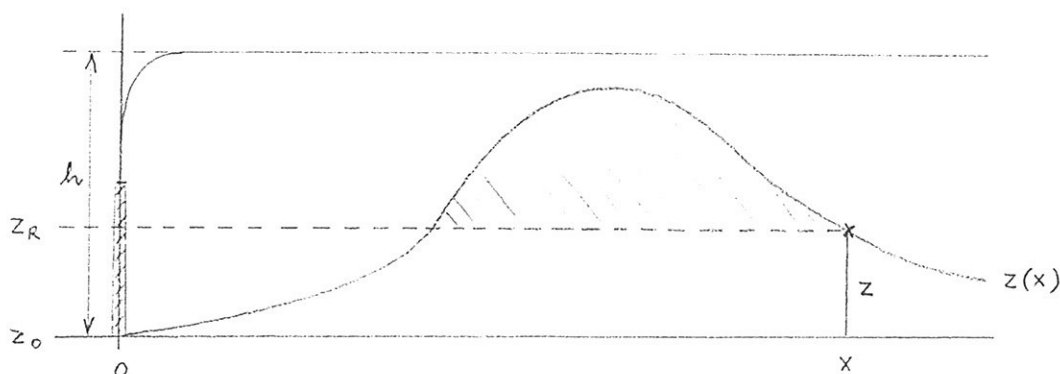
Tuto obtíž odstraníme zavedením funkce

$$(5) \quad \begin{aligned} z_1(x) &= z(x) - z_0 && \text{pro } z(x) > z_0 \\ &= 0 && \text{pro } z(x) \leq z_0, \end{aligned}$$

tj. do integrálu budeme načítat pouze kladné plochy nad křivkou $z(x)$.

b) referenční bod na závětrné straně kopce

V tomto případě by použití vztahu (4) mohlo vést k hodnotě $\mathcal{U} > 1$ (viz obr.3.), přestože je zřejmé, že na závětrné straně kopce naopak dochází k útlumu koncentrací.



Obr.3. Referenční bod na závětrné straně kopce.

Tento nedostatek odstraníme tím, že jednak do integrálu \mathcal{U} budeme počítat pouze plochu pod křivkou $z(x)$ mezi hladinami z_0 a z_R a jednak od této hodnoty ještě odečteme plochu nad hladinou z_R , kterou uzavírá křivka $z(x)$ (na obr.3 šrafováno), avšak jen do té míry, aby \mathcal{U} neklesl pod nulu.

Proto zavedeme funkci

$$(6) \quad \begin{aligned} z_2(x) &= z(x) - z_R && \text{pro } z(x) > z_R \\ &= 0 && \text{pro } z(x) \leq z_R \end{aligned}$$

Pomocí $z_1(x)$ a $z_2(x)$ lze pak vyjádřit

$$(7) \quad \alpha = \frac{1}{xz} \int_0^x (z_1(x) - 2z_2(x)) dx$$

c) referenční bod pod úrovní terénu v místě zdroje

Pokud se bude nacházet referenční bod v údolí oproti zdroji ve vyšší nadmořské výšce (viz obr.2, bod B), pak $z_R < z_0$. V tomto případě budeme automaticky předpokládat platnost dolního odhadu znečištění, takže bude platit $\alpha = 0$.

S přihlédnutím k úpravám v odstavcích a), b) a c) potom bude pro koeficient α platit

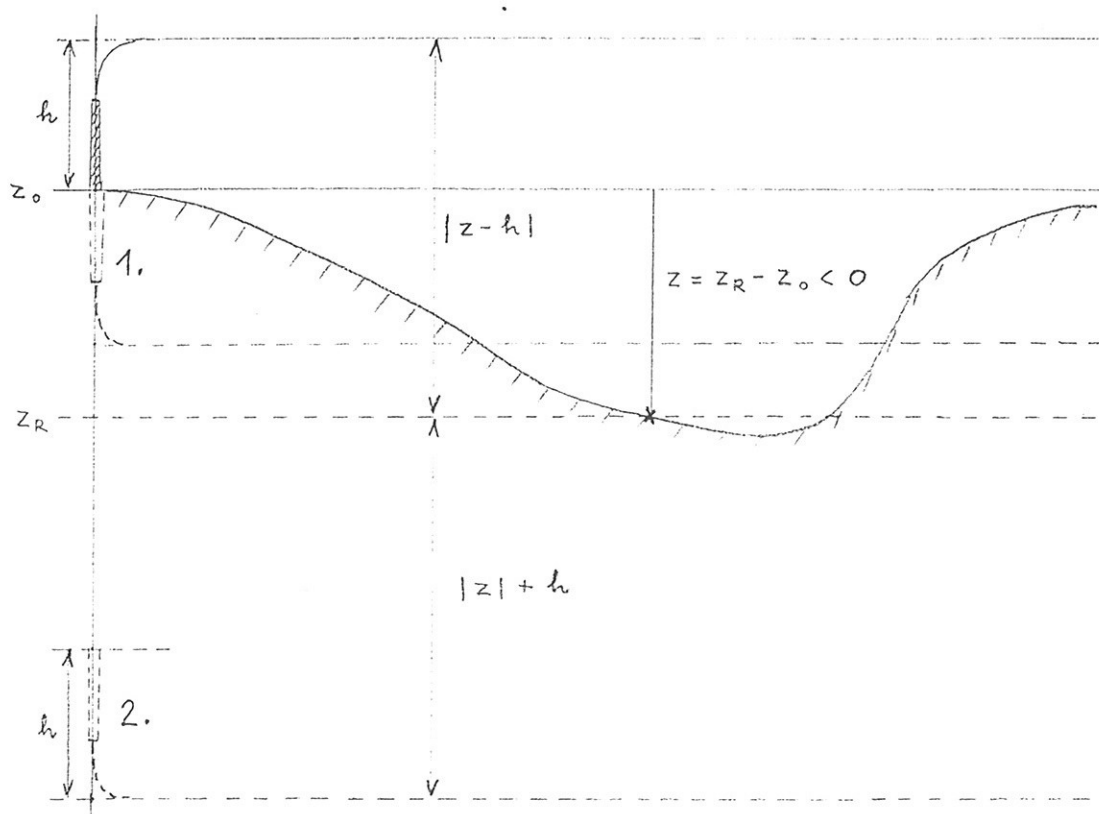
$$(8) \quad \alpha = \max \left(\frac{1}{x(z_R - z_0)} \int_0^x (z_1(x) - 2z_2(x)) dx, 0 \right) \text{ pro } z_R > z_0$$

$$= 0 \text{ pro } z_R \leq z_0$$

Výpočet koeficientu α v praxi bude provádět speciální program, který dovede proložit sítí referenčních bodů a zdrojů spojitou plochu, mezi každou dvojicí zdroj - referenční bod vést vertikální řez a vypočítat integrál α . Výsledkem bude matice α_{ij} (i - číslo ref. bodu, j - číslo zdroje), která bude sloužit jako vstupní údaj pro vlastní výpočet koncentrací. Na programu se v současné době pracuje, k dispozici bude koncem roku 1993.

3.2. Úprava dolního odhadu znečištění

Mějme situaci, kdy referenční bod leží v údolí pod úrovní nadmořské výšky terénu v místě zdroje (viz obr.4), to znamená, kdy $z_R < z_0$ a $z < 0$.



Obr.4. Dolní odhad znečištění v bodě pod úrovní paty komína

Současná metodika řeší tuto situaci jednoduše tím, že pokládá $z = 0$, tj. nerozlišuje mezi referenčním bodem v úrovni úpatí komína a referenčním bodem i hluboko pod touto úrovní. Tím značně nadhodnocuje koncentrace v těchto případech.

Pokud bychom do rovnice (1) v tomto případě dosadili záporné z , setkáme se s obtíží, že pro z blízká hodnotě $-h$ bude referenční bod silně ovlivňován fiktivním zdrojem (na obr.4 označený 1.) popisujícím odraz znečištění od hladiny z_0 , kterému ve vztahu (1) odpovídá odrazový člen

$$\exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_x^2}\right)$$

To by bylo v příkrém rozporu s realitou, kdy naopak mají být v tomto případě koncentrace nižší.

Proto budeme v tomto případě požadovat, aby odraz probíhal až od hladiny z_R (hladina referenčního bodu), což je popsáno fiktivním zdrojem 2. na obr.4 a v rovnici (1) tím, že v odrazovém členu zavedeme $|z|$ místo z , takže vztah pro dolní odhad znečištění bude mít tvar

$$(9) \quad c_D = \frac{10^6 M}{2\pi \sigma_y \sigma_z u_k} \cdot e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \cdot \left(e^{-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(|z|+h)^2}{2\sigma_z^2}} \right)$$

Horní odhad bude v tomto případě roven dolnímu odhadu, protože u něj se předpokládá odraz od hladiny referenčního bodu automaticky.

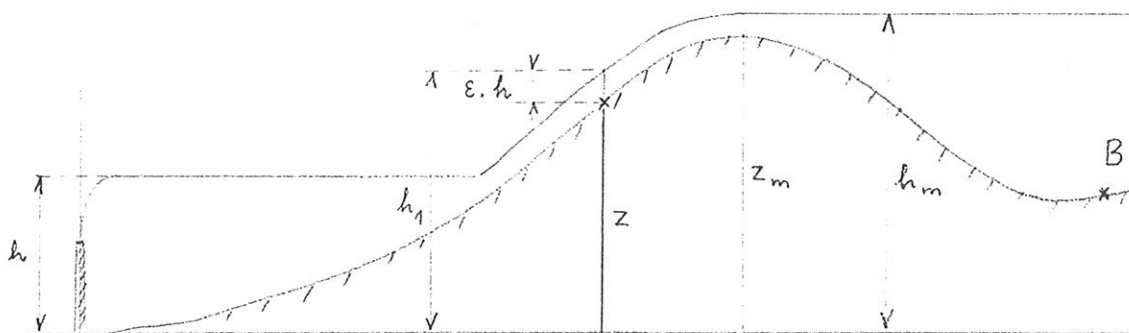
Shrňme-li výsledky podkapitol 3.1. a 3.2. a dosadíme-li vztahy (2) a (9) do rovnice (3), získáme pro výslednou koncentraci vzorec

$$(10) \quad c = \frac{10^6 M}{2\pi \sigma_y \sigma_z u_k} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \cdot \left((1+u) e^{-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}} + (1-u) e^{-\frac{(|z|+h)^2}{2\sigma_z^2}} \right)$$

3.3. Úprava efektivní výšky zdroje podle terénu

Případ, kdy referenční bod leží v nadmořské výšce vyšší než nadmořská výška středu kouřové vlečky (efektivní výška), řeší současná metodika tak, že referenčnímu bodu přiřadí výšku z nad hladinou z_0 , odpovídající 80 % efektivní výšky zdroje. Tím dochází jednak k tomu, že v dané vzdálenosti ve všech referenčních bodech s různými výškami vyššími než $0,8h$ vychází stejná koncentrace, jednak k tomu, že na závětrné straně i vysokých hor se nepočítá s žádným útlumem koncentrací.

Zvolíme proto opačný postup a budeme předpokládat, že podél svahů vyšších než efektivní výška zdroje bude kouřová vlečka vystupovat tak, aby vždy platilo, že $h_1 > z$ (viz obr.5).



Obr.5. Vzrůst efektivní výšky vlečky podél svahů

Význam symbolů na obr.5:

- h - efektivní výška kouřové vlečky způsobená zdrojem
- h_1 - efektivní výška kouřové vlečky v referenčním bodě o výšce z nad úrovní úpatí komína
- z - rozdíl nadmořských výšek ref. bodu a úpatí komína
- ϵ - parametr růstu efektivní výšky vlivem terénu
- z_m - maximální výška terénu nad úrovní úpatí komína mezi zdrojem a referenčním bodem
- h_m - efektivní výška kouřové vlečky pro body na závětrné straně kopce

Kouřová vlečka tedy bude na návětrné straně svahů vyšších než původní efektivní výška h kopírovat terén ve výšce $\epsilon.h$ nad terénem a za vrcholem kopce již zůstane v nové výšce h_m . Tuto skutečnost můžeme vyjádřit vztahem:

$$(11) \quad \begin{aligned} h_1 &= z + \epsilon h & \text{pro } z > (1 - \epsilon)h \\ &= h & \text{pro } z \leq (1 - \epsilon)h \end{aligned}$$

Parametr ϵ bude záviset na stabilitě atmosféry. Jeho konkrétní hodnoty pro různé třídy stability ovzduší budou předmětem další práce na metodice a jeho hodnoty ovlivní i verifikace metodiky. Prozatím předpokládáme, že pro silně stabilní teplotní zvrstvení se jeho hodnota bude pohybovat kolem 0,05 - 0,1, při normálním teplotním zvrstvení okolo 0,2 - 0,25 a při silné instabilitě kolem 0,5.

Za vrcholem kopce již nepředpokládáme pokles efektivní výšky podél svahů zpět. Pro body na závětrné straně kopců (viz bod B na obr.5) zůstane osa kouřové vlečky ve výšce $h_1 = h_m$:

$$(12) \quad \begin{aligned} h_m &= z_m + \epsilon h & \text{pro } z_m > (1 - \epsilon)h \\ &= h & \text{pro } z_m \leq (1 - \epsilon)h \end{aligned}$$

Tato skutečnost bude zmenšovat vypočtené koncentrace na závětrné straně svahů, tj. bude popisovat závětrný útlum. Hodnota z_m pro každou dvojici zdroj - referenční bod bude opět výsledkem programu zmiňovaného v závěru odstavce 3.1., který bude počítat profily terénu mezi zdrojem a referenčním bodem. Matice z_{mij} bude sloužit jako vstupní údaj pro vlastní výpočet koncentrací.

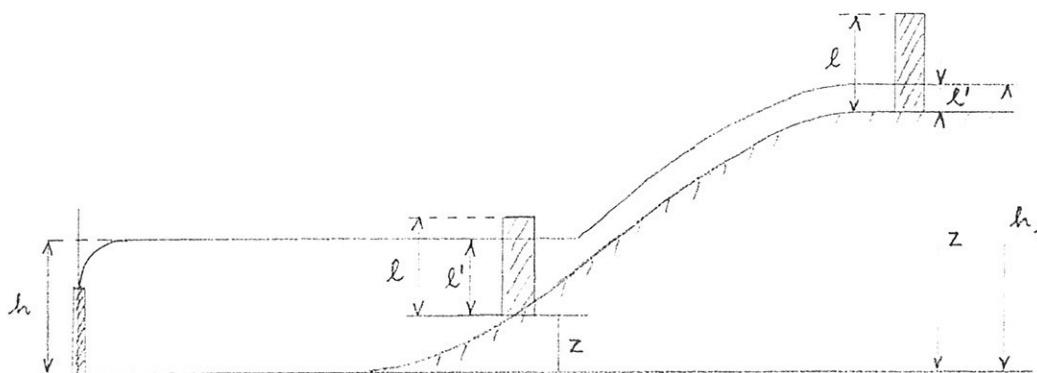
Protože bude vždy platit $z_m \geq z$ (nebude-li nejvyšší bod na profilu terénu převyšovat výšku referenčního bodu, bude nejvyšším bodem referenční bod sám), dá se rovnice (12) zobecnit i na body na návětrné straně svahů.

4. Výpočet koncentrací na budovách

U referenčních bodů umístěných na budovách bude nutné rozlišovat výšku z terénu v místě budovy nad úrovní úpatí komína a samotnou výšku l referenčního bodu nad terénem. Protože předpokládáme, že existence budovy neovlivní ani prostor, do kterého se kouřová vlečka rozptyluje, ani vze-

stup její osy, bude pro účely výpočtu integrálu \mathcal{V} i pro účely úpravy efektivní výšky vlečky podle vztahů (11) a (12) rozhodující rozdíl z nadmořských výšek terénu v místě budovy a terénu v místě zdroje, nikoliv výška $z + \ell$ referenčního bodu nad terénem v místě zdroje.

Podle rovnice (11) (resp. (12)), kam se dosadí z (resp. z_m), se tedy vypočítá efektivní výška h_1 v místě referenčního bodu. Bude-li nyní platit $z + \ell \leq h_1$, pak se do výpočtu koncentrací dosadí výška referenčního bodu $z + \ell$. Bude-li $z + \ell > h_1$, do výpočtu se dosadí výška $z + \ell'$ taková, aby se rovnala efektivní výšce h_1 (viz obr.6).



Obr.6. Výpočet koncentrací na budovách

Na základě toho se v rovnicích (1) a (2) v členech popisujících vertikální rozptyl namísto z dosadí v členu pro přímý rozptyl

$$(13) \quad \begin{aligned} z' &= z + \ell & \text{pro } z + \ell \leq h_1 \\ &= h_1 & \text{pro } z + \ell > h_1 \end{aligned}$$

a v členu popisujícím odraz

$$(14) \quad \begin{aligned} z'' &= |z| + \ell & \text{pro } z + \ell \leq h_1 \\ &= h_1 & \text{pro } z + \ell > h_1 \end{aligned}$$

Tento postup zaručí, že ve všech bodech na budově, které budou ležet nad osou kouřové vlečky v daném místě, bude koncentrace stejná jako v ose vlečky.

Výpočet koncentrací na budovách se většinou provádí na krátké vzdálenosti. V těchto případech je zároveň nutné počítat se skutečnou koncentrací znečišťující látky přímo v bodovém zdroji, tj. zavést do vztahu objem V_s vzduchu (spalin) odcházejícího ze zdroje (V_s je vyjadřován v m^3/s za normálního tlaku a při teplotě 0°C). Vztah (10) pak bude mít tvar

$$(14) \quad c = \frac{10^6 M}{2\pi\sigma_y\sigma_z u_k + V_s} \cdot e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \cdot \left((1+\alpha) e^{-\frac{(z'-h_1)^2}{2\sigma_z^2}} + (1-\alpha) e^{-\frac{(1z''+h_1)^2}{2\sigma_z^2}} \right)$$

5. Rychlost větru

Při stanovení rychlosti větru u_k , která je dosazována do vztahů pro výpočet koncentrací, budeme postupovat shodně se současnou metodikou, tj. budeme předpokládat, že u_k je rychlost větru ve výšce H nad terénem, kde H je stavební výška komína. Pro u_k bude platit mocniný vztah

$$(15) \quad u_k = u_0 \left(\frac{H}{10} \right)^p \quad \text{pro } H > 10 \text{ m}$$

$$= u_0 \quad \text{pro } H \leq 10 \text{ m}$$

kde u_0 je rychlost větru ve výšce 10 m nad terénem (standardní meteorologická výška)

a p je parametr závislý na stabilitě atmosféry

Případná změna hodnot parametru p oproti současné metodice bude opět předmětem další práce.

6. Stanovení efektivní výšky kouřové vlečky

6.1. Základní vztahy

Efektivní výška kouřové vlečky h je definována jako součet stavební výšky H a převýšení Δh :

$$(16) \quad h = H + \Delta h$$

Převýšení vlečky Δh závisí nejen na parametrech zdroje, tj. na množství vypouštěného vzduchu, jeho teplotě, rychlosti vypouštění atd., ale rovněž na okamžitých podmínkách v ovzduší (teplota, vlhkost, stabilita atmosféry, turbulence a zejména rychlost větru), a jeho určení a určení jeho průběhu se vzdáleností od zdroje patří k nejsložitějším problémům při vytváření modelů rozptylu znečišťujících látek. Analytické řešení tohoto problému není známé, pro stanovení Δh se v literatuře uvádějí pouze empirické vzorce.

Nejčastěji se předpokládá, že Δh je nepřímo úměrné rychlosti větru u_k a že než exhalace dosáhnou konečného převýšení Δh , pohybují se po křivce podobné funkci $z = x^{2/3}$, kde x je vzdálenost od zdroje. Těchto předpokladů se přidržíme i v tomto modelu, takže můžeme psát:

$$(17) \quad \Delta h = \frac{\Delta h_0}{u_k} \cdot \left(\frac{x}{x_m} \right)^{2/3} \quad \text{pro } x < x_m \text{ a } u_k \geq 1 \text{ m/s}$$
$$= \frac{\Delta h_0}{u_k} \quad \text{pro } x \geq x_m \text{ a } u_k \geq 1 \text{ m/s}$$

kde x_m je vzdálenost od zdroje, kde vlečka dosáhne svého konečného převýšení

a Δh_0 je převýšení vlečky při rychlosti větru 1 m/s

Pro situace s malou rychlostí větru a při bezvětří předpokládáme, že Δh_0 zůstane na stejné hodnotě jako při $u_k = 1$ m/s. Veličinu Δh_0 pak můžeme označit za převýšení vlečky při bezvětří.

Současná metodika používá pro stanovení Δh_0 vztah

$$(18) \quad \Delta h_0 = 100 Q^{1/4} \quad \text{pro } H \leq 100 \text{ m}$$

$$= (1,5 H - 50) Q^{1/4} \quad \text{pro } H > 100 \text{ m}$$

kde Q je tepelná vydatnost plynů odcházejících ze zdroje v MW daná rovnicí

$$(19) \quad Q = 10^{-3} c_p t_s V_s = 10^{-3} c_p (T_s - T_N) V_s$$

Zde značí:

t_s - teplotu odcházejících plynů (spalin) ve $^{\circ}\text{C}$

T_N - teplotu 273 $^{\circ}\text{K}$

T_s - teplotu odcházejících plynů ve $^{\circ}\text{K}$

V_s - objem odcházejících plynů za jedn. času při teplotě T_N (za normálních podmínek)

c_p - měrné teplo odcházejících plynů při stálém tlaku

Vztah (18) dává poměrně dobré výsledky u zdrojů s velkou tepelnou vydatností, ale nevyhovuje pro zdroje malé, protože převýšení od malých zdrojů nadhodnocuje.

Pro výpočet Δh_0 je rovněž možné použít Briggsův vztah [2]:

$$(20) \quad \Delta h_0 = 1,6 F^{1/3} \cdot (10 H)^{2/3}$$

kde F je počáteční vztlaková síla v m^4s^{-3} definovaná

$$(21) \quad F = g w_0 \left(\frac{d}{2} \right)^2 \cdot \frac{T_s - T_0}{T_s}$$

Zde značí:

g - tíhové zrychlení (m/s^2)

w_0 - rychlost plynů vystupujících ze zdroje (m/s)

d - průměr zdroje (komína v koruně) (m)

T_0 - teplota vzduchu v okolí zdroje, v praxi se dá nahradit hodnotou $T_N = 273 \text{ } ^\circ\text{K}$

Mezi veličinami F a Q existuje vztah (viz [3]):

$$(22) \quad F = \frac{10^3 g}{\pi c_p T_0} \cdot Q ,$$

po dosazení numerických hodnot

$$(23) \quad F = 8.34 Q$$

Tak je možné použít tepelnou vydatnost exhalací Q ve vztahu (20) pro výpočet převýšení vlečky. Po dosazení různých hodnot Q a H zjistíme, že Briggsův vztah dává podobné převýšení jako současná metodika pro malé zdroje, ale několikanásobně větší pro zdroje velké. Z toho důvodu rovněž není vhodný pro výpočet převýšení v nové metodice.

