

## Model proračuna prizemnih koncentracija

### A Model for Calculation of Ground Level Concentrations

NADEŽDA ŠINIK

**Sažetak:** U CMI RHMZ Hrvatske izrađen je model za proračun prizemnih koncentracija polutanata u okolišu povišenog i prizemnog izvora emisije. Model je gausovskog tipa. Ulazni parametri su satne vrijednosti brzine i smjera vjetra, stabilnosti zraka i visine sloja miješanja. Algoritam modela uključuje i slučajeve »tišina« kao i modifikaciju lateralne difuzije kod slabih vjetrova.

**Ključne riječi:** Algoritam gausovskog modela; Visina sloja miješanja; Zadimljenje; Model tišina; Slabi vjetrovi.

**Abstract:** At the CMI RHMZ of Croatia, a model has been worked out for the calculation of ground level concentrations of pollutants in the environment of the elevated and ground level emission point source. The model is of the Gaussian type. The input parameters are hourly values of wind speed and direction, air stability and mixing height. The algorithm of the model contains cases of calm winds as well as modifications of lateral diffusion with low winds.

**Key words:** Gaussian model algorithm; Mixing height; Fumigation; Calm model; Light winds.

#### 1. UVOD

Proračuni prizemnih koncentracija u okolišu nekog izvora emisije obavljaju se danas pomoću različitih modela transporta i difuzije. Oni su opisani u uvodnom dijelu ove publikacije, zbog čega u ovom prikazu navodimo samo bit njihovog računskog postupka: a) numerička integracija diferencijalnih jednadžbi difuzije, zatim b) statistički postupak rješavanja jednadžbe koja opisuje slučajne fluktuacije turbulentne brzine i konstruiranja trajektorija ogromnog broja individualnih čestica (Monte Carlo modeli) i c) analitička rješenja jednadžbi difuzije (modeli gausovskog tipa).

U ovom je prikazu opisan model, koji se upotrebljava u Centru za meteorološka istraživanja RHMZ SRH. Model je gausovskog tipa s uključenim dopunskim jednadžbama, koje omogućavaju uvođenje vremenske varijacije (dnevni hod) visine sloja miješanja (TURNER 1970, LONČAR 1981), slučajeve tišina (OKAMOTO i SHIOZAWA 1978, ŠINIK 1981) i slabih vjetrova (R.G.1.145 1979, VIDIĆ 1981) kao i pojavu tzv. »fumigation« odnosno »zadimljujuće« perjanice izbačenih plinova (R.G.1.145 1979, WANG 1977, BEYCHOK 1979).

Proširenje gausovskog modela dopunskim jednadžbama zahtijevalo je niz istraživanja, čiji su rezultati djelomično prikazani u ovom radu.

Prikaz, koji slijedi, sadrži prvo opis osnovne gausovske formule za računanje prizemnih koncentracija uz navođenje nedostataka i ograničenja, koja su inherentna tom proračunu. Detaljnije o karakteristikama gausovske jednadžbe u njenoj primjeni na procjenu transporta i difuzije čitalac može naći u mnogobrojnoj literaturi o »gausovskom modelu«, od koje je nešto navedeno i u ovom radu.

Zatim je prikazan model proračuna, kojim se mi služimo u praksi, u vidu kompletnog algoritma sa svim dopunskim jednadžbama, kojima uključujemo u proračune razne uvjete u prizemnom sloju atmosfere. Nastojalo se sustavno prikazati kompletan postupak izračunavanja. Sve jednadžbe modela su iz odgovarajuće literature, koja je navedena u tekstu, zbog čega nisu u ovom prikazu posebno obrazlagane. Nastojalo se, međutim, obrazložiti fizikalni razlog i mogućnost proširenja osnovne gausovske jednadžbe (1) dopunskim izrazima.

Sva ograničenja i nedostaci osnovne jednadžbe (1) i dalje su sadržani u proširenom modelu.

#### 2. OPCENITO

Osnovna jednadžba modela proračuna u ovom radu je gausovska jednadžba transporta i difuzije:

$$C/Q = \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_zU_H} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[ \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (1)$$

gdje je:

- $U_H$  — srednja brzina vjetra (m/s) intervala mjerenja ulaznih podataka na visini  $H$ ; os  $x$  je orijentirana u smjeru puhanja vjetra
- $C$  — prizemna koncentracija (jedinica/m<sup>3</sup>)
- $Q$  — emisija (jedinica/sec)
- $\sigma_y, \sigma_z$  — standardne devijacije razdiobe koncentracija u  $y$  (okomitom na smjer širenja) i  $z$  (vertikalnom na smjer širenja) smjeru, a funkcije su udaljenosti  $x$  od izvora emisije niz vjetar kao i stabilnosti (m)
- $H$  — visina širenja dimne perjanice (m).

Gornja jednadžba zove se »gausovska« zbog svoje sličnosti s jednadžbom normalne razdiobe vjerojatnosti. Ona se može izvesti logičkim uvođenjem odgovarajućih fizikalnih veličina u opći oblik Gaussove funkcije vjerojatnosti (BEYCHOK, 1979), a također i kao analitičko rješenje diferencijalne jednadžbe K-teorije, koja predstavlja osnovu matematičkog opisa atmosferske difuzije (BUDIANSKY 1980, VEIGLE i HEAD 1978). U izvodu su sadržane osnovne pretpostavke gausovskog modela (DISPERSION AND FORECASTING, 1972):

- stacionarno stanje tj. nema vremenskih promjena vjetru ni turbulencije,
- homogeno strujanje tj. nema prostornih promjena vjetra ni turbulencije,
- inertna, pasivna plinovita primjesa tj. nema atmosferskih kemijskih reakcija, nema gravitacionog taloženja ni ispiranja oborinskom vodom,
- perfektna refleksija dimne perjanice na podlozi (sadržana u drugo mčlanu uglate zgrade jedn. (1)), tj. nema apsorpcije u tlu,
- normalni oblik lateralne i vertikalne razdiobe plinovitih primjesa u dimnoj perjanici, što implicira interval uzorka od barem 10 minuta da se osigura izgladivanje nepravilnosti i momentalnih »šiljaka«,
- brzina vjetra  $U \neq 0$  tako da se difuzija u smjeru  $x$  može zanemariti u usporedbi s transportom dimne perjanice.

Pretpostavka homogenosti strujanja daje izvjesnu »pogodnost« gausovskoj formuli, jer omogućava da se kao ulazni podