

3/4
EKOAIR - Služby čistotě ovzduší

RNDr. Jan Maňák

ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV

Úsek ochrany ovzduší

RNDr. Jiří Bubník

METODIKA VÝPOČTU ZNEČIŠTĚNÍ OVZDUŠÍ

ZE STACIONÁRNÍCH ZDROJŮ -

POPIS MODELU A KONTROLNÍ VÝPOČET

Závěrečná zpráva za úkoly plánované na rok 1995

Praha, listopad 1995

Obsah

Předmluva	i
Činnosti zajišťované ve vazbě na cíle řešení a sledované úkoly	ii
I. Zadání	ii
II. Přehled plnění	ii
III. Závěr	iii
1. Úvod	1
2. Potřebné vstupní údaje	2
2.1. Vstupní údaje o zdrojích	2
2.1.1. Bodové zdroje	2
2.1.2. Plošné zdroje	4
2.1.3. Liniové zdroje	5
2.1.4. Chladicí věže tepelných elektráren	8
2.1.5. Podrobný výpočet doby trvání znečištění pro 1 zdroj	9
2.2. Klimatické vstupní údaje	10
2.2.1. Klimatické údaje pro běžné výpočty znečištění ovzduší	10
2.2.2. Klimatické údaje pro výpočet znečištění ovzduší od chladících věží	12
2.2.3. Údaje pro výpočet koncentrací za inverzí a bezvětří	13
2.3. Údaje o terénu a budovách	14
2.3.1. Vstupní údaje o referenčních bodech	14
2.3.2. Údaje o topografii terénu	14
2.3.3. Údaje pro výpočet znečištění v zástavbě	14
2.3.4. Údaje pro výpočet znečištění při bezvětří a inverzi	15
2.4. Údaje o imisních limitech a přípustných koncentracích znečišťujících látek	15
3. Výpočet znečištění ovzduší pro komínové exhalace	17
3.1. Základní rovnice pro zvlněný terén	17
3.2. Rychlost větru	19
3.3. Stanovení efektivní výšky kouřové vlečky	21
3.3.1. Základní vztahy	21
3.3.2. Korekce převýšení na stabilitu atmosféry	22
3.3.3. Převýšení v malých vzdálenostech	23
3.3.4. Převýšení vlečky při chladných exhalacích	24
3.3.5. Převýšení vlečky v případě více blízkých zdrojů	25
3.4. Korekce efektivní výšky na vliv terénu	26
3.5. Rozptylové parametry σ_y , σ_z	27
3.6. Zahrnutí depozice a transformace znečišťujících látek do výpočtu	28

3.7. Zeslabení vlivu nízkých zdrojů na znečištění ovzduší na horách	30
3.8. Výpočet koncentrací prachu	32
4. Výpočet hlavních charakteristik znečištění ovzduší	35
4.1. Výpočet maximálních krátkodobých koncentrací	35
4.2. Výpočet průměrných ročních koncentrací	37
4.3. Výpočet doby překročení zvolených koncentrací	48
4.4. Diskuse výsledků výpočtu koncentrací	39
5. Některé další aplikace výpočtu znečištění ovzduší	40
5.1. Stanovení potřebné výšky komína	40
5.2. Výpočet podílů jednotlivých zdrojů na znečištění ovzduší	42
5.3. Výpočet denních průměrných koncentrací	43
5.4. Koncentrace znečišťujících látek ve směsi	43
5.5. Výpočet doby překročení zvolených koncentrací pro zdroj se sezónně proměnnou emisí	45
5.6. Výpočet depozice plyných znečišťujících látek a spadu prachu	46
6. Výpočet koncentrací z plošných zdrojů	48
7. Výpočet koncentrací z liniových zdrojů	50
8. Výpočet extrémního znečištění ovzduší při inverzích a bezvětří	53
9. Rozptyl exhalací z chladících věží tepelných elektráren	57
10. Kontrolní výpočet	62
10.1. Vstupní údaje	62
10.1.1. Údaje o zdrojích znečištění	62
10.1.2. Klimatické vstupní údaje	63
10.1.3. Referenční body pro výpočet znečištění	75
10.1.4. Imisní limity	75
10.2. Vypočtené výsledky a srovnání se skutečností	77
10.2.1. Výsledky výpočtu	77
10.2.2. Naměřené znečištění ovzduší SO_2	85
10.2.3. Srovnání vypočtených a naměřených hodnot	89
11. Interpretace výsledků	91
12. Závěr	92
Literatura	93

1. Úvod

Předkládaná práce je závěrečnou částí tvorby nové metodiky výpočtu znečištění ovzduší. Navazuje na předcházející zprávy "Základní část metodiky výpočtu znečištění ovzduší ze stacionárních zdrojů" [1] a "Metodika výpočtu znečištění ovzduší ze stacionárních zdrojů" [2], ve kterých byl teoreticky odvozen a odůvodněn výpočetní model a stanovené potřebné parametrizace. Proto tato práce obsahuje pouze stručný popis modelu a potřebných vstupních údajů s tím, že podrobnosti lze nalézt v předcházejících zprávách. Podrobněji jsou posány pouze ty části metodiky, ve kterých došlo oproti předcházejícím zprávám ke změnám.

V další části zprávy je uveden kontrolní výpočet, který sloužil k verifikaci metodiky a ke zpřesnění použitých postupů. Kontrolní výpočet se týkal oblasti Sokolovsko, byl proveden pro oxid siřičitý a byly do něj zahrnuté velké zdroje znečištění ovzduší z Čech, střední a malé zdroje ze Sokolovska a rovněž silniční doprava ze Sokolovska a některé zdroje ze SRN. Obsahem této práce je zároveň srovnání výsledků výpočtu s naměřenými hodnotami znečištění ovzduší.

2. Potřebné vstupní údaje

Vstupní údaje potřebné k výpočtu znečištění ovzduší lze rozdělit na několik kategorií. Jde o údaje o zdrojích znečištění ovzduší, údaje klimatické, údaje o topografii terénu a referenčních bodech, ve kterých se bude výpočet provádět, informace o výšce a rozmístění budov v zájmovém území a údaje o nejvyšší přípustných koncentracích znečišťujících látek ve volném ovzduší (imisních limitech). Potřebné vstupní údaje se dále liší podle typu zdroje (bodové, plošné, chladicí věže atd.) a podmínek v atmosféře modelovaných výpočtem (výpočet za běžných podmínek nebo za bezvětří).

2.1. Vstupní údaje o zdrojích

2.1.1. Bodové zdroje

Za bodové zdroje se považují zejména komíny a výduchy, jejichž rozměr je zanedbatelný oproti vzdálenostem, ve kterých se počítá znečištění ovzduší. U bodových zdrojů je nutné znát tyto údaje:

1. Poloha, tj. souřadnice x_z , y_z (m) v nějaké zvolené souřadné síti
2. Nadmořská výška z_z (m) terénu v místě zdroje
3. Výška H (m) koruny komína (konce výduchu) nad terénem. Tato veličina však může být teprve požadovaným výsledkem výpočtu
4. U spalovacích procesů
 - a) Množství spáleného paliva S_h (kg/h, m^3/h) za hodinu při jmenovitém výkonu spalovacího zařízení
 - b) Roční množství spáleného paliva S_r (kg/r, m^3/r)
5. U technologií: roční provozní doba P_r (hod./rok)

Následující vstupní údaje 6), 7) a 8) se v případě spalovacích procesů udávají při jmenovitém výkonu spalovacího zařízení.

6. Objem spalin (u spalovacích procesů) nebo vzdušiny (u technologií) V_s odchází komínem nebo výduchem. V_s se udává v Nm^3/s , tj. přepočtený na normální podmínky (teplotu $0^\circ C$ a tlak $101325 Pa$).
7. Množství znečišťující látky M (g/s) odchází komínem (výduchem). M se stanoví:

a) Pokud je známa koncentrace K_E (mg/Nm³) znečišťující látky ve spalínách, pak jako součin

$$(2.1) \quad M = 10^{-3} \cdot K_E \cdot V_s$$

Koncentrace znečišťujících látek ve spalínách (vzdušině) se často udává přepočtená na referenční spaliny, tj. suché a s referenčním obsahem kyslíku O_r (%). Potom je nutné znát navíc:

W (%) - obsah vodní páry ve skutečných spalínách (vzdušině)

O_s (%) - obsah kyslíku ve skutečných spalínách

Hodnota K_E se pak vypočte z koncentrace K_{Er} v referenčních spalínách podle vztahu

$$(2.2) \quad K_E = K_{Er} \cdot \frac{\left(1 - \frac{W}{100}\right) \cdot 21 - O_s}{21 - O_r}$$

pokud je O_s udán vzhledem k vlhkým skutečným spalínám, nebo

$$(2.3) \quad K_E = K_{Er} \left(1 - \frac{W}{100}\right) \cdot \frac{21 - O_s}{21 - O_r},$$

pokud je O_s udán vzhledem k suchým skutečným spalínám.

b) V ostatních případech z hodinového množství spáleného paliva S_h (kg/h, m³/h) při jmenovitém výkonu spalovacího zařízení a z emisního faktoru f_E (g/kg, g/m³) uvedeného v Metodickém pokynu [2]:

$$(2.4) \quad M = \frac{S_h \cdot f_E}{3600} \cdot \left(1 - \frac{\eta}{100}\right)$$

kde η je účinnost opatření omezujících únik znečišťující látky v % (tj. odsiřovacího zařízení, odlučovačů popílku, filtrů aj.).