Pro výpočet převýšení kouřové vlečky za bezvětří proto zvolíme následující postup:

Pro zdroje s malou tepelnou vydatností budeme v souhlase s mnohými empirickými vzorci z literatury předpokládat, že Δh_0 bude přímo úměrné $Q^{1/3}$. Přitom ze zkušenosti je známo, že při bezvětří za stabilních situací se exhalace z domácích topenišť dostávají do výšky zhruba 10 - 20 m nad komíny, kde zůstávají ve vrstvách téměř bez pohybu. Domácí topeniště mívají tepelný výkon kolem 25 kW a odcházející spaliny pak mohou mít tepelnou vydatnost kolem 0,003 MW. Pro malé zdroje se odsud dá odvodit pro převýšení kouřové vlečky za bezvětří vztah

$$(24) \quad \Delta h_0 = 108 Q^{1/3}$$

Pro zdroje s velkou tepelnou vydatností vztah (18) ze současné metodiky vcelku vyhovuje, avšak neexistuje žádný teoretický důvod pro to, aby při nějaké tepelné vydatnosti Q záviselo převýšení Δh_0 na výšce komína H . K odstranění H ze vztahu (18) použijeme statistický vztah z práce [4], kde byla pro severočeskou oblast zjišťována závislost mezi výškou komína a tepelnou vydatností exhalací. Pro výšku komína vyšší než 75 m měla tato závislost tvar

$$(25) \quad Q = 8,99 \cdot 10^{-6} \cdot H^{3,074}$$

Když z této závislosti vyjádříme H a dosadíme do vztahu (18) pro komíny vyšší než 100 m, získáme závislost, která se dá vyjádřit přibližným vztahem

$$(26) \quad \Delta h_0 = 50 Q^{3/5}$$

Vzorce (24) a (26) dávají stejné převýšení pro $Q = 18$ MW, takže celkový vztah pro převýšení za bezvětří bude

$$(27) \quad \begin{aligned} \Delta h_0 &= 108 Q^{1/3} && \text{pro } Q \leq 18 \text{ MW} \\ &= 50 Q^{3/5} && \text{pro } Q > 18 \text{ MW} \end{aligned}$$

Platnost vztahu (27) bude ověřována v další práci.

6.2. Korekce převýšení na stabilitu atmosféry

Je zřejmé, že za stabilních podmínek v atmosféře exhalace při bezvětří vystoupí do menší výšky než při instabilním teplotním zvrstvení. Tuto skutečnost bude popisovat korekční faktor stability atmosféry K_S :

$$(28) \quad \Delta h_0 = K_S \cdot A Q^B$$

kde A, B jsou konstanty podle vztahu (27).

O korekčním faktoru K_s předpokládáme, že by byl zhruba roven 1 pro normální teplotní zvrstvení atmosféry s teplotním gradientem $\gamma = 0,6 - 0,7$ °C/100m. Za stabilních podmínek s $\gamma < 0$ by dosahoval hodnot 0,6 - 0,7, za instabilních podmínek by naopak vzrostl na 1,2 - 1,3. Pro jeho vyjádření by platil vztah

$$(29) \quad K_s = a e^{b(\gamma - c)}$$

kde $\gamma = - \frac{\partial T_0}{\partial z}$ je vertikální teplotní gradient ve °C/m

a, b, c jsou empirické konstanty, jejich velikost bude určena v další práci.

6.3. Převýšení v malých vzdálenostech

V malých vzdálenostech od zdroje kouřová vlečka ještě nedosáhne svého konečného převýšení. V podkapitole 6.1. se předpokládá, že přitom bude tvořit křivku $z = x^{2/3}$ až do vzdálenosti x_m , kde dosáhne svého konečného převýšení Δh .

O vzdálenosti x_m předpokládáme, že bude záviset na tepelné vydatnosti exhalací Q a na stabilitě atmosféry. Vztah, který by vyhovoval tomuto předpokladu, je obsažen např. v německé metodice [5]. Zde se počítá s tím, že

$$(30) \quad \begin{aligned} x_m &= K_1 \cdot Q^{2/5} && \text{pro } Q > 6 \text{ MW} \\ &= K_1 \cdot Q^{5/8} && \text{pro } Q \leq 6 \text{ MW} \end{aligned}$$

kde konstanta K_1 závisí na stabilitě atmosféry.

S použitím těchto vztahů se pro x_m dá odvodit přibližný vzorec

$$(31) \quad x_m = K_m \cdot \sqrt{Q}$$

kde konstanta K_m bude mít pro jednotlivé třídy stability ovzduší hodnoty

tř. stability	K_m
I	184
II	200
III	236
IV	300
V	411

Vztah pro převýšení kouřové vlečky pak bude mít s využitím rovnic (17), (28) a (31) tvar

$$\begin{aligned}
 (32) \quad \Delta h &= \frac{K_s A Q^B}{u_K} \cdot \left(\frac{x}{K_m \sqrt{Q}} \right)^{2/3} && \text{pro } x < K_m \sqrt{Q} \\
 &= \frac{K_s A Q^B}{u_K} && \text{pro } x \geq K_m \sqrt{Q}
 \end{aligned}$$

6.4. Převýšení při chladných exhalacích

V případě exhalací o teplotě nízké ve srovnání s teplotou kouřových plynů ze spalovacích procesů vede použití vzorce (27) k příliš velkému převýšení zejména v těch případech, kdy je vypouštěno velké objemové množství vzduchu o teplotě blízké teplotě okolí. V těchto případech by se pro popis převýšení spíše hodila Hollandova formule:

$$(33) \quad \Delta h = \frac{1,5 w_0 d}{u_K}$$

kde w_0 - výstupní rychlost plynů v m/s
 d - vnitřní průměr komína (výduchu)

Abychom se vyhnuli komplikacím a nespojitostem při přechodu z rovnice (27) na vztah (33), můžeme zavést pravidlo, podle kterého

$$(34) \quad \Delta h_0 = (1 - \beta) \cdot 1,5 w_0 d + \beta \cdot K_s A Q^B$$

Parametr β se bude pohybovat v rozmezí od 0 do 1 a kombinovat oba vztahy tak, že

$$(35) \quad \beta = 1 \quad \text{pro } t_s \geq 80 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\beta = \frac{t_s - 30}{50} \quad \text{pro } 30 < t_s < 80 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\beta = 0 \quad \text{pro } t_s \leq 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Po této změně však bude nutné poněkud změnit tvar průběhu vlečky na krátkých vzdálenostech před dosažením konečného převýšení. Je zřejmé, že část převýšení odpovídající členu $(1 - \beta) \cdot 1,5 \cdot w_0 \cdot d$ je vyvolána dynamikou vypouštěných plynů a proto působí prakticky okamžitě, zatímco část vyjádřená členem $\beta \cdot K_s \cdot A \cdot Q^B$ odpovídá pomalejšímu tepelnému vznosu a je tedy příčinou vlastního tvaru vlečky. Vzdálenost x_m , ve které vlečka dosáhne konečného převýšení, tedy musí souviset pouze s tepelným vznosem, nikoliv s celkovou hodnotou převýšení. Budeme proto předpokládat, že

$$(36) \quad x_m = \beta^{3/2} K_m \sqrt{Q}$$

Po dosazení do (34) získáme vztah (32) ve tvaru

$$(37) \quad \Delta h = (1 - \beta) \cdot \frac{1,5 w_0 d}{u_K} + \beta \frac{K_s A Q^B}{u_K} \left(\frac{x}{\beta^{3/2} K_m \sqrt{Q}} \right)^{2/3} \quad \text{pro } x < \beta^{3/2} K_m \sqrt{Q}$$

$$= (1 - \beta) \frac{1,5 w_0 d}{u_K} + \beta \frac{K_s A Q^B}{u_K} \quad \text{pro } x \geq \beta^{3/2} K_m \sqrt{Q}$$

Druhý člen v rovnici (37) pro $x < \beta^{3/2} K_m Q$ můžeme upravit vzhledem k tomu, že pro $\beta < 1$ bude v naprosté většině případů platit $Q < 18 \text{ MW}$ a tedy podle vztahu (27) bude $B = 1/3$. Druhý člen pak přejde na tvar

$$(38) \quad \frac{K_s A}{K_m^{2/3} u_k} \cdot x^{2/3}$$

avšak ten bude platit jen pro $x < \beta^{3/2} K_m Q$.

6.5. Převýšení vlečky v případě více blízkých zdrojů

Vyskytnou-li se dva nebo více zdrojů exhalací blízko sebe tak, že se jejich kouřové vlečky mohou vzájemně ovlivňovat, celkové převýšení vleček vzrůstá. K odhadu tohoto zvýšení se dají použít vztahy uvedené v práci [6].

