

Teoretický výpočet spadu tuhých častíc z ovzdušia

Pavel Slančo¹, Erika Geldová¹, Jozef Hančul'ák¹ a Milan Bobro¹

Theoretical calculation of solid particles deposition from the air

This paper presents the calculation of harmful substance deposition (air pollution) from the point source (Slančo, et al., 2001) using equation (1). The point source shall be understood as e.g. chimneys of factory, heat plant, incinerator, boiler plant, local heating plant, etc.

The theoretical calculation of concentration (1), or deposition (8) is based on the study of transfer and dispersion of pollution in air (Slančo, et al., 2000a). The movement of pollution in air consists of a movement of the air itself and a relative movement of pollution particles and air, while the movement of harmful substance in the smoke trail is under the influence of turbulent diffusion, convection and gravitation. Molecular diffusion is not important in this process. When calculating concentrations (1) and deposition (8) of air pollution on a particular place near the source, it is assumed that the air speed is constant, the direction of wind does not change with the height and the source of air pollution is time-constant. The change in the wind speed with the height depends on the stability class of atmosphere (temperature gradient) (Slančo, et al., 2000a) and it is calculated using equation (10).

The theoretical calculation of concentration and or deposition of harmful substance from the point source (1) and (8) shall be applied if the harmful substance particles, which leave the source, have the same density (composition), shape (spherical) and size.

The experimental observations of dust deposition showed the significance of 0.1-20 μm particles. The application of equation (1) to calculate the concentration is conditioned, in addition to the recognition of source parameters and meteorological conditions, by the recognition of the particle sedimentation speed, which changes with the size of particle radius (2).

For a practical calculation of deposition it is therefore necessary to know the differential distribution function $f(r)$ of particle radii, which can be made on the basis of the granulometric analysis of particles emitted by the source and to determine the mean sedimentation speed of particles (3), or eventually to use one of the mean particle radius types (4), (5), (6) in formula (2).

If we know the parameters of the harmful substance source and meteorological conditions, then, using equation (8), it is possible to determine the harmful substance deposition using one of equations (3), (4), (5), (6).

Equation (8) represents the quantity of substance, which falls down per 1 second on 1 m^2 of surface. In practice the deposition is calculated for a period of 30 days. Providing the meteorological conditions (temperature gradient, direction and speed of wind) and source parameters (H, w, d, G), of which the value of u_H , or h can be determined, remain unchanged, the deposition will be calculated using equation (8).

Key words: point source, dispersion, ground concentration, wind direction, gravity speed of element, meteorological conditions, turbulent speed convection, diffusive coefficients, parameters of dispersion, effective level of source.

Úvod

Činnosť ľudskej populácie sa prevažne odohráva v najspodnejšej vrstve atmosférického obalu Zeme, v tzv. medznej vrstve atmosféry. Jej výšku možno odhadnúť približne na jeden kilometer. Pre potreby praxe sa často vyžaduje poznať stupeň znečistenia ovzdušia v oblasti, v ktorej sa nachádza jeden alebo viac jeho zdrojov. Otázka pohybu škodlivín (plynné a tuhé exhalácie, aerosóly) má veľký praktický význam z technickej a hygienickej stránky, napr. pri probléme predpovede znečistenia obývaných území priemyselnými aerosólmi. Metódy riešenia takejto otázky sú však značne obmedzené a finančne náročné. Preto je potrebné používať metódy modelovania tohto procesu. Jedná sa prevažne o modelovanie matematické, s pomocou výpočtovej techniky. Pretože pohyb škodlivín v ovzduší predstavuje zložitý a komplikovaný proces, je možné metódu matematického modelovania využívať predovšetkým v jednoduchších prípadoch. Medzi takéto nepatrí prúdenie a šírenie exhalácií v orograficky komplikovanom teréne

Výpočet koncentrácie aerosólu

V článku (Slančo et al., 2000a) je uvedený teoretický výpočet koncentrácie plyných látok a tuhých častíc emitovaných z bodového zdroja (komína) do okolitého prostredia.