V případě emisí SO₂ a prachu ze spalovacích procesů závisí emisní faktory na jakostních znacích paliva, konkrétně na procentuelním obsahu popelovin A_p nebo síry S_p v původním vzorku pevného paliva a na obsahu síry v kapalném palivu. U pevných paliv se hodnoty A_p , S_p vypočtou z obsahu popelovin A_s a síry S_s v sušině a z obsahu vody W_p (%) podle vztahů

$$(2.5) \quad A_p = \left(1 - \frac{W_p}{100}\right) \cdot A_s$$

$$(2.6) \quad S_p = \left(1 - \frac{W_p}{100}\right) \cdot S_s$$

Pokud se emisní faktor podle [2] vztahuje k jiným jednotkám než k množství spáleného paliva, pak

$$(2.7) \quad M = A \cdot P \cdot f_E \cdot \left(1 - \frac{\eta}{100}\right)$$

kde P je počet jednotek, na které je emisní faktor vztažený

A je převodní rozměrový koeficient určený tak, aby M vycházelo v g/s.

Pokud je potřeba počítat denní průměr koncentrací c_d , je třeba znát rovněž počet hodin za den P_d , kdy je zdroj v provozu.

- 8) Teplotu t_s (°C) spalin nebo vzdušiny v koruně komína (výduchu).
- 9) V případě, že $t_s < 80^\circ\text{C}$, pak navíc vnitřní průměr komína (výduchu) d (m).
- 10) V případě výpočtu znečištění ovzduší prachem je potřeba znát kromě celkové emise prachu (popílku) M ještě hustotu ρ_c (kg/m³) prašných částic a procentuelní zastoupení α_p jednotlivých prašných frakcí (v závislosti na průměru prašných částic d_p , tj. na křivce zrnitosti prachových částic odcházejících z komína (výduchu)). Pokud rozdělení velikosti prašných částic není známo, předpokládá se, že se bude řídit následující tabulkou:

Četnosti zastoupení prašných frakcí podle průměru částic (%)

Interval velikosti prašných částic (μm)	0 - 15	15 - 30	30 - 40	nad 40
Střední velikost částic (μm)	7	22	35	50
spalování tuhých paliv bez odlučovačů	35	35	20	10
spalování kapalných paliv bez odlučovačů	65	25	8	2
mechanické odlučovače	83	15	2	0
elektrostatické odlučovače	95	5	0	0
tkaninové filtry, mokré pračky	99	1	0	0

U výduchů z odprášení technologických procesů je nutné rozdělení částic znát, pokud vypouštěný vzduch není čištěný.

2.1.2. Plošné zdroje

Výpočet znečištění ovzduší z plošných zdrojů se provádí tak, že se plošný zdroj rozdělí na dostatečný počet čtvercových elementů plochy a výsledné znečištění se vypočítá jako součet příspěvků od všech elementů. Pro každý element je proto třeba znát následující údaje:

- 1) Poloha jeho středu, tj. souřadnice x_z , y_z (m) středu ve zvolené souřadné síti.
- 2) Nadmořská výška z_z (m).

- 3) Rozměr elementu, tj. délka strany čtverce y_0 (m). Pokud jsou elementy stejně veliké, znamená y_0 zároveň vzdálenost středů sousedních elementů.
- 4) Emise M_E (g/s) znečišťující látky z elementu. Pokud je zadána plošná intenzita emise M_p (g/(m²s)) pro dané místo, vypočítá se M_E :

$$(2.8) \quad M_E = M_p \cdot y_0^2$$

- 5) Pokud se emitující plocha nenachází na povrchu země, je nutné znát výšku h_p (m) nad zemí, ve které emitující plocha je. Pokud se za plošný zdroj považuje část obce se zástavbou s lokálními topeništi, odpovídá h_p průměrné efektivní výšce, do které se exhalace z lokálních topenišť dostanou a stanoví se jako střední výška budov v plošném elementu zvýšená o 10 m.

2.1.3. Liniové zdroje

Za liniové zdroje se považují téměř výhradně komunikace s automobilovým provozem. Silnice, od které chceme vypočítat znečištění ovzduší, se rozdělí na dostatečný počet délkových elementů a výsledné znečištění se vypočítá jako součet příspěvků od všech elementů. Pro každý element je nutné znát tyto údaje:

- 1) Poloha jeho středu, tj. souřadnice x_z , y_z (m) středu ve zvolené souřadné síti.
- 2) Nadmořská výška z_z (m).
- 3) Délka elementu y_0 (m). Pokud jsou elementy stejně dlouhé, znamená y_0 zároveň vzdálenost středů sousedních elementů.
- 4) Šířka silnice x_0 (m).
- 5) Emise M_E (g/s) znečišťující látky z elementu. Tuto emisi vypočteme z délkové intenzity emise M_L (g/(ms)) pro dané místo:

$$(2.9) \quad M_E = M_L \cdot y_0$$

Délková intenzita emisí znečišťujících látek z automobilového provozu se určí z intenzity provozu na základě emisních faktorů pro různé typy vozidel. Pro účely výpočtu emisní intenzity rozeznáváme 4 typy motorových vozidel:

1. motocykly
2. osobní automobily

3. dodávkové a lehké nákladní (do 3,5 t) automobily
4. těžké nákladní automobily a autobusy

Emisní faktory udávají, jaké množství (v průměru) znečišťující látky se dostane do ovzduší z 1 průměrného vozidla na dráze 1 km. Protože v současné době probíhá významná obměna motorových vozidel za nová vozidla vybavená účinnými katalyzátory a tento trend bude v následujícím desetiletí pokračovat, budou se postupně zmenšovat i hodnoty emisních faktorů. Vzhledem k postupné modernizaci dieselových motorů budou změny emisních faktorů platit i pro těžké nákladní automobily a autobusy. Pro nejvýznamnější znečišťující látky z provozu motorových vozidel NO_x , CO, C_xH_y , prach a aldehydy jsou emisní faktory uvedené v následující tabulce:

Emisní faktory pro motorová vozidla v g/(km.vozidlo)

Rok	NO_x	CO	C_xH_y	prach	aldehydy
Motocykly (malé i velké, průměr)					
1993	0,030	12,0	6,00	?	?
1995	0,028	11,0	5,50	?	?
2000	0,021	8,5	4,25	?	?
2005	0,015	6,0	3,00	?	?
2010	0,015	6,0	3,00	?	?
Osobní auta - městský provoz					
1993	1,87	25,17	3,09	0,029	0,080
1995	1,72	22,94	2,83	0,027	0,073
2000	1,17	13,27	1,70	0,020	0,050
2005	0,59	5,26	0,75	0,013	0,022
2010	0,56	5,02	0,71	0,013	0,008
Osobní auta - mimoměstský provoz					
1993	3,09	9,78	0,97	0,043	0,080
1995	2,82	8,91	0,89	0,041	0,073
2000	1,92	5,16	0,53	0,030	0,050
2005	0,96	2,04	0,23	0,020	0,022
2010	0,92	1,95	0,22	0,019	0,008

Emisní faktory pro motorová vozidla v g/(km.vozidlo) - pokračování

Rok	NO _x	CO	C _x H _y	prach	aldehydy
Dodávkové a lehké nákladní automobily - městský provoz					
1993	2,76	17,04	2,16	0,120	?
1995	2,76	17,04	2,16	0,120	?
2000	1,32	8,17	1,04	0,058	?
2005	1,01	6,25	0,79	0,044	?
2010	0,73	4,47	0,57	0,032	?
Dodávkové a lehké nákladní automobily - mimoměstský provoz					
1993	3,96	8,40	0,72	0,240	?
1995	3,96	8,40	0,72	0,240	?
2000	1,90	4,03	0,35	0,115	?
2005	1,45	3,08	0,26	0,088	?
2010	1,04	2,21	0,19	0,063	?
Těžké nákladní automobily a autobusy					
1993	13,11	12,14	7,21	3,93	?
1995	11,99	11,07	6,58	3,59	?
2000	9,08	8,29	4,93	2,68	?
2005	6,88	6,21	3,69	2,01	?
2010	6,57	5,93	3,53	1,92	?

Hodnoty emisních faktorů pro NO_x, CO, C_xH_y a prach v tabulce jsou odvozené z údajů ve studii [3]: ing. Ladislav Kröbl: Stav a očekávaný vývoj v produkci emisí škodlivin z výfukových plynů motorových vozidel (Ústav pro výzkum motorových vozidel, Praha, 1995). Představují průměrné hodnoty za běžných provozních podmínek na běžných silnicích. Ve speciálních případech (jízda na plný výkon, jízda v terénu, jízda z kopce na volnoběh apod.) se mohou emisní faktory od průměru velmi silně odlišovat.