Má-li N blízkých zdrojů převýšení vlečky Δh , pak výsledné převýšení Δh_N celkové vlečky vzniklé prolínáním jednotlivých vleček se dá vyjádřit pomocí faktoru vzrůstu E_N :

$$(39) \quad \Delta h_N = \Delta h \cdot E_N$$

kde

$$(40) \quad E_N = \left(\frac{N+S}{1+S} \right)^{1/3}$$

Parametr S má pro N zdrojů v řadě za sebou s rozestupy Δx (m) vyjádření

$$(41) \quad S = \left(\frac{(N-1)\Delta x}{N^{1/3} \Delta h} \right)^{3/2}$$

a pro shluk N zdrojů

$$(42) \quad S = \left(\frac{L_g}{N^{1/3} \Delta h} \right)^{3/2}$$

kde L_g je maximální rozměr shluku (m).

7. Rozptylové parametry σ_y a σ_z .

Pro rozptylové parametry σ_y a σ_z současná metodika používá logaritmické závislosti na vzdálenosti od zdroje, což má dvě podstatné nevýhody. Za prvé nelze parametry vypočítat pro vzdálenosti kratší než 100 m (a tím pádem se metodika nehodí pro výpočty např. v městské zástavbě) a za druhé logaritmické vztahy působí potíže při pokusech o analytické řešení některých problémů (např. stanovení maxim).

Proto nahradíme logaritmické vztahy mocninnými, které se používají i v modifikaci současné metodiky pro krátké vzdálenosti, v německé metodice a v mnoha dalších modelech:

$$(43) \quad \begin{aligned} \sigma_y &= a_y x^{b_y} \\ \sigma_z &= a_z x^{b_z} \end{aligned}$$

Koeficienty a_y , b_y , a_z , b_z závisejí na stabilitě atmosféry a budeme předpokládat, že budou rovněž funkcí výšky komína H , protože v různých výškách nad povrchem země bývá jiná rychlost rozptylu i za jinak stejných podmínek. Bude tedy platit

$$(44) \quad \begin{aligned} a_i &= a_{0i} \cdot f_i(H) \\ b_i &= b_{0i} \cdot g_i(H) \end{aligned} \quad i = y, z$$

Konkrétní vyčíslení koeficientů a stanovení funkcí f_i a g_i bude předmětem další práce, při které bude možné využít např. vztahů z německé metodiky, která je v případě parametrů σ_y a σ_z koncipována podobně, pouze s jinou klasifikací stability ovzduší.

8. Zahrnutí depozice a transformace znečišťujících látek do výpočtu

Úbytek znečišťující látky v ovzduší vlivem suché depozice, vymývání srážkami a chemickými reakcemi je možné popsat koeficientem suché depozice k_D , mokré depozice k_W a koeficientem transformace k_T . Tyto koeficienty mají rozměr s^{-1} a jejich převrácené hodnoty mají význam času, za který koncentrace ve vlečce vlivem těchto pochodů klesne na $1/e$ -tinu původní hodnoty. Výsledná koncentrace c se pak dá vyjádřit pomocí původní koncentrace c_0 takto:

$$(45) \quad c = c_0 \cdot e^{-(k_D + k_W + k_T) \frac{x}{u_k}}$$

V současné metodice nejsou tyto vlivy zahrnuté, protože současná metodika byla vytvořena pro nejznámější znečišťující látky typu SO_2 , u kterých jsou tyto vlivy zejména na krátkých vzdálenostech malé (5-procentní změna koncentrace SO_2 vlivem depozice a transformace nastává i za nejpriznivějších podmínek při $u_k = 1$ m/s ve vzdálenosti téměř 3,5 km od zdroje). S rozšířením výpočtů i na mnoho dalších znečišťujících látek, z nichž některé podléhají poměrně rychlým reakcím v ovzduší, se ukazuje nutnost tyto vlivy do metodiky zahrnout.

Proto bude nutné stanovit pro nejrůznější plynné látky koeficienty k_D , k_W a k_T , což však bude obsahem až další práce.

9. Výpočet koncentrací prachu

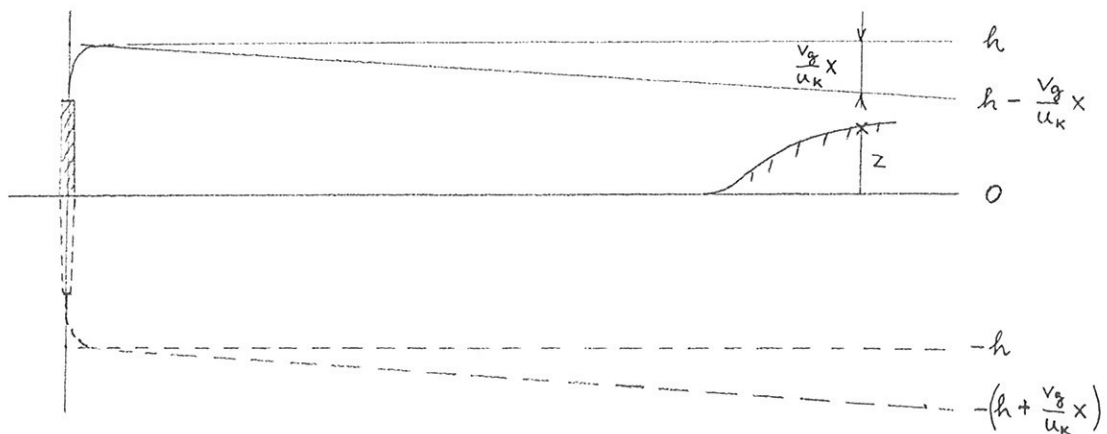
Koncentrace prachu šířící se z bodového zdroje popisuje současná metodika dvojím způsobem. Pro malé částice o průměru do $20 \mu m$ počítá s prachem stejně jako s plynnými znečišťujícími látkami, zanedbává malou pádovou rychlost částic

a počítá s odrazem koncentrací o povrch země. Pro větší částice, u kterých již pádovou rychlost zanedbat nelze, vypouští z výpočtu odrazový člen a předpokládá, že prach, který dosáhne povrchu země, se usadí. Při výpočtu koncentrací prachu s velikostí částic kolem $20 \mu\text{m}$ tak vzniká značná nespojitost, podle prvního postupu vycházejí koncentrace obvykle až 2x vyšší, než podle druhého.

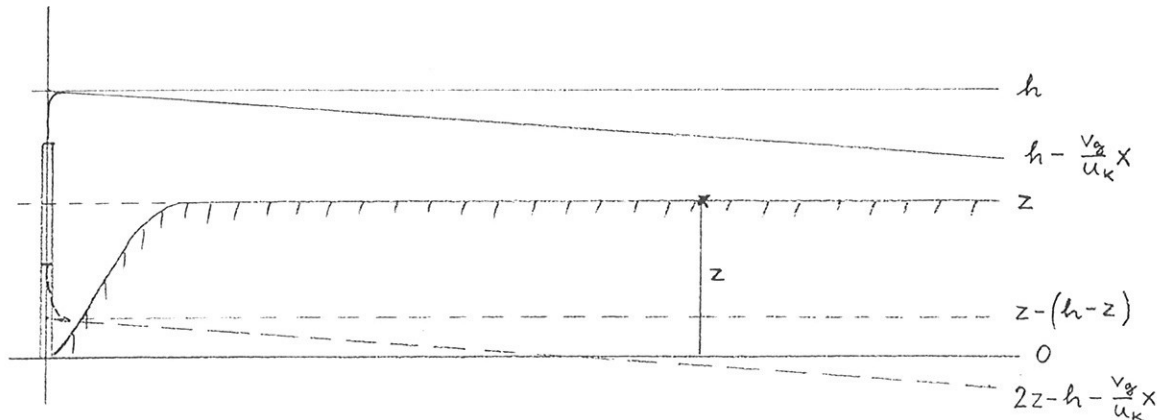
Tento rozpor spočívá ve vyjádření odrazového členu ve vztazích pro dolní a horní odhad znečištění a dá se poměrně jednoduše odstranit. Budeme i nadále předpokládat, že zatímco osa plynové kouřové vlečky nad rovinným terénem zůstává stále v efektivní výšce h , osa prašné kouřové vlečky klesá k zemi, takže její výška nad úrovní terénu v místě zdroje je

$$h - \frac{v_g}{u_k} x$$

kde v_g je pádová rychlost částic. V odrazovém členu však osa prašné vlečky nebude stoupat směrem k povrchu země, jak by vycházelo po prostém dosazení $h - \frac{v_g}{u_k} x$ namísto h do rovnic, ale rovněž klesat dál dolů (viz obr.7 a 8).