Ak zvolíme začiatok pravouhlého súradnicového systému x_1, x_2, x_3 v päte bodového zdroja tak, že kladný smer osi x_1 má smer prúdenia vzduchu a smer osi x_3 má smer výšky komína, bude mať vzťah pre výpočet koncentrácie exhalátu v ľubovoľnom bode prostredia v okolí zdroja, za podmienok uvedených v citovanej práci tvar, kde Q – hmotnostná výdatnosť (mohutnosť) zdroja [gs^{-1}], h – efektívna výška komína [m], \bar{u} – priemerná rýchlosť vetra medzi hladinou 10 m nad povrchom terénu a hladinou efektívnej výšky h [ms^{-1}], $\alpha_2, \alpha_3, \beta_2, \beta_3$ – koeficienty parametrov rozptylu (Bubník, 1981) [-], D – hodnota difúzneho koeficientu v smere osi x_3 pre veľké vzdialenosti, v_s – rýchlosť gravitačnej sedimentácie častíc aerosólu [ms^{-1}].

¹ RNDr. Pavel Slančo, Mgr. Erika Geldová, Ing. Jozef Hančul'ák, RNDr. Milan Bobro, PhD., Ústav geotechniky SAV, Watsonova 45, 04353 Košice
(Recenzované, revidovaná verzia dodaná do 10.12.2001)

$$C(x_1, x_2, x_3) = \frac{Q}{2\pi\bar{u}\alpha_2\alpha_3x_1^{\beta_2+\beta_3}} \exp\left[\frac{-x_2^2}{2\alpha_2^2x_1^{2\beta_3}}\right] \exp\left[\frac{-v_s(x_3-h)}{2D} - \frac{v_s^2\alpha_3^2x_1^{2\beta_3}}{8D^2}\right] \cdot \left\{ \exp\left[\frac{-(x_3-h)^2}{2\alpha_3^2x_1^{2\beta_3}}\right] + \exp\left[\frac{-(x_3+h)^2}{2\alpha_3^2x_1^{2\beta_3}}\right] \right\}, \quad (1)$$

Z experimentálnych pozorovaní spádovej prašnosti sú zaujímavé častice s veľkosťou 0,1 – 20 μm. Použitie rovnice (1) pre výpočet koncentrácie je podmienené poznaním rýchlosti gravitačnej sedimentácie častice v_s . Základným vzorcom pre výpočet rýchlosti v_s je Stokesov vzťah (predpokladá guľové častice)

$$v_s = \frac{2g\rho_\zeta r^2}{9\eta}, \quad (2)$$

kde g – hodnota gravitačného zrýchlenia [m s^{-2}], r – polomer častice [m], ρ_ζ – hustota častice [kg.m^{-3}], η – dynamická viskozita prostredia (vzduchu) [$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$], pričom je zanedbaná hustota vzdušného prostredia.

Pri výpočte koncentrácie, voči prípadu plynov a malých častíc do 0,1 μm, spočíva podstatný rozdiel v tom, že predpokladáme rôznu veľkosť (rozmer), hustotu, prípadne tvar častíc. Tieto faktory spôsobujú rozdielnu rýchlosť sedimentácie v_s spôsobenú gravitačnou silou. Pre zjednodušenie úvah budeme predpokladať, že všetky exhalované častice sú guľové, majú rovnakú hustotu, ale rôznu veľkosť. Pri dodržaní týchto predpokladov je možné v rovnici (1) použiť strednú hodnotu gravitačnej rýchlosti exhalovaných častíc v_s , musíme však poznať rozdelenie častíc podľa veľkosti (v danom prípade podľa polomerov).

Rozdelenie polomerov častíc môže byť dané rôznym spôsobom. Ak je určená časť df počtu častíc, polomery ktorých ležia v intervale (r ; $r + dr$), teda

$$df = f(r) dr \quad a \quad \int_0^\infty f(r) dr = 1,$$

potom sa krivka vyjadrená funkciou $f(r)$ nazýva krivkou hustoty rozdelenia alebo diferenciálnou krivkou rozdelenia polomerov častíc.