Do hodnoty emisních faktorů jsou započítané korekce na relativní podíl provozovaných automobilů vyrobených v různých letech a korekce na zhoršování technického stavu automobilů s jeho stářím.

Emisní faktory pro aldehydy byly vypočtené na základě výsledků měření obsahu aldehydů ve výfukových plynech osobních benzínových vozidel provedeného ve VŠCHT v Praze v první polovině roku 1995. Pro ostatní motorová vozidla nejsou prozatím emisní faktory pro aldehydy k dispozici. Stejně tak nejsou zatím dostupné emisní faktory pro tuhé emise (prach) z provozu motocyklů.

Intenzita provozu jednotlivých skupin motorových vozidel na daném úseku komunikace se většinou uvádí v počtu vozidel za den (24 hod.). Označíme-li počet projíždějících vozidel z j-té skupiny za den N_j a emisní faktor pro j-tou skupinu vozidel E_{Fj} , pak pro délkovou intenzitu emise dané znečišťující látky bude platit

$$(2.10) \quad \overline{M}_L = \frac{1}{86,4 \cdot 10^6} \cdot \sum_j N_j E_{Fj} \quad (\text{g}/(\text{m} \cdot \text{s}))$$

Tato hodnota však znamená průměrnou denní intenzitu emise. Pro výpočet maximálního znečištění se předpokládá, že v dopravní špičce jsou emise 2,4-krát vyšší než v průměru. Bude tedy platit

$$(2.11) \quad M_L = 2,4 \cdot \overline{M}_L$$

2.1.4. Chladicí věže tepelných elektráren

Pokud se používá u některé tepelné elektrárny vypouštění spalin pomocí chladících věží, pak jsou nutné následující vstupní údaje:

- 1) Počet chladících věží N .
- 2) Jejich poloha, tj. souřadnice x_z , y_z (m) ve zvolené souřadné síti.
- 3) Nadmořská výška terénu z_z (m) v místě chladících věží.
- 4) Výška chladících věží H (m).
- 5) Doby v roce, po které jsou v činnosti:

1 chladicí věž	P_{r1} (hod/rok)
2 chladicí věže	P_{r2} (hod/rok)
.....
N chladících věží . .	P_{rN} (hod/rok)
- 6) Objem spalin V_s (m^3/s) vypouštěných do každé chladicí věže. V_s se udává při teplotě t_s , tedy nepřepočtený na normální podmínky.
- 7) Teplota t_s ($^{\circ}\text{C}$) spalin vypouštěných do chladicí věže.

- 8) Možství znečišťující látky M (g/s) odcházející každou chladicí věží. Pokud hodnoty M neuvede zadavatel, určí se stejným způsobem jako v případě komínů v kapitole 2.1.1.
- 9) Průměr chladicí věže D_v (m) v koruně.
- 10) Při výpočtu znečištění ovzduší prachem křivku zrnitosti prašných částic (stejně jako v kapitole 2.1.1.), pokud se ve spalinách vyskytují částice s velikostí nad $15\ \mu\text{m}$.
- 11) Závislost teploty t_{ch}' ($^{\circ}\text{C}$) vlhkého vzduchu opouštějícího chladicí věž (bez zavedení spalin do věže) na vnější teplotě t_e a relativní vlhkosti r .
- 12) Závislost objemu V_{ch}' (m^3/s) vlhkého vzduchu opouštějícího chladicí věž (bez zavedení spalin do věže) na vnější teplotě t_e a relativní vlhkosti r .

Pokud závislosti 11) a 12) nejsou k dispozici, pak postačí 4 hodnoty t_{ch}' a V_{ch}' :

1. při nízké t_e a nízké r
2. při nízké t_e a vysoké r
3. při vysoké t_e a nízké r
4. při vysoké t_e a vysoké r .

2.1.5. Podrobný výpočet doby trvání znečištění pro 1 zdroj

V případě podrobného výpočtu doby trvání znečištění ovzduší pro 1 zdroj znečištění (komín) jsou třeba stejné vstupní údaje jako v kapitole 2.1.1., avšak údaje v bodech 4), 6), 7) a 8) je nutné znát při všech provozních režimech zdroje. Jednotlivé provozní režimy se určí z časové křivky výkonu (vytížení) dané provozní jednotky během roku.

2.2 Klimatické vstupní údaje

Klimatické údaje potřebné pro výpočty znečištění ovzduší se obvykle týkají období 1 roku. Pozornost je třeba věnovat tomu, zda jsou údaje z té které meteorologické nebo klimatické stanice reprezentativní pro dané místo výpočtu. Posouzení této reprezentativnosti je však záležitost značně komplikovaná, závisí nejen na topografii terénu a vzdálenosti stanice od místa výpočtu, ale i na typu klimatických údajů a spadá spíše do oboru "odborných odhadů", takže nemůže být součástí metodiky.

2.2.1. Klimatické údaje pro běžné výpočty znečištění ovzduší

Běžnými výpočty znečištění ovzduší rozumíme výpočty od zdrojů, jejichž charakteristiky nejsou přímo ovlivňované meteorologickými podmínkami (např. tedy od bodových, plošných a liniových zdrojů, nikoliv však od chladících věží).

Rychlost rozptylu znečišťujících látek v atmosféře závisí zejména na dvou veličinách: rychlosti větru a intenzitě termické turbulence. Protože intenzita termické turbulence je přímo závislá na teplotní stabilitě atmosféry, je nejdůležitějším klimatickým vstupním údajem větrná růžice rozlišená podle rychlosti větru a teplotní stability atmosféry.

Rychlost větru se v metodice popisuje pomocí 3 tříd rychlosti stejných jako v dosavadní metodice [5]:

Třída rychlosti větru	Rozmezí rychlostí (m/s)	Třídní rychlost (m/s)
1. slabý vítr	0 - 2,5	1,7
2. střední vítr	2,5 - 7,5	5
3. silný vítr	nad 7,5	11

Rychlostí větru se přitom rozumí rychlost zjišťovaná ve standardní meteorologické výšce 10 m nad zemí.

Mírou termické stability atmosféry je vertikální teplotní gradient popisující její teplotním zvrstvení. Tato stabilita se v metodice popisuje pomocí stabilitní klasifikace

Bubník-Koldovský odvozené v ČHMÚ (viz [4]), která se používá i v dosavadní metodice. Stabilitní klasifikace obsahuje 5 tříd stability ovzduší:

Třída stability	Vertikální teplotní gradient ($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)	Popis
I. superstabilní	$\gamma < -1,6$	Silné inverze, velmi špatné podmínky rozptylu
II. stabilní	$-1,6 \leq \gamma < -0,7$	Běžné inverze, špatné podmínky rozptylu
III. izotermní	$-0,7 \leq \gamma < 0,6$	Slabé inverze, izotermie nebo malý kladný teplotní gradient. Často se vyskytující mírně zhoršené rozptylové podmínky
IV. normální	$0,6 \leq \gamma \leq 0,8$	Indiferentní teplotní zvrstvení, běžný případ dobrých rozptylových podmínek
V. konvektivní	$\gamma > 0,8$	Labilní teplotní zvrstvení, rychlý rozptyl znečišťujících látek

Vertikální teplotní gradient je definován:

$$(2.12) \quad \gamma = -\frac{\partial T}{\partial z}$$

kde $T(z)$ je závislost teploty v atmosféře na výšce.

Ne všechny třídy stability atmosféry se vyskytují za všech rychlostí větru. Následující tabulka obsahuje rozmezí rychlostí větru a výskyt jednotlivých tříd rychlosti větru při jednotlivých třídách stability ovzduší:

Třída stability	Rozmezí vyskytujících se rychlostí větru (m/s)	Výskyt tříd rychlosti větru
I	0 - 2	1
II	0 - 5	1, 2
III	rychlost není omezena	1, 2, 3
IV	rychlost není omezena	1, 2, 3
V	0 - 5	1, 2

V praxi tak dochází k výskytu 11 kombinací tříd stability a tříd rychlosti větru. Větrná růžice, která je vstupem pro výpočet znečištění ovzduší, tedy obsahuje relativní četnosti směru větru z 8 základních směrů pro těchto 11 různých rozptylových podmínek a

kromě toho četnost bezvětrí pro každou třídu stability atmosféry. Četnosti se udávají v % s přesností na 2 desetinná místa.

Další klimatickou charakteristikou používanou pro výpočet znečištění ovzduší je četnost výskytu horní hranice inverze v různých nadmořských výškách, podle které se počítá zeslabení vlivu nízkých zdrojů na referenční body na horách. Protože však v současné době neexistují na více místech měření tohoto typu, je nezbytné použít pro celé území ČR výsledky takových měření ze stanice Praha-Libuš. Hodnoty výskytu horní hranice inverze potom nebudou vstupním údajem, ale vnitřními údaji metodiky.