Obr.7. Osa prašné vlečky - dolní odhad



Obr.8. Osa prašné vlečky - horní odhad

Dolní odhad znečištění ovzduší prachem pak bude mít vyjádření

$$(46) C_D = \frac{10^6 M}{2\pi\sigma_y\sigma_z u_k} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left[\exp\left(-\frac{(z-(h-\frac{v_g x}{u_k}))^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(|z|+(h+\frac{v_g x}{u_k}))^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

a horní odhad

$$(47) C_H = \frac{10^6 M}{2\pi\sigma_y\sigma_z u_k} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left[\exp\left(-\frac{(z-(h-\frac{v_g x}{u_k}))^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z-(h+\frac{v_g x}{u_k}))^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

Tím se dosáhne efektu, že pro pádovou rychlost blížíící se nule (tj. pro malé prašné částice) rovnice (46) a (47) přejdou v rovnice (9) a (2) pro plynné znečišťující látky, zatímco pro velké prašné částice s velkou pádovou rychlostí prakticky vymizí odrazový člen, který v důsledku velké hodnoty $\frac{x v_g}{u_k}$ v exponentu bude zanedbatelně malý, což odpovídá

usazování velkých prašných částic na povrchu země namísto jejich "odrazu".

Efektivní výška h však přitom bude respektovat úpravy vlivem terénu podle podkapitoly 3.3, tj. zvedání podél svahů. Obdobně, ve většině případů však již pod úrovní terénu, se bude zvedat i osa prašné vlečky, která však bude od průběhu h zachovávat odstup $\frac{v_z x}{u_k}$.

Dosadíme-li vztahy (46) a (47) do rovnice (3), získáme pro zvlněný terén výsledný vztah pro koncentrace prachu:

$$(48) \quad C = \frac{10^6 M}{2\pi \sigma_y \sigma_z u_k} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z-(h-\frac{xv_z}{u_k}))^2}{2\sigma_z^2}\right) + \right. \\ \left. + (1-\alpha) \exp\left(-\frac{(|z|+h+\frac{v_z x}{u_k})^2}{2\sigma_z^2}\right) + \alpha \exp\left(-\frac{(z-(h+\frac{v_z x}{u_k}))^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

Pádovou rychlost prašných částic, která závisí na velikosti (průměru) částic d (m) a jejich hustotě ρ_c (kg/m³) určíme podle vztahu

$$(49) \quad v_g = -\frac{3\pi \nu}{2C_3 d} + \sqrt{\left(\frac{3\pi \nu}{2C_3 d}\right)^2 + \frac{C_2 \rho_c g d}{C_3 \rho}}$$

uvedeného v [7], kde

$\nu = 15 \cdot 10^{-6}$ m²/s je kinematická viskozita vzduchu

$g = 9,81$ m/s² je tíhové zrychlení

$\rho = 1,3$ kg/m³ je hustota vzduchu

$C_2 = 0,8$ je konstanta určující poměr mezi objemem částice a jejím charakteristickým rozměrem

$C_3 = 0,6$ je součinitel odporu tření

Rovněž je možné pro určení pádové rychlosti využít hodnot v tabulkách obsažených např. v [5] nebo [8].

Pro praktické výpočty bude ještě nutné stanovit třídy velikost částic a hodnotu v_g , se kterou se bude počítat v případě, že nebude známé rozložení velikosti částic v prašné vlečce u zdroje. Tyto problémy však budou řešené až v příští práci.

10. Plošné a liniové zdroje

Pro výpočet koncentrací znečišťujících látek šířících se z plošných a liniových zdrojů byly v minulosti uváděné různé metody, každá z nich však měla oproti přímé integraci nějakou podstatnou nevýhodu nebo omezení v použití. Dnešní počítačová technika je však již na takové výši, že není potřeba používat žádné přibližné metody výpočtu, ale stačí plošný či liniový zdroj rozdělit na dostatečný počet elementů plochy nebo délky a výslednou koncentraci vyjádřit jako superpozici koncentrací od všech elementů zdroje.

Přitom je však nutné poněkud upravit základní rovnice výpočtu (10) resp. (48), a to tak, že rozptylové parametry σ_y a σ_z budou nahrazené výrazy $\sigma_y + \sigma_{y0}$ a $\sigma_z + \sigma_{z0}$. Význam parametrů σ_{y0} a σ_{z0} vyplývá z případu, kdy $x = 0$ a $z = h$, tj. ze situace přímo v místě zdroje, kde můžeme zanedbat nepatrný vliv odrazového členu. Koncentrace znečišťující látky je zde

$$(50) \quad C = \frac{10^6 M}{2 \pi \sigma_{y0} \sigma_{z0} u_K}$$

což znamená, že hodnota $2 \pi \sigma_{y0} \sigma_{z0} u_K$ značí objem vzduchu, ve kterém jsou obsažené exhalace přímo ve zdroji. Z toho vyplývá, že hodnotu $\sqrt{2 \pi} \sigma_{y0}$ můžeme považovat za šířku elementu zdroje a hodnotu $\sqrt{2 \pi} \sigma_{z0}$ za vertikální rozměr objemu znečištěného vzduchu na hranici elementu. Přitom σ_{z0} se dá vyjádřit jako

$$(51) \quad \sigma_{z0} = \sigma_z(x')$$

kde x' je rozměr elementu plošného zdroje ve směru větru.

Parametr σ_{y0} určíme zpětně z rozměru l_y elementu zdroje kolmého na směr větru

$$(52) \quad \sigma_{y0} = \frac{l_y}{\sqrt{2\pi}}$$

Při rozdělování plošného (liniového) zdroje na jednotlivé elementy je nutné dodržet pravidlo o vzdálenosti jejich středů. Máme-li referenční bod v nějaké vzdálenosti x_0 od zdroje, pak v případě, že by středy elementů byly od sebe příliš daleko, vznikne v referenčním bodě vlnový průběh koncentrací v závislosti na úhlu směru větru. Maximální vzdálenost y_0 středů elementů, při které k vlnovému průběhu koncentrací nedochází, se dá odvodit z rozboru funkce $e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}}$. Platí:

$$(53) \quad y_0 \leq 2,2 (\sigma_y(x_0) + \sigma_{y0})$$

Za tohoto předpokladu by superpozice koncentrací od jednotlivých elementů zdroje neměla činit žádné problémy.

11. Výpočet extrémního znečištění ovzduší při inverzích a bezvětří

Použitá metoda Gaussovského rozptylu kouřové vlečky neumožňuje výpočet koncentrací znečišťujících látek v ovzduší za extrémně nepříznivých podmínek, při bezvětří 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. Alespoň

přibližný odhad koncentrací při těchto situacích by měla nová metodika obsahovat.