Pre konkrétny súbor aerosólových častíc môžeme namiesto hornej integračnej medze ∞ uvažovať hornú hranicu polomerov častíc (častice s najväčším polomerom) a namiesto dolnej hranice 0 vziať do úvahy polomer najmenších častíc. Strednú rýchlosť gravitačnej sedimentácie vypočítame:

$$v_{ss} = \frac{2g\rho_\zeta}{9\eta[v_s(r_2) - v_s(r_1)]} \quad (3)$$

Koncentráciu častíc, ktorých rozdelenie veľkostí podľa polomerov udáva frekvenčná krivka $f(r)$, potom vypočítame podľa rovnice (1), pričom namiesto gravitačnej rýchlosti v_s použijeme strednú gravitačnú rýchlosť určenú vzťahom (3).

Ak poznáme funkciu $f(r)$, môžeme v rovnici (2) použiť stredný aritmetický polomer

$$r_{1s} = \bar{r} = \int_{r_1}^{r_2} r f(r) dr, \quad (4)$$

stredný kvadratický polomer

$$r_{2s} = \sqrt{\bar{r}^2} = \left[\int_{r_1}^{r_2} r^2 f(r) dr \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

alebo stredný kubický polomer

$$r_{3s} = \sqrt[3]{\bar{r}^3} = \left[\int_{r_1}^{r_2} r^3 f(r) dr \right]^{1/3}. \quad (6)$$

Výpočet spadu

Spad exhalátu predstavuje množstvo látky, ktoré spadne za 1 s na 1 m² plochy. Toto množstvo vypočítame podľa (Tadmor, et al., 1969)

$$J_s = D \frac{\partial C}{\partial x_3} + v_s C = v C. \quad (7)$$

Rýchlosť v nazývame rýchlosťou tzv. suchej sedimentácie a je funkciou všetkých troch priestorových súradníc, teda rýchlosť usadzovania je rôzna pre každý bod priestoru v okolí zdroja. Použijúc rovnice (1), (3) a (7), prípadne (4), (5), (6), môžeme vypočítať spad tuhých častíc.

V praxi sa počíta spad znečisťujúcich látok za 30 dní. Tento spad vypočítame pri nezmenených meteorologických podmienkach a parametroch zdroja nasledovne:

Spad na 1 m² za 1 s bude

$$J_s = \frac{v_{ss} C}{2} + \frac{QD}{2\pi \bar{u} \alpha_2 \alpha_3^2 x_1^2 \beta_2 + 3\beta_3} \exp\left[\frac{-x_2^2}{2\alpha_2^2 x_1^2 \beta_2}\right] \exp\left[\frac{-v_{ss}(x_3 - h)}{2D} - \frac{v_{ss}^2 \alpha_3^2 x_1^2 \beta_3}{8D^2}\right] \cdot \left\{ \exp\left[\frac{-(x_3 - h)^2}{2\alpha_3^2 x_1^2 \beta_3}\right] (h - x_3) - \exp\left[\frac{-(x_3 + h)^2}{2\alpha_3^2 x_1^2 \beta_3}\right] (h + x_3) \right\}. \quad (8)$$

a spad za 30 dní pri nezmenených meteorologických podmienkach a parametroch zdroja nasledovne

$$J = 2,592 \cdot 10^6 \cdot J_s. \quad (9)$$

K praktickému výpočtu spadu znečisťujúcich látok podľa rovnice (8) potrebujeme poznať hodnoty h , u_H a \bar{u} . Podľa (Bubník, 1981) platí:

$$h = H + \frac{1,5wd + 9,8G}{u_H}, \quad (10)$$

kde H – výška bodového zdroja (komína) [m], w – rýchlosť vypúšťania exhalátu zo zdroja [m.s⁻¹], d – priemer koruny komína [m], G – tepelná výdatnosť zdroja [MW].