2.2.2. Klimatické údaje pro výpočet znečištění ovzduší od chladících věží

Pro tento výpočet je nutné mít k dispozici stejnou větrnou růžici rozdělenou podle tříd stability atmosféry a rychlosti větru jako u běžných výpočtů znečištění ovzduší v kapitole 2.2.1. Protože však charakteristiky zdroje (objem a teplota vzduchu odcházejícího z chladící věže) závisí na vnějších podmínkách (teplotě a relativní vlhkosti okolního vzduchu), je nutné znát navíc tyto údaje:

- 1) Matice hodnot g_{rt} pro každou třídu stability ovzduší

Hodnoty g_{rt} představují relativní četnosti výskytu situace s teplotou v dané třídě teploty a s relativní vlhkostí v dané třídě relativní vlhkosti a to pro danou třídu stability ovzduší. Třídy teploty a relativní vlhkosti zvolíme např. takto:

Teplota vzduchu t_e (°C)		Relativní vlhkost vzduchu r (%)							
interval	třídní teplota	interval tř. vlhkost	< 50 40	50 - 70 60	70 - 80 75	80 - 85 83	85 - 90 88	90 - 95 93	> 95 98
< -10	-12		g_{rt}						
-10 - -5	-7								
-5 - 0	-2								
0 - 5	2 3								
5 - 10	7 8								
10 - 15	12 13								
15 - 20	17 18								
20 - 25	22 23								
25 - 30	27 28								
> 30	32 33								

Pro hodnoty g_{rt} v tabulce (matici) bude pro každou třídu stability platit:

$$(2.13) \quad \sum_r \sum_t g_{rt} = 1$$

Vzhledem k tomu, že stabilitní klasifikace rozeznává 5 tříd stability ovzduší, je třeba mít k dispozici 5 takových matic hodnot g_{rt} . Hodnoty g_{rt} se získají statistickým zpracováním pozorování z meteorologické stanice, která je pro sledované místo reprezentativní.

2) Matice hodnot f_{rt} .

Hodnoty f_{rt} vyjadřují průměrné relativní množství zkondenzované vodní páry ve vzduchu při dané kombinaci teploty a vlhkosti vzduchu. V praxi se při výpočtu průměrných hodnot dají nahradit poměrem

$$(2.14) \quad f_{rt} = \frac{D_{m,rt}}{D_{rt}}$$

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

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

Pro hodnoty f_{rt} se volí stejné třídy teploty t_e a relativní vlhkosti r jako pro hodnoty g_{rt} .

Vyčíslení matice f_{rt} se provede stejně jako u g_{rt} statistickým zpracováním meteorologických pozorování.

2.2.3. Údaje pro výpočet koncentrací za inverzí a bezvětrí

Pro výpočet extrémního znečištění za inverzí a bezvětrí je třeba znát výšku L (m) horní hranice inverze nad dnem údolí, pro které se výpočet provádí, a dobu T (hod.) nepřetržitého trvání podmínek inverze a současného bezvětrí.

2.3. Údaje o terénu a budovách

2.3.1. Vstupní údaje o referenčních bodech

Pro každý referenční bod, pro který se počítá znečištění ovzduší, je nutné znát tyto údaje:

- 1) Poloha referenčního bodu, tj. souřadnice x_r , y_r (m) ve zvolené souřadné síti.
- 2) Nadmořská výška terénu z_r (m) v místě referenčního bodu.
- 3) Pokud je referenční bod umístěn jinde než v úrovni terénu, (např. na budově), pak jeho výšku l nad terénem (výšku budovy).

2.3.2. Údaje o topografii terénu

Hodnoty vypočtených koncentrací v referenčním bodě závisí mimo jiné na tvaru terénu mezi zdrojem a referenčním bodem. V případě, že terén mezi zdrojem a referenčním bodem není rovný, je třeba o jeho tvaru mít informace.

V praxi se výpočty provádějí obvykle v pravidelné nebo nepravidelné síti referenčních bodů. Z údajů o jejich poloze a nadmořských výškách terénu v jejich místě počítá speciální program tvar terénu ve sledované oblasti. Přesnost výpočtu profilu terénu mezi zdrojem a referenčním bodem tedy závisí na dostatečné hustotě referenčních bodů v jejich síti. Hustotu sítě referenčních bodů je proto nutné volit takovou, aby postihla všechny podstatné terénní útvary v daném území.

Mezi zdrojem a nejbližším referenčním bodem se předpokládá terén bez jakýchkoliv terénních útvarů. Naopak, pokud chceme podrobněji popsat terén mezi zdrojem a nějakým referenčním bodem, je nutné zvolit mezi nimi několik dalších referenčních bodů.

2.3.3. Údaje pro výpočet znečištění v zástavbě

Při výpočtu znečištění ovzduší v terénu zastavěném budovami se referenční body umísťují na budovách, tj. na horních hranách jejich fasád. Je vhodné umístit některé referenční body na nejvyšší budovy v okolí zdroje (zdrojů).

U podrobných výpočtů v malých vzdálenostech a při stanovování potřebných výšek komínů (výdechů) je nutné kromě výšek budov ležících v okolí zdroje znát rovněž jejich rozmístění a půdorysné rozměry. Tyto údaje lze odečíst z podrobných map.

2.3.4. Údaje pro výpočet znečištění při bezvětří a inverzi

Při výpočtu znečištění ovzduší při bezvětří a inverzi se předpokládá, že zdroje exhalují do objemu vzduchu uzavřeného z boků svahy údolí a sezhora horní hranicí inverze. K výpočtu objemu takto uzavřeného vzduchu je proto nutné z map odečíst plochy $P(z)$ údolí v různých výškách z nad dnem údolí.

2.4. Údaje o imisních limitech a přípustných koncentracích znečišťujících látek

Vypočtené koncentrace znečišťujících látek v referenčních bodech je nutné srovnat s jejich limitními hodnotami, aby bylo zřejmé, zda znečištění ovzduší v daných místech nepřekračuje přípustné hranice. Tyto limitní hodnoty jsou určeny buď pomocí imisních limitů nebo pomocí přípustných koncentrací.

Imisní limity jsou obsaženy v Opatření FVŽP k zákonu č.309/91 (viz [6]) a to v Příloze 4. Tato příloha obsahuje koncentrace polévatého prachu, SO_2 , NO_x , CO , O_2 a Pb a Cd v polévatém prachu, které nesmí být ve volném ovzduší překročené nebo mohou být překročené jen po omezenou dobu v roce.

Pro ostatní znečišťující látky v ovzduší vyhlášují přípustné koncentrace, které nemají být ve volném ovzduší překročené, orgány Hygienické služby, většinou podle doporučení Referenční laboratoře Státního zdravotního ústavu v Praze.

Limitní hodnoty koncentrací znečišťujících látek se týkají zpravidla těchto časových období:

1) 30 minut

Limitní půlhodinové průměry koncentrací se obvykle označují k_{\max} (u imisních limitů IH_k), udávají se v $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a znamenají nejvyšší přípustnou krátkodobou koncentraci. Tzv. krátkodobé koncentrace, které jsou základním výstupem výpočtů v popisované

metodice, se týkají právě půlhodinových průměrů a jsou proto přímo srovnatelné s těmito limitními hodnotami.

2) 24 hodin

Limitní denní průměry koncentrací se označují k_d (u imisních limitů IH_d). Koncentrace srovnatelné s těmito limitními hodnotami se běžně v metodice nepočítají. Přesto metodika umožňuje jako jednu ze speciálních aplikací tyto denní průměry koncentrací vyčíslit.

3) 1 rok

Limitní hodnota pro roční průměrnou koncentraci se označuje k_r (u imisních limitů IH_r) a rovněž se udává v $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Vypočtené roční průměry koncentrací má metodika jako svůj standardní výstup, takže je možné přímé srovnání s těmito stanovenými limitními hodnotami.

Shrneme-li předchozí odstavce, je zřejmé, že pro srovnání vypočtených hodnot je pro každou znečišťující látku potřeba znát k_{\max} a k_r , pro speciální případ výpočtu denních průměrů koncentrací i k_d .

3. Výpočet znečištění ovzduší pro komínové exhalace

3.1. Základní rovnice pro zvlněný terén

Základní rovnice metodiky umožňující výpočet koncentrací znečišťující látky šířící se z bodového zdroje (komína, výduchu) ve zvlněném terénu jsou založené na předpokladu Gaussova rozložení koncentrací na průřezu kouřové vlečky. Jejich podrobné odvození je obsahem předcházejících prací.