Pro výpočet těchto koncentrací můžeme použít metodu upraveného box-modelu použitou v práci [9]. Zde se předpokládá uzavřené údolí nebo kotlina, ve které jsou zdroje znečištění ovzduší, bezvětří, 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 rozptýlu. Tento fakt je v rovnici pro výpočet koncentrace popsán pomocí dalších "odrazových" členů:

$$(54) \quad C = \frac{10^6 M}{2\pi \sigma_y \sigma_z u_K} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left(e^{-\frac{(2nL-h+z)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(2nL+h+z)^2}{2\sigma_z^2}} \right)$$

Pro poměrně krátké vzdálenosti, pro které se většinou extrémní znečištění počítá, se dá nekonečný součet v rovnici (54) redukovat na součet pouze 3 členů pro $n = -1$, $n = 0$ a $n = 1$ bez nebezpečí, že by se zmenšila přesnost výpočtu. Krátkodobé koncentrace se pak budou počítat podle vztahu

$$(55) \quad C = \frac{10^6 M}{2\pi \sigma_y \sigma_z u_K} (E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6) \cdot e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}}$$

kde

$$(56) \quad E_1 = \exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

$$(57) \quad E_2 = \exp \left(- \frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2} \right)$$

$$(58) \quad E_3 = \exp \left(- \frac{(z-h-2L)^2}{2\sigma_z^2} \right)$$

$$(59) \quad E_4 = \exp \left(- \frac{(z+h-2L)^2}{2\sigma_z^2} \right)$$

$$(60) \quad E_5 = \exp \left(- \frac{(z-h+2L)^2}{2\sigma_z^2} \right)$$

$$(61) \quad E_6 = \exp \left(- \frac{(z+h+2L)^2}{2\sigma_z^2} \right)$$

Tyto vztahy platí pro nenulovou rychlost větru, ale dají se využít i pro výpočet vertikálního profilu koncentrace za bezvětří.

Při použití box-modelu předpokládáme, že po začátku trvání podmínek bezvětří 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 podle klasifikace ze současné metodiky.

Ještě 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 .

Prvním krokem výpočtu je stanovení vertikálního profilu koncentrací v kotlině pro danou výšku horní hranice směšovací vrstvy a danou dobu trvání inverze. Pro každou nadmořskou výšku v kotlině (s určitým vertikálním krokem) se spočítá fiktivní koncentrace c_f od všech zdrojů, jejichž exhalace zůstávají ve směšovací vrstvě. Rovnice

$$(62) \quad c_f = \frac{10^6 M}{2\pi \sigma_y \sigma_z u_k} (E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6)$$

popisuje rozptyl exhalací pod hranicí směšovací vrstvy s vyloučením bočního horizontálního rozptylu. Za rychlost větru u_k se dosazuje hodnota 0,5 m/s a za h hodnota $H + \Delta h_0$. Dále předpokládáme, že za bezvětří exhalace nevystupují podél svahů vzhůru, takže neplatí vzájemné ovlivňování výšek h a z .

Rozptylové parametry σ_y a σ_z popisující za běžného rozptylu exhalací šířku kouřové vlečky závisí na vzdálenosti od zdroje x podle vztahu (43). 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.

$$(63) \quad x = 1800 \cdot T \quad (\text{m})$$

kde T je doba trvání inverze v hodinách.

Tento postup zaručí, že při déletrvající inverzi se koncentrace v celé směšovací vrstvě postupně vertikálně vyrovnávají.

Fiktivní koncentrace od všech zdrojů, jejichž exhalace zůstávají ve směšovací vrstvě, se pro každou výšku sečtou. Zároveň je pro každou nadmořskou výšku určena plocha hladiny o této nadmořské výšce v kotlině a odsud objem vzduchu ve vrstvě o tloušťce odpovídající vertikálnímu kroku, ve které existuje vypočtená celková fiktivní koncentrace. Suma 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) je vlastně integrálem obsahu znečišťující látky v ovzduší:

$$(64) \quad M_f = \int_0^L c_f(z) P(z) dz$$

kde $P(z)$ je plocha hladiny ve výšce z nad dnem kotliny a $c_f(z)$ je celková fiktivní koncentrace v této výšce.

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

$$(65) \quad M_c = 3600 \cdot T \sum_k M_k$$

kde M_k 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

$$(66) \quad c(z) = c_f(z) \cdot \frac{M_c}{M_f}$$

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

Pro tento skutečný vertikální profil pak bude platit

$$(67) \quad M_c = \int_0^L c(z) P(z) dz$$

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 bezvětří 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.

K výpočtu průměrných ročních koncentrací a doby případného překročení imisních limitů s využitím uvedené metody jsou však potřeba klimatická data, která nejsou běžně k dispozici. V naprosté většině míst totiž nejsou sledované četnosti výskytu různých výšek směšovací vrstvy ani doba trvání bezvětří při inverzi. Metoda proto zřejmě do té doby, než budou tato data k dispozici, zůstane pouze odhadem extrémního znečištění za předem stanovených podmínek.

12. Rozptyl z chladících věží tepelných elektráren

Jelikož se již vyskytly úvahy o vypouštění exhalací z tepelných elektráren prostřednictvím chladících věží, bude vhodné, aby nová metodika obsahovala i tuto problematiku. Řešením rozptylu exhalací z chladících věží se zabývali Škulec a Janisková v práci [10], ve které dospěli k příja-

telným výsledkům. Jejich metodu je proto možné do nové metodiky zahrnout.

Metoda výpočtu rozptylu z chladících věží je v podstatě shodná se současnou metodikou, pouze jsou zde modifikované vztahy pro převýšení vlečky. Jsou použité vztahy podle Briggse:

$$(68) \quad \Delta h = \frac{5 \cdot F^{1/4}}{s^{3/8}} \quad \text{pro situace s bezvětřím} \\ \text{(rychlost větru } u < 1 \text{ m/s)}$$

$$(69) \quad \Delta h = 2,9 \left(\frac{F}{u s} \right)^{1/3} \quad \text{pro } u \geq 1 \text{ m/s a stabilní} \\ \text{teplotní zvrstvení}$$

$$(70) \quad \Delta h = 5,56 \frac{F^{3/5} H^{2/5}}{u} \quad \text{pro } u \geq 1 \text{ m/s a neutrální a} \\ \text{instabilní teplotní zvrstvení}$$

V těchto vztazích

$$(71) \quad F = g w_0 \left(\frac{d}{2} \right)^2 \cdot \left(\frac{T_s - T_0}{T_s} + (q_s - q_0) \cdot \left(0,61 + \frac{f L_v}{c_p T_s} \right) \right)$$

je počáteční vztlaková síla vzduchu opouštějícího chladící věž a

$$(72) \quad S = \frac{g}{T_0} (x_d - x)$$

je parametr stability atmosféry.

Význam použitých symbolů:

H - výška chladící věže (m)

d - průměr chladící věže v koruně (m)

w₀ - výstupní rychlost vzduchu z chladící věže (m/s)

T_s - počáteční teplota vzduchu v chladící věži (°K)

T₀ - teplota okolí v úrovni koruny chladící věže (°K)

q_s - počáteční směšovací poměr ve vlečce

q₀ - směšovací poměr v okolním vzduchu

L_v - latentní teplo výparu vody (J/kg)

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

u - rychlost větru (m/s)

γ_a - adiabatický teplotní gradient ($^{\circ}\text{K/m}$)

γ - aktuální teplotní gradient v atmosféře ($^{\circ}\text{K/m}$), $\gamma = - \frac{\partial T_0}{\partial z}$

f - korekční faktor

Ve vztahu (71) se na rozdíl od běžného vyjádření počáteční vztlakové síly (viz vztah (21)) počítá navíc s uvolňováním latentního tepla při kondenzaci vodní páry ve vlečce a s dodatečným vztlakem vznikajícím z rozdílu molekulových vah mezi vodní párou a vzduchem. Obě tyto skutečnosti vedou k většímu převýšení vlečky.

Bezrozměrný parametr f vyjadřuje průměrné relativní množství zkondenzované vodní páry při dané kombinaci teploty a vlhkosti okolního vzduchu. V praxi se při výpočtu průměrných hodnot za delší období dá nahradit poměrem

$$(73) \quad f_{rt} = \frac{D_{m,rt}}{D_{rt}}$$

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

a D_{rt} je celková doba trvání situací s relativní vlhkostí r a teplotě t za dané období

Pro výpočet dlouhodobějších charakteristik pomocí této metody budou tedy třeba nová klimatická data.

Další změnou oproti současné metodice je popis chladicí věže jako plošného zdroje metodou fiktivního zdroje, tj. tím, že za vzdálenost x od zdroje se dosazuje hodnota

$$(74) \quad x' = x + x_v$$

kde x_v je definováno vztahem

$$(75) \quad \sigma_y(x_v) = \frac{d}{2}$$

Při zahrnutí těchto odlišností do nově koncipované metodiky bude tedy možné provádět výpočty koncentrací znečišťujících látek i v případě jejich vypouštění z chladících věží.