Rýchlosť vetra v korune komína vypočítame podľa vzorca (Bubník, 1981)

$$u_H = u_{10} \left(\frac{H}{10} \right)^p, \quad (11)$$

kde p je Suttonov meteorologický parameter (Slančo, et al., 2001a) a priemernú rýchlosť vetra medzi hladinou 10 m nad okolitým terénom a hladinou efektívnej výšky h vypočítame ako

$$\bar{u} = \frac{u_{10} (h^{p+1} - 10^{p+1})}{(h - 10)(p + 1)10^p}. \quad (12)$$

Koeficient rozptylu D (D_3 pre veľké vzdialenosti x_1) určíme zo vzťahu (Slančo, et al., 2000a):

$$D = \sqrt{2} \alpha_3 x_1^{\beta_3 + \frac{p}{p+1} - 1} \quad (13)$$

Diskusia

Výpočet spadu tuhých látok podľa rovnice (1) je založený, okrem iných predpokladov, na konštantnosti parametrov zdroja a meteorologických podmienok. Tento predpoklad nie je možné v priebehu 30 dní dodržať. Mení sa smer aj veľkosť rýchlosti vetra a trieda stability ovzdušia (vertikálny teplotný gradient). Pri odhade veľkosti spadu exhalátu je preto potrebné rozdeliť časové obdobie 30 dní na kratšie časové úseky, v ktorých najmä smer vetra a trieda stability ovzdušia zostávajú približne rovnaké. Celkový spad v mieste odberu vzoriek bude súčtom spadov za tieto kratšie obdobia.

Pri rozbere veterných pomerov je potrebné poznať častotť vetrov v jednotlivých smeroch. Pretože prízemný vietor sa plne prispôbuje tvárnosti terénu, môžeme usúdiť, že v prízemnej vrstve v dolinách nájdeme smer vetra vždy v smere doliny. V konkrétnom prípade závodu ŽB Siderit Nižná Slaná (Slančo, et al. 2001), ktorý sa nachádza v zúženej doline orientovanej v severo-južnom smere, budú v doline prevládať južné a severné vetry. Ak sa odberové stanovište spadu exhalátu z hlavného komína závodu nachádza severne od hlavného komína závodu Siderit, budú k celkovému spadu exhalátu prispievať len tie časové úseky z celkovej dĺžky 30 dní, v ktorých fúka južný vietor.

Pre rozptyl, resp. transport znečisťujúcich látok v ovzduší je dôležitá trieda stability ovzdušia, ktorú charakterizuje vertikálny teplotný gradient v ovzduší (pokles, resp. nárast teploty ovzdušia s výškou). Ak teplota s výškou klesá, jedná sa o kladný vertikálny teplotný gradient, v opačnom prípade hovoríme o zápornom gradiente.

Pri značnom poklese teploty smerom od zemského povrchu (Bubník, 1981), existujú priaznivé podmienky pre rozptyl a nepriaznivé pre transport exhalátu. K takémuto priebehu vertikálneho teplotného gradientu dochádza najčastejšie v jasných letných dňoch. Koncentračnú krivku exhalátu charakterizuje výrazné koncentračné maximum, ktoré je v relatívne malej vzdialenosti od zdroja a následný rýchly pokles koncentrácie, resp. spadu na nízku hodnotu (výrazný spad bude len v úzkom dĺžkovom intervale). V tomto prípade sa očakáva najvyššia koncentrácia škodliviny, koncentračná krivka je veľmi strmá (následne aj spadová), takže už v malej vzdialenosti od zdroja (tesne za koncentračným, resp. spadovým maximom) bude koncentrácia tuhých častíc v ovzduší aj ich spad veľmi nízky (Slančo, et al. 2000b).