Vztah pro výpočet krátkodobé koncentrace plynné znečišťující látky šířící se z bodového zdroje má tvar:

$$(3.1) \quad c = \frac{10^6 \cdot M}{2\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u_h + V_s} \cdot \exp\left(-\frac{y_L^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z' - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + (1 - \vartheta) \cdot \exp\left(-\frac{(z'' + h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \vartheta \cdot \exp\left(-\frac{(z''' - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

ve kterém značí:

- c ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - krátkodobá koncentrace znečišťující látky
- M (g/s) - množství znečišťující látky odcházející komínem
- $\sigma_y(x_L)$, $\sigma_z(x_L)$ (m) - příčný horizontální a vertikální rozptylový parametr
- u_h (m/s) - rychlost větru ve výšce h
- h (m) - efektivní výška zdroje (bez korekcí na vliv terénu)
- h_1 (m) - efektivní výška zdroje s korekcí na vliv terénu
- V_s (Nm^3/s) - objem spalín nebo vzdušiny odcházející komínem přepočtený na normální podmínky (0°C , 101325 Pa)
- x_L (m) - vzdálenost referenčního bodu od zdroje ve směru větru
- y_L (m) - vzdálenost referenčního bodu od zdroje ve směru kolmém na směr větru
- ϑ (-) - koeficient pro zvlněný terén
- z' (m) - korigovaná vertikální souřadnice referenčního bodu v členu pro přímý rozptyl
- z'' (m) - korigovaná vertikální souřadnice referenčního bodu v členu popisujícím odraz v dolním odhadu
- z''' (m) - korigovaná vertikální souřadnice referenčního bodu v členu popisujícím odraz v horním odhadu

K jednotlivým veličinám:

- 1) Hodnota M je vstupním údajem, její stanovení je popsáno v kapitole 2.1.1.
- 2) Rozptylové parametry $\sigma_y(x)$ a $\sigma_z(x)$ jsou popsány v kapitole 3.5.
- 3) Výpočet u_b je obsahem kapitoly 3.2.
- 4) Stanovení efektivní výšky h je popsáno v kapitole 3.3. a její korekce na vliv terénu (tj. výpočet h_1) v kapitole 3.4.
- 5) Hodnota V_s je vstupním údajem (viz kapitola 2.1.1.)
- 6) Pro veličiny z' , z'' a z''' platí následující vztahy za předpokladu, že l je výška referenčního bodu nad úrovní terénu (např. výška budovy):

$$(3.2) \quad \begin{aligned} z' &= z + l && \text{pro } z + l \leq h_1 \\ &= h_1 && \text{pro } z + l > h_1 \end{aligned}$$

$$(3.3) \quad \begin{aligned} z'' &= |z| + l && \text{pro } z + l \leq h_1 \\ &= |z| + h_1 - z && \text{pro } z + l > h_1 \end{aligned}$$

$$(3.4) \quad \begin{aligned} z''' &= z - l && \text{pro } z + l \leq h_1 \\ &= 2z - h_1 && \text{pro } z + l > h_1 \end{aligned}$$

- 7) Vertikální vzdálenost z značí výšku terénu v místě referenčního bodu nad úrovní terénu v místě komína, takže

$$(3.5) \quad z = z_r - z_z$$

kde z_r (m) - nadmořská výška terénu v místě referenčního bodu

z_z (m) - nadmořská výška terénu v místě zdroje

- 8) Koeficient ϑ pro zvlněný terén se pro každou dvojici zdroj - referenční bod určí z profilu nadmořské výšky terénu $z(x')$ mezi zdrojem a referenčním bodem takto:

$$(3.6) \quad \begin{aligned} \vartheta &= \max \left(0, \frac{1}{x \cdot (z_r - z_z)} \cdot \int_0^x (z_1(x') - 2z_2(x')) \cdot dx' \right) && \text{pro } z_r > z_z \\ &= 0 && \text{pro } z_r \leq z_z \end{aligned}$$

kde x (m) je vzdálenost referenčního bodu od zdroje,

$$(3.7) \quad \begin{aligned} z_1(x') &= z(x') - z_z && \text{pro } z(x') > z_z \\ &= 0 && \text{pro } z(x') \leq z_z \end{aligned}$$

a

$$(3.8) \quad \begin{aligned} z_2(x') &= z(x') - z_r & \text{pro } z(x') > z_r \\ &= 0 & \text{pro } z(x') \leq z_r \end{aligned}$$

Výpočet koeficientu \mathcal{G} se v praxi provádí pomocí speciálního programu, který proloží sítí referenčních bodů a zdrojů spojitou plochu, mezi každou dvojicí zdroj - referenční bod provede vertikální řez této plochy a z takto vzniklého profilu vypočte integrál \mathcal{G} . Výsledkem je matice \mathcal{G}_{ik} (i - číslo zdroje, k - číslo ref. bodu), která slouží jako vstupní údaj pro vlastní výpočet koncentrací.

- 9) Označíme-li x_z, y_z souřadnice zdroje a x_r, y_r souřadnice referenčního bodu, pro vzdálenost x referenčního bodu od zdroje bude platit:

$$(3.9) \quad x = \sqrt{(x_z - x_r)^2 + (y_z - y_r)^2}$$

Pro vzdálenosti x_L a y_L budou platit vztahy:

$$(3.10) \quad x_L = x \cdot \cos \lambda$$

$$(3.11) \quad y_L = x \cdot \sin \lambda \quad -90^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$$

kde λ je úhel mezi směrem větru a spojnicí zdroj - referenční bod.

- 10) V případě, že referenční bod leží v úrovni terénu (nikoliv na budově), tj. pokud $l = 0$, základní rovnice (3.1) přejde do tvaru

$$(3.12) \quad c = \frac{10^6 \cdot M}{2\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u_h + V_s} \cdot \exp\left(-\frac{y_L^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left[(1 + \mathcal{G}) \cdot \exp\left(-\frac{(z-h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + (1 - \mathcal{G}) \cdot \exp\left(-\frac{(|z|+h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

který je popsán v předcházející práci [1].

3.2. Rychlost větru

Do vztahu (3.1) resp. (3.12) pro výpočet koncentrace se dosazuje rychlost větru u_h , tj. rychlost větru ve výšce rovné efektivní výšce zdroje h (bez korekcí na vliv terénu). Základem pro výpočet u_h je rychlost větru u_{10} ve výšce 10 m nad zemí. Je to standardní výška, ve které se provádějí meteorologická měření směru a rychlosti větru.

Abychom mohli vyjádřit u_h pomocí u_{10} , musíme znát výškový profil rychlosti větru. Stejně jako v dosavadní metodice budeme předpokládat, že pro vzrůst rychlosti větru s výškou z platí mocninná závislost

$$(3.13) \quad u(z) = u_{10} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^p$$

kde p je parametr závislý na stabilitě atmosféry podle tabulky:

Třída stability	p
I	0,33
II	0,25
III	0,18
IV	0,14
V	0,10

Pro výšky nad 200 m nad terénem se však již předpokládá konstantní rychlost větru s výškou. Podobně pro výšky menší než 10 m nad zemí se nepočítá s útlumem větru v nejnižší vrstvě ovzduší a tedy pro $z < 10$ m bude $u(z) = u_{10}$.

Za těchto předpokladů bude pro rychlost větru ve výšce H koruny komína (výduchu) platit:

$$\begin{aligned}
 (3.14) \quad u_H &= u_{10} && \text{pro } H \leq 10 \text{ m} \\
 &= u_{10} \cdot \left(\frac{H}{10}\right)^p && \text{pro } 10 < H < 200 \text{ m} \\
 &= u_{10} \cdot 20^p && \text{pro } H \geq 200 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Vypočtená rychlost u_H se použije ke stanovení efektivní výšky zdroje h :

$$(3.15) \quad h = H + \frac{\Delta h_0}{u_H}$$

kde Δh_0 je převýšení kouřové vlečky (výška nad korunou komína, do které vlečka vystoupí vlivem tepelného a mechanického vlnosy) při rychlosti větru 1 m/s, tj. prakticky za bezvětří.

Rychlost větru u_h ve výšce h pak bude

$$\begin{aligned}
 (3.16) \quad u_h &= u_{10} && \text{pro } h \leq 10 \text{ m} \\
 &= u_{10} \cdot \left(\frac{h}{10}\right)^p && \text{pro } 10 < h < 200 \text{ m} \\
 &= u_{10} \cdot 20^p && \text{pro } h \geq 200 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Ze vztahů (3.1) resp. (3.12) a (3.16) vyplývá, že pokud rychlost větru u_{10} klesá k nule, klesá k nule i u_h a tudíž koncentrace roste až k hodnotám koncentrací v komíně. Z toho je zřejmé, že rovnice (3.1) a (3.12) nepopisují správně situaci v atmosféře za bezvětří a velmi nízkých rychlostí větru, protože v reálné atmosféře k takto vysokým koncentracím

nedochází. Při nízkých rychlostech větru (zhruba pro $u_{10} < 1.5$ m/s) se totiž v atmosféře začínají uplatňovat jiné procesy rozptylu znečišťujících látek, jejichž popis je však mimo možnosti předkládané metodiky. Proto budeme ve všech dalších výpočtech pokládat za minimální rychlost větru rychlost $u_{10} = 1,5$ m/s.

Pokud jde o závislost směru větru na výšce, budeme stejně jako v dosud platné metodice [5] předpokládat, že v nejnižších několika stech metrech atmosféry dochází ke stáčení směru větru s výškou o 4° na 100 m. Pro azimut směru větru φ_h (ve $^\circ$) v efektivní výšce h (bez korekce na vliv terénu) pak bude platit

$$(3.17) \quad \begin{aligned} \varphi_h &= \varphi_{10} + \frac{h-10}{25} && \text{pro } h > 10 \text{ m} \\ &= \varphi_{10} && \text{pro } h \leq 10 \text{ m} \end{aligned}$$

kde φ_{10} je azimut směru větru (ve $^\circ$) ve výšce 10 m nad terénem.

3.3. Stanovení efektivní výšky kouřové vlečky

3.3.1. Základní vztahy

Efektivní výška kouřové vlečky h je definována jako součet stavební výšky zdroje H a jeho převýšení Δh , které je způsobeno teplotním vlnosem vlečky nebo u chladných zdrojů působením vynucené ventilace.

$$(3.18) \quad h = H + \Delta h$$

Převýšení je nepřímo úměrné rychlosti proudění ve výšce koruny komína

$$(3.19) \quad \Delta h = \frac{\Delta h_0}{u_H} \quad \text{pro } u_H \geq 1 \text{ m/s,}$$

kde symbol Δh_0 značí převýšení kouřové vlečky při rychlosti větru 1 m/s.

Převýšení Δh_0 závisí na tepelné vydatnosti zdroje podle empirického vztahu

$$(3.20) \quad \begin{aligned} \Delta h_0 &= 30 \cdot Q^{0.7} && \text{pro } Q \geq 20 \text{ MW} \\ \Delta h_0 &= 90 \cdot Q^{\frac{1}{3}} && \text{pro } Q < 20 \text{ MW} \end{aligned}$$

Tepelná vydatnost zdroje Q (MW) se vypočítá z množství a teploty spalin odcházejících komínem:

$$(3.21) \quad Q = 10^{-3} \cdot c_p \cdot t_s \cdot V_s$$

kde V_s je objem odcházejících spalin přepočtený na normální podmínky v Nm^3/s ,

t_s je teplota spalin ve $^{\circ}\text{C}$

c_p je měrné teplo spalin, pro které platí

$$c_p = 1,371 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K}) \quad \text{pro } t_s > 80 ^{\circ}\text{C}$$

$$c_p = 1,004 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K}) \quad \text{pro } t_s \leq 80 ^{\circ}\text{C}.$$

Popsaný způsob výpočtu efektivní výšky zdroje platí pro běžné horké exhalace ze spalovacích procesů. V případě chladných exhalací (např. z výdechů vzduchotechniky apod.) je třeba postupovat podle kapitoly 3.3.4.

3.3.2. Korekce převýšení na stabilitu atmosféry

Převýšení kouřové vlečky závisí rovněž na teplotním zvrstvení v atmosféře. Tuto závislost popisuje korekční faktor K_s , pro který platí

$$(3.22) \quad K_s = 1 + 0,2 \cdot \gamma$$

kde γ je vertikální teplotní gradient definovaný vztahem (2.10). Následující tabulka uvádí střední hodnoty vertikálního teplotního gradientu i korekčního faktoru K_s pro všech 5 tříd stability atmosféry:

Třída	Název třídy	γ ($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)	K_s
I	superstabilní	-2	0,6
II	stabilní	-1,1	0,78
III	izotermní	0	1
IV	normální	0,7	1,14
V	labilní	1,2	1,24

Pro převýšení kouřové vlečky při rychlosti větru 1 m/s pak bude platit

$$(3.23) \quad \Delta h_0 = K_s \cdot A Q^B$$

kde A, B jsou konstanty z rovnice (3.20).

3.3.3. Převýšení v malých vzdálenostech

V řadě případů je nutno počítat efektivní výšku zdroje i v malých vzdálenostech od komína, kdy ještě vlečka nedosahuje své maximální výšky. Pro takovéto případy se nejčastěji předpokládá, že exhalace stoupají od zdroje po křivce podobné $x^{\frac{2}{3}}$ (kde x je vzdálenost od zdroje), až v nějaké vzdálenosti x_m dosáhnou maximálního převýšení. Za těchto předpokladů můžeme psát

$$(3.24) \quad \Delta h = \frac{\Delta h_0}{u_H} \cdot \left(\frac{x}{x_m}\right)^{2/3} \quad \text{pro } x < x_m$$

$$\Delta h = \frac{\Delta h_0}{u_H} \quad \text{pro } x \geq x_m$$

Vzdálenost x_m bude záviset na tepelné vydatnosti zdroje a na stabilitním zvrstvení v atmosféře. Pro tuto vzdálenost bude platit

$$(3.25) \quad x_m = K_m \sqrt{Q}$$

kde K_m je konstanta závislá na teplotním zvrstvení. Její hodnoty pro jednotlivé třídy stability jsou uvedeny v následující tabulce

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

Vzorec (3.19) pak bude mít tvar

$$(3.26) \quad \Delta h = \frac{K_S \cdot A \cdot Q^B}{u_H} \cdot \left(\frac{x}{K_m \sqrt{Q}}\right)^{2/3} \quad \text{pro } x < K_m \sqrt{Q}$$

$$\Delta h = \frac{K_S \cdot A \cdot Q^B}{u_H} \quad \text{pro } x \geq K_m \sqrt{Q}$$

3.3.4. Převýšení vlečky při chladných exhalacích

Pokud se budeme zabývat výpočtem efektivní výšky zdroje, jehož exhalace mají teplotu srovnatelnou s teplotou okolí, dostaneme při použití vzorce (3.20) příliš vysoké hodnoty, a to zvláště v případech velkého objemu vystupujících exhalací. V těchto případech je vhodnější použít Hollandovu formuli pro výpočet převýšení vlečky, která má tvar

$$(3.27) \quad \Delta h = \frac{1.5 \cdot w_0 \cdot d}{u_H}$$

kde w_0 - výstupní rychlost exhalací [m/s]

d - vnitřní průměr komína (výduchu) [m]

Při přechodu mezi formulemi (3.20) a (3.27) bychom se mohli dostat do problémů s jejich nespojitostí. Proto se zavádí koeficient β , který tuto nespojitost odstraní. Předpokládejme, že při teplotě exhalací pod 30 °C bude platit vzorec (3.27) a při teplotě nad 80 °C vzorec (3.20). Potom je možno oba vzorce spojit do tvaru

$$(3.28) \quad \Delta h_0 = (1 - \beta) \cdot 1.5 \cdot w_0 \cdot d + \beta \cdot K_S \cdot A \cdot Q^B$$

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

$$(3.29) \quad \begin{array}{ll} \beta = 1 & \text{pro } t_s \geq 80 \text{ °C} \\ \beta = \frac{t_s - 30}{50} & \text{pro } 30 < t_s < 80 \text{ °C} \\ \beta = 0 & \text{pro } t_s \leq 30 \text{ °C} \end{array}$$

Po této modifikaci, uvážíme-li význam jednotlivých členů rovnice (3.28), je nutné modifikovat vztah (3.26), který určuje převýšení vlečky v malých vzdálenostech. Je totiž zřejmé, že první člen rovnice (3.28) představuje vzos, vyvolaný dynamikou exhalací, vypouštěných ze zdroje a působí okamžitě po opuštění komína. Druhá část potom představuje termický vzos vlečky, který působí pomaleji a určuje vlastní tvar postupného vzestupu vlečky. Proto vzdálenost x_m , ve které dosáhne vlečka konečného převýšení, musí souviset pouze s termickým členem.

Zkombinujeme-li vztahy (3.24), (3.27) a (3.28), získáme konečný vzorec

$$(3.30) \quad \Delta h = (1 - \beta) \frac{1.5 \cdot w_0 \cdot d}{u_H} + \beta \frac{K_S \cdot A \cdot Q^B}{u_H} \left(\frac{x}{K_m \sqrt{Q}} \right)^{2/3} \quad \text{pro } x < K_m \sqrt{Q}$$

$$\Delta h = (1 - \beta) \frac{1.5 \cdot w_0 \cdot d}{u_H} + \beta \frac{K_S \cdot A \cdot Q^B}{u_H} \quad \text{pro } x \geq K_m \sqrt{Q}$$

3.3.5. Převýšení vlečky v případě více blízkých zdrojů

Vyskytuje-li se N ($N \geq 2$) komínů blízko sebe tak, že se jejich kouřové vlečky mohou vzájemně ovlivňovat, celkové převýšení vleček vzrůstá. Toto zvýšení se vypočte následujícím způsobem:

Označíme H_i výšky takových komínů a Δh_i jejich převýšení vypočítané podle předchozích kapitol:

$$(3.31) \quad \Delta h_i = \frac{\Delta h_{i0}}{u_{H_i}} \quad i = 1, 2, \dots, N$$

kde u_{H_i} je rychlost větru ve výšce H_i .

Výsledná převýšení $\Delta h_i'$ vleček z jednotlivých zdrojů pak lze vyjádřit pomocí faktoru vzrůstu E_{N_i} :

$$(3.32) \quad \Delta h_i' = \Delta h_i \cdot E_{N_i}$$

kde

$$(3.33) \quad E_{N_i} = \left(\frac{N + P_{N_i}}{1 + P_{N_i}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Parametr P_{N_i} má pro N zdrojů stojících v řadě za sebou s rozestupy Δx (m) vyjádření

$$(3.34) \quad P_{N_i} = \frac{6}{\sqrt{N}} \left(\frac{(N-1) \cdot \Delta x}{\Delta h_i} \right)^{\frac{3}{2}}$$

a pro shluk N zdrojů s maximálním rozměrem shluku L_g (m) :

$$(3.35) \quad P_{N_i} = \frac{6}{\sqrt{N}} \left(\frac{L_g}{\Delta h_i} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Veličiny Δx a L_g můžeme vypočítat, označíme-li x_s, y_s a x_t, y_t souřadnice dvou nejvzdálenějších komínů ve skupině. Potom v případě, že zdroje stojí v řadě za sebou, platí

$$(3.36) \quad \Delta x = \frac{1}{N-1} \cdot \sqrt{(x_s - x_t)^2 + (y_s - y_t)^2}$$

a v případě shluku N zdrojů

$$(3.37) \quad L_g = \sqrt{(x_s - x_t)^2 + (y_s - y_t)^2}$$

Efektivní výšky vleček pak budou

$$(3.38) \quad h_i = H_i + \Delta h_i'$$

Zbývá určit komíny, ze kterých se vlečky budou vzájemně ovlivňovat. Označíme-li \bar{H} vážený průměr výšek komínů H_i ve skupině, kde vahou je tepelná vydatnost spalín Q_i , tj.

$$(3.39) \quad \bar{H} = \frac{\sum_{j=1}^N H_i Q_i}{\sum_{j=1}^N Q_i}$$

pak se předpokládá, že se budou ovlivňovat vlečky z komínů, pro které platí současně tyto 2 podmínky:

$$(3.40) \quad \Delta x \leq 1,5 \cdot \bar{H} \quad (\text{nebo } L_g \leq 1,5 \cdot \bar{H})$$

$$(3.41) \quad 0,5 \cdot \bar{H} \leq H_i \leq 1,5 \cdot \bar{H}$$

3.4. Korekce efektivní výšky na vliv terénu

Princip korekce efektivní výšky h zdroje, pokud terén v místě referenčního bodu leží výše než nadmořská výška úrovně efektivní výšky, byl odvozen v předcházející práci [1]. Zde proto uvádíme pouze stručný přehled.

Předpokládáme, že kouřová vlečka bude vystupovat podél svahů vyšších, než je její původní efektivní výška h , vzhůru tak, že její osa bude ve výšce o $\varepsilon \cdot h$ vyšší než úroveň terénu v daném místě. Za vrcholem svahu již zůstane v nové výšce a nebude klesat podél závětrných svahů dolů.

Parametr ε bude záviset na stabilitě atmosféry podle tabulky:

Třída stability	ε
I	0,05
II	0,10
III	0,20
IV	0,30
V	0,50

Pro korigovanou efektivní výšku h_i pak bude platit vztah

$$(3.42) \quad \begin{aligned} h_i &= z_m + \varepsilon \cdot h & \text{pro } z_m > (1-\varepsilon) \cdot h \\ &= h & \text{pro } z_m \leq (1-\varepsilon) \cdot h \end{aligned}$$

kde h (m) je nekorigovaná efektivní výška zdroje

a z_m (m) je maximální výška terénu nad úrovní úpatí komína mezi zdrojem a referenčním bodem

Hodnota z_m bude pro každou dvojici zdroj - referenční bod výsledkem výpočtu speciálního programu, který počítá profily terénu mezi zdroji a referenčními body (a který počítá i integrál 9 - viz kapitola 3.1. odst. 8). Nebude-li nejvyšší bod na profilu terénu převyšovat výšku referenčního bodu z ($z = z_r - z_z$), bude nejvyšším bodem referenční bod sám (tj. $z = z_m$) a tudíž se vztah (3.42) dá použít i pro body na návětrné straně svahů.

3.5. Rozptylové parametry σ_y, σ_z

Rozptylové parametry σ_y a σ_z popisují rychlost rozšiřování vlečky exhalací od bodového zdroje v závislosti na vzdálenosti x_L od zdroje ve směru větru. Závisejí na velikosti turbulence v ovzduší a tedy na stabilitě atmosféry a jsou mírou schopnosti atmosféry rozptýlovat příměsi. Pro výpočet rozptylových parametrů byl zvolen mocninový vztah s takovými koeficienty, aby se výsledné hodnoty σ_y a σ_z co nejvíce blížily těmto hodnotám ze současné metodiky [5], ve které se používá logaritmická závislost.

Podle [2] pro σ_y a σ_z platí:

$$(3.43) \quad \begin{aligned} \sigma_y &= a_y \cdot x_L^{b_y} \\ \sigma_z &= a_z \cdot x_L^{b_z} \end{aligned}$$

kde koeficienty a_y, b_y, a_z, b_z závisí na třídě stability atmosféry podle tabulky:

třída stability	a_y	b_y	a_z	b_z
I - velmi stabilní	0,1042	0,8844	0,5461	0,5076
II - stabilní	0,1195	0,8930	0,4980	0,5797
III - izotermní	0,1400	0,8986	0,4221	0,6564
IV - normální	0,1684	0,9018	0,3158	0,7549
V - konvektivní	0,2898	0,8831	0,1740	0,9729

3.6 Zahrnutí depozice a transformace znečišťujících látek do výpočtu

Znečišťující látky v atmosféře se podrobují různým procesům, jejichž přičiněním jsou z atmosféry odstraňovány. Jedná se buď o chemické procesy, při nichž se látka, často katalytickou reakcí, mění na jinou, čímž dochází k úbytku původní příměsi, nebo o fyzikální procesy. Ty se dále dělí podle způsobu jakým jsou příměsi odstraňovány na suchou a mokrou depozici. Suchá depozice je zachytávání plynné nebo pevné látky na zemském povrchu, mokrá depozice je vychytávání těchto látek padajícími srážkami.

Rychlost a způsob chemické transformace jsou ovlivňovány řadou faktorů jako je teplota, přítomnost, či nepřítomnost slunečního záření, katalyzátorů reakcí, koncentrace jiných reagujících látek atd. Velikost suché depozice závisí na typu podkladu (tráva, les ...), na rychlosti proudění v atmosféře, na tloušťce směšovací vrstvy apod. Velikost mokré depozice se mění v závislosti na intenzitě vypadávajících srážek, rozpustnosti dané látky ve vodě, na délce trvání srážek atd.

Z výše uvedeného je zřejmé, že postihnout chování znečišťujících látek v atmosféře není jednoduchá záležitost. Proto je v modelu možné počítat jen s prvním přiblížením k reálnému stavu a uvažovat jen roční průměrné hodnoty výše zmíněných rychlostí jednotlivých procesů odstraňování příměsí z atmosféry. Pro řadu látek je možno stanovit průměrnou dobu jejich setrvání v atmosféře λ . Podle délky této doby rozdělíme jednotlivé příměsi do tří kategorií. Průměrná doba setrvání v atmosféře je u látek první kategorie řádově několik hodin, u druhé kategorie několik dní a u třetí kategorie až několik let.

Koeficient k_u charakterizující rychlost úbytku příměsi je potom roven převrácené hodnotě této doby.

$$(3.44) \quad k_u = \frac{1}{\lambda}$$

Velikost koeficientu úbytku je pro jednotlivé třídy uvedena v následující tabulce:

Třída	Průměrná doba setrvání v atmosféře	Koeficient odstraňování k_u [s^{-1}]
I	20 h	$1,39 \cdot 10^{-5}$
II	6 dní	$1,93 \cdot 10^{-6}$
III	2 roky	$1,59 \cdot 10^{-8}$

Rozdělení základních znečišťujících látek je zřejmé z následující tabulky. U neuvedených je nutno odhadnout průměrnou dobu setrvání v atmosféře a zařadit ji do odpovídající skupiny.

Znečišťující látka	Třída
oxid siřičitý	II
oxidy dusíku	II
oxid dusný	III
amoniak	II
sirovodík	I
ozón	III
oxid uhelnatý	III
oxid uhličitý	III
metan	III
vyšší uhlovodíky	III
chlorovodík	I
sirouhlík	II
formaldehyd	II
peroxid vodíku	I
dimetyl sulfid	I
metyl chlorid	III
karbonyl sulfid	III

Koncentrace c znečišťující látky po zahrnutí korekce na depozici a transformaci se pak vypočítá z původní koncentrace c_0 podle rovnice

$$(3.45) \quad c = c_0 \cdot e^{-k_u \cdot \frac{x_L}{u_h}}$$

kde x_L je vzdálenost referenčního bodu od zdroje ve směru větru a

u_h je rychlost větru v efektivní výšce vlečky.

3.7. Zeslabení vlivu nízkých zdrojů na znečištění ovzduší na horách

Podle kapitoly 3.4. předpokládáme, že kouřová vlečka vystupuje podél svahů vzhůru a tento výstup není ničím omezený. Ve skutečnosti však zejména za inverzních situací existují v atmosféře zadržující vrstvy (hladiny), nad které se znečištění z nízkých zdrojů nemůže dostat. Typickou takovou zadržující hladinou bývá hladina horní hranice přízemní inverze.

K zeslabení vlivu nízkých zdrojů na referenční body ve větších nadmořských výškách proto zavádíme korekční koeficient K_h :

$$(3.46) \quad c = c_0 \cdot K_h$$

kde c_0 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - původní koncentrace znečišťující látky

c ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - koncentrace po zahrnutí korekce

Korekční koeficient K_h závisí na rozdílu nadmořských výšek referenčního bodu a efektivní výšky zdroje h (bez korekce na vliv terénu) a na statistické četnosti výskytu horní hranice inverze mezi těmito dvěma výškami.

Četnost výskytu horní hranice inverze v různých nadmořských výškách není běžně sledovanou veličinou na meteorologických stanicích. Není proto možné získat tato data pro různá místa v ČR tak jako např. větrné růžice. Pro celou ČR je však možné použít tyto četnosti odvozené z aerologických měření teplotního zvrstvení ovzduší mezi zemí a hladinou 850 hPa na meteorologické stanici Praha-Libuš.

Podle výsledků měření se zde vyskytují přízemní inverze ve 44,5 % případů. Pravděpodobnost, že se horní hranice inverze vyskytne mezi nějakou nadmořskou výškou z a výškou hladiny 850 hPa, udává relativní kumulativní četnost $F(z)$. Její hodnoty jsou uvedené v následující tabulce:

Tabulka hodnot $F(z)$:

z (m n.m.)	$F(z)$	z (m n.m.)	$F(z)$
350	0,445	1000	0,140
400	0,444	1050	0,125
450	0,432	1100	0,111
500	0,401	1150	0,092
550	0,360	1200	0,078
600	0,325	1250	0,061
650	0,292	1300	0,049
700	0,261	1350	0,034
750	0,233	1400	0,025
800	0,213	1450	0,015
850	0,189	1500	0,007
900	0,177	1550	0,001
950	0,157	1600	0

Inverze se však vyskytují pouze v I. a II. třídě stability, částečně i ve III. třídě, zatímco IV. a V. třída stability popisují stavy bez inverzí a proto se pro ně korekce neprovádí. V I. a II. třídě stability jde o inverzní teplotní zvrstvení vždy, proto je nutné pro tyto případy relativní kumulativní četnost $F(z)$ přepočítat na 100%-ní výskyt horní hranice inverze mezi zemí a výškou 1600 m, tj. hodnoty $F(z)$ z tabulky vynásobit zlomkem $1/0,445$. Ve III. třídě stability závisí výskyt inverzí rovněž na rychlosti větru.

Podle výpočtů založených na statistickém výskytu jednotlivých tříd stability a rychlosti větru u_{10} (viz [2]) můžeme definovat hodnoty kumulativních četností $F'(z)$ použitých pro výpočet koeficientu K_h (za předpokladu, že $F(z)$ jsou hodnoty četností v tabulce) takto:

(3.47) I. a II. třída stability: $F'(z) = 2,247 \cdot F(z)$

$$\begin{aligned}
 \text{III. třída stability: } F'(z) &= 1,170 \cdot F(z) && \text{pro } u_{10} \leq 2,5 \text{ m/s} \\
 &= 1,170 \cdot F(z) \cdot \left(1 - \frac{u_{10}-2,5}{5}\right) && \text{pro } 2,5 < u_{10} < 7,5 \text{ m/s} \\
 &= 0 && \text{pro } u_{10} \geq 7,5 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

IV. a V. třída stability: $F'(z) = 0$

Pro nadmořské výšky neuvedené v tabulce se hodnoty $F'(z)$ vypočítají lineární interpolací. Pro $z < 350$ m platí hodnoty $F'(350)$.

Koeficient K_h se pak vypočte

$$(3.48) \quad \begin{aligned} K_h &= 1 - (F'(z_z+h) - F'(z_r)) && \text{pro } z_r > z_z + h \\ &= 1 && \text{pro } z_r \leq z_z + h \end{aligned}$$

kde z_r je nadmořská výška terénu v místě referenčního bodu

a z_z je nadmořská výška terénu v místě zdroje

3.8. Výpočet koncentrací prachu

Rozdíl mezi výpočtem koncentrací plyných znečišťujících látek a prachu spočívá ve vyjádření poklesu osy prašné vlečky v důsledku pádové rychlosti prašných částic v_g , tj. v dosazení výrazu

$$(3.49) \quad h_g = \frac{x_L \cdot v_g}{u_h}$$

do členů přímého rozptylu a odrazu v horním i dolním odhadu v rovnicích pro výpočet koncentrace.

Odvození základních vztahů pro výpočet koncentrací prachu je popsáno v předcházejících pracích [1] a [2], zde tedy uvádíme jen stručné shrnutí.

Vztah pro výpočet koncentrací prachu má tvar

$$(3.50) \quad c = \frac{10^6 \cdot M}{2\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u_h + V_s} \cdot \exp\left(-\frac{y_L^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z'-(h_1-h_g))^2}{2\sigma_z^2}\right) + \right. \\ \left. + (1 - \vartheta) \cdot \exp\left(-\frac{(z''+h_1+h_g)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \vartheta \cdot \exp\left(-\frac{(z'''-(h_1+h_g))^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

Významy jednotlivých symbolů jsou shodné s významy stejných symbolů v rovnici (3.1) včetně vyjádření veličin z' , z'' a z''' (vztahy (3.2), (3.3) a (3.4)), protože požadujeme, aby pro velmi malé částice, u kterých se pádová rychlost v_g blíží nule, vztah (3.50) plynule přešel do rovnice (3.1) pro plyné znečišťující látky.

V případě, že referenční bod leží v úrovni terénu (nikoliv na budově), tj. pokud $l = 0$, rovnice (3.5) přejde do tvaru

$$(3.51) \quad c = \frac{10^6 \cdot M}{2\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u_h + V_s} \cdot \exp\left(-\frac{y_L^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z-(h_1-h_{gi}))^2}{2\sigma_z^2}\right) + \right. \\ \left. + (1 - \vartheta) \cdot \exp\left(-\frac{(z+h_1+h_{gi})^2}{2\sigma_z^2}\right) + \vartheta \cdot \exp\left(-\frac{(z-(h_1+h_{gi}))^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

uváděného v [1] a [2].

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

$$(3.52) \quad v_g = -\frac{3\pi \cdot \nu}{2 \cdot C_3 \cdot d} + \sqrt{\left(\frac{3\pi \cdot \nu}{2 \cdot C_3 \cdot d}\right)^2 + \frac{C_2 \cdot \rho_c \cdot g \cdot d}{C_3 \cdot \rho}}$$

ve kterém

$\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ je kinematická viskozita vzduchu

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

$\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$ 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

Vztahy (3.50) a (3.51) platí pro prašné částice o určité jedné velikosti (tj. s určitou jednou pádovou rychlostí v_g). Většinou se však prašné emise skládají z celého spektra částic. Jedním ze vstupních údajů pro výpočet proto musí být křivka zrnitosti emitovaných prašných částic, tj. procentuelní zastoupení α_{pi} v jednotlivých třídách velikosti částic d_i , $i = 1, 2, \dots, r_c$ (r_c - počet tříd velikosti částic). Výslednou koncentraci prachu pak vypočítáme jako součet koncentrací prašných frakcí v jednotlivých třídách velikosti částic:

$$(3.53) \quad c = \frac{10^6 \cdot M}{2\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u_h + V_s} \cdot \exp\left(-\frac{y_L^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \sum_{i=1}^{r_c} \frac{\alpha_{pi}}{100} \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z'-(h_1-h_{gi}))^2}{2\sigma_z^2}\right) + \right. \\ \left. + (1 - \vartheta) \cdot \exp\left(-\frac{(z''+h_1+h_{gi})^2}{2\sigma_z^2}\right) + \vartheta \cdot \exp\left(-\frac{(z'''-(h_1+h_{gi}))^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

kde $h_{gi} = \frac{x_{L \cdot V_{gi}}}{u_h}$

a pádová rychlost v_{gi} závisí na velikosti částic d_i podle vztahu (3.52).

Zvolíme-li třídy velikosti částic nedostatečně jemně zejména u částic s velikostí nad 20 μm , může se stát, že u vzdálených referenčních bodů za inverzních podmínek v atmosféře

bude mít závislost c na výšce z vlnový průběh v důsledku toho, že jednotlivé exponenciely pro různá d_i se nebudou překrývat. Aby k tomuto jevu nedocházelo, je nutné volit třídy velikosti částic tak, aby rozdíl pádových rychlostí v sousedních třídách velikosti nebyl větší než 0,01 m/s. Tomuto požadavku odpovídají (pro běžné hustoty ρ_c prašných částic) následující třídy velikosti:

Třída velikosti částic	Rozmezí velikosti d_i (μm)
1	0 - 12
2	12 - 16
3	16 - 19
4 - 11	19 - po 2 μm - 35
12 a dále	po 1 μm

V praxi však takto jemné dělení spektra prašných částic nebývá k dispozici. Jako vstupní údaj o rozložení velikostí částic proto musí stačit běžné údaje zahrnující několik málo tříd velikostí částic (např. v kap. 2.1.1., odst. 10) s tím, že podrobné dělení spektra částic na požadované třídy velikosti musí být formou interpolace ošetřené v počítačovém programu.