13. Použití klimatických údajů a forma výsledků výpočtu

Aby bylo možné využít bohatý klimatický materiál (větrné růžice podle tříd stability atmosféry) vypracovaný k současně platné metodice, přidržíme se i v nové metodice stabilitní klasifikace Bubník - Koldovský, která rozeznává 5 tříd stability atmosféry. Větrné růžice jsou konstruovány pro 3 třídy rychlosti větru (1.7, 5 a 11 m/s), bude proto výhodné zachovat toto členění. Navíc oproti současné metodice se bude počítat v každém referenčním bodě ještě maximální krátkodobá koncentrace a rychlost (případně i směr) větru, při které k ní dochází.

Kromě krátkodobých koncentrací při různých třídách stability a rychlosti větru bude metodika dále poskytovat informace o průměrných koncentracích a době překročení zvolených limitních koncentrací za dané období. Při těchto výpočtech se využije vztah pro stáčení větru s výškou

$$(76) \quad \varphi_H = \varphi_0 + \frac{H - 10}{25} \quad (^\circ)$$

kde φ_H je azimut směru větru ve výšce komína H ($H \geq 10$ m) a φ_0 je azimut směru větru ve standardní výšce 10 m nad terénem.

Tento vztah užívá již současná metodika.

Zkušenosti z výpočtů dále ukazují, že pro většinu aplikací bude vhodné provádět výpočty s úhlovým krokem směru větru 1° .

14. Závěr

Předkládaný model je základním návrhem, jak odstranit nedostatky současné metodiky a umožnit řešení problémů, které současná metodika řešit nedovede.

Cílem celého projektu, ve kterém tato práce představuje pouze první část, je vytvoření obecně závazné metodiky výpočtu znečištění ovzduší tak, aby odpovídala současné úrovni znalostí v oboru fyziky mezní vrstvy atmosféry i potřebám praxe. V dalším období proto bude nutné dopracovat podrobnosti celé metodiky a na dostatečně rozsáhlém souboru dat provést její verifikaci.

Literatura

- [1] J.Bubník: Výpočet znečištění ovzduší pro stanovení a kontrolu technických parametrů zdrojů (MLVH, Praha 1979)
- [2] Handbook of applied meteorology. Edited by D.D.Houghton (A.Wiley - interscience publication, John Wiley and sons, 1985)
- [3] J.Bubník: Stanovení optimálních výšek komínů v městské zástavbě (MFF UK, Praha 1987)
- [4] J.Bubník: Meteorologické zabezpečení konvence o dálkovém přenosu znečištění (rukopis autora, 1979)
- [5] První všeobecný správní předpis ke Spolkovému zákonu na ochranu proti imisím - Technický návod na zachování čistoty ovzduší - TA Luft (Překlad předpisu SRN, Veselý Translating, 1993)
- [6] G.A.Briggs: Plume Rise from Multiple Sources (In: Cooling Towers and Environment - 1974, USA ERDA, Tennessee, 1976, s.161-179)
- [7] J.Maňák: Sekundární prašnost ze skládek popílku (MFF UK, Praha 1987)
- [8] J.Bubník, J.Maňák: Metodika zpracování výpočtu znečištění ovzduší (Interní zpráva ČHMÚ, č.ú. P-16-331-453-02/E01.02, Praha 1981)
- [9] J.Maňák: Rozptylová studie pro SO₂ v Děčíně a jeho blízkém okolí (EKOAIR, č.z.28/91, Praha 1991)
- [10] Š.Škulec, M.Janisková: Posúdenie alternatív vyvedenia odsírených spalín Elektrárne Chvaletice do komína alebo do chladiacich veží (SHMÚ, Jaslovské Bohunice, 1991)

Doplněk ke výzkumné zprávě "Tabulární část metodiky výpočtu znečištění ovzduší ze stacionárních zdrojů"

Předložená výzkumná zpráva obsahuje dvě svým charakterem odlišné části. Prvá z nich byla zpracována v Českém hydrometeorologickém ústavu a zabývá se rešením popisem řady zahraničních metodik vztahujících se k tématu uvedenému v nadpisu. Považují za správné, že hlavní pozornost je věnována metodice používané v nám podobných klimatických a geografických poměrech sousedního Německa, stručněji je popsáno několik modelů zkonstruovaných v USA, dále pak modely norské, švýcarské a britské. Popisy zmíněných metodik jsou zřejmě založeny na publikaci vydané pod patronací WHO v roce 1969 (viz citaci č. 1). Takto zpracovaná rešeršní studie představuje významný syntetický materiál, který může našim odborníkům metodicky sloužit jako zdroj inspirací a zároveň je nezastupitelný při srovnávání našich modelových výsledků s obecnými výsledky zahraničními. Kladně je třeba ocenit systematickost a přehledné uspořádání jednotlivých kapitol, a to včetně reprezentativní přílohy, která se vhodně doplňuje za potřebné skutečnosti. Jako formální připomínka lze uvést upozornění na jednotnou správný počet sklonů slov variabilních při práci na textovém editoru, což však v definitivním exempláři zprávy může být snadno opraveno.

Druhá část zprávy je zpracována MDr. J. Maňákem (Moravská - sloužící činnosti ovzduší) a představuje koncepční projekt nové metodiky pro využití v České republice. Z důvodu nezbytné kontinuity se vychází ze stávající již používané metodiky "M" pro znečištění ovzduší pro stanovení a kontrolu technických parametrů z "roční" výměry roku 1978. Podstatná zjednodušení se navrhuje v souvislosti s vlivy zvláštního terénu na výpočty koncentrací znečištění. Dosažené užívání tzv. dolního a horního odhadu se nahrazuje jediným odhadem, což v současné době umožňují výkonnější počítače a využívání databází obsahujících údaje o reliéfu zemského povrchu. Návrh metodiky dále počítá s řadou vnitřních korekcí pro jednotlivé speciální polohy referenčního bodu (v údolí, na odvrácené straně kopce apod.), uvažuje rovněž možnost počítat koncentrace na buřácích. Další významná část studie je věnována problému stanovení tzv. efek-

tivní výšky kouřové vlnky a přináší v tomto směru mnoho nových poznání. Zároveň však upozorňuje na velkou obtížnost obecného řešení, přičemž poskytuje určitou solidní základnu pro další práce. Pokud jde o tzv. rozptýlové parametry, navrhuje se v předložené studii nahrazení dosud užívaných logaritmických formulí mocninovými vzorci, což může přinést nezanedbatelné praktické výhody. Stručně se upozorňuje na potřebu zavedení formulí pro vyjádření suché i mokré depozice i chemických reakcí. Další částí studie se zaměřují na modifikace pro modelový popis přenosu prachu, na problematiku liniových a plošných zdrojů i na specifické situace s teplotními inverzemi nebo s bezvětřím. Poslední část je věnována rozptylu znečišťujících příměsí z chladících věží elektráren a vhodným způsobem zahrnuje do návrhu metodiky výsledky dosažené v pracích Závodského a Janiskové.

Celkově lze konstatovat, že předložený ideový projekt obsahuje ve srovnání se stávající metodikou významná zlepšení a posunul by ji na velmi solidní evropskou úroveň. Navrhované úpravy jsou vzhledem k současnému stavu výpočetní techniky i příslušných databází proveditelné a představují nutný kompromis mezi přiblížením se k reálným procesům v atmosféře a efektivností, resp. operativností metodiky.

Předložená studie představuje ucelený návrh koncepce nové metodiky a v tomto směru zřejmě splňuje zadání úkol. Zároveň jasným způsobem udává směr další práci, která bude spočívat v kvantitativním vyhodnocení řady parametrů nutných ke konkrétním výpočtům a souvisejících s procesy ovlivňujícími difúzi znečišťujících příměsí v atmosféře.

V Praze 28. 11. 1993



doc. Jan Bejnář