K zápornému priebehu vertikálneho teplotného gradientu, keď teplota vzduchu smerom od zemského povrchu rastie, dochádza v chladných zimných nociach a ránoch. V tomto prípade je koncentračná krivka exhalátu (závislosť koncentrácie tuhých častíc od vzdialenosti miesta pozorovania od zdroja) plochá, s nevýrazným koncentračným maximom. Maximálna koncentrácia (aj spad) je najnižšia, ale vo veľkých vzdialenostiach je ešte stále pomerne vysoká – nedochádza k prílišnému poklesu koncentrácie (spadu) exhalátu. Sú to podmienky priaznivé pre transport a nepriaznivé pre rozptyl. K rozptylu dochádza prakticky len v horizontálnom smere (Slančo, et al. 2000b).

Praktický výpočet spadu exhalátu z bodového zdroja (hlavného komína závodu Siderit, Nižná Slaná) je uvedený v práci (Slančo, et al., 2001) pre odberové miesto, ktorého vzdialenosť od päty zdroja $x_1 = 1500$ m a prevýšenie odberového miesta oproti rovine päty komína ($x_3 = 0$) je 40 m ($x_3 = 40$ m).

Záver

Koncentrácia, resp. spad škodliviny v ľubovoľnom bode v okolí bodového zdroja (komína) závisí od parametrov zdroja (H, w, d, G) a od meteorologických podmienok (smer a rýchlosť vetra, teplotný gradient). Teoretický výpočet koncentrácie (spadu) vychádza zo štúdia prenosu a rozptylu exhalátu v ovzduší (Ermak, 1977; Slančo et al., 2000a). Pohyb exhalátu v atmosfére sa skladá z pohybu samotného vzduchu a relatívneho pohybu častíc exhalátu a vzduchu, pričom pohyb škodliviny v dymovej vlečke podlieha turbulentnej difúzii, konvekcií a vplyvu gravitačnej sily. Molekulárna difúzia nie je pri tomto procese dôležitá. Pri výpočte spadu exhalátu v danom mieste predpokladáme konštantnú rýchlosť a nemienci sa smer vetra s výškou. Výpočet je urobený pre časovo konštantný zdroj exhalácií. Diferenciálnu distribučnú funkciu veľkosti (guľových) častíc je potrebné určiť z granulometrického rozboru prašných vzoriek emitovaných zo zdroja exhalácií. Je potrebné poznať častotť rýchlosti vetra v smere od zdroja k odberovému stanovištiu a triedu stability ovzdušia (teplotný gradient) (Bubník, 1981) v čase odberu spadovej prašnosti v danej oblasti (Slančo et al. 2001). Vzťah (1) a (8) nie je vhodný pre prípad bezvetria a veľmi malých rýchlostí vetra.

Literatúra

- BUBNÍK, J.1981: Nová metodika výpočtu znečištění ovzduší. In: *Lesní a vodní hospodářství – Ochrana ovzduší*, 10, 1981, s. 147-152.
- ERMAK, D.L.1977: An analytical model for air pollutant transport and deposition from a point source, *Atmos. Environ.*, 11, 1977, p. 231-237.
- SLANČO, P., HANČULÁK, J., BOBRO, M., GELDOVÁ, E. 2000a: Teoretické aspekty šírenia tuhých a plynných látok z exhalačných zdrojov. In: *Acta Montanistica Slovaca*,3, 2000 , s.313-317.
- SLANČO, P., BOBRO, M., HANČULÁK, J., GELDOVÁ, E. 2000b: Vplyv parametrov exhalačného zdroja a poveternostných podmienok na koncentráciu plynných a tuhých látok v ovzduší. In: *Acta Montanistica Slovaca*,3, 2000 , s.318-320.
- SLANČO, P., GELDOVÁ, E., HANČULÁK, J., BOBRO,M. 2001: Movement of solid particles emitted from the mineral processing and pelletizing plant Želba, inc. Nižná Slaná into the surrounding area. I: *Proc. of International Conference "New Trends in Mineral Processing IV."*, VŠB TU Ostrava, p.241-247.
- TADMOR, J., GUR, Y. 1969: Analytical expressions for vertical and lateral dispersion coefficients in atmospheric diffusions. *Atmos. Environ.* 3, 1969, p. 96-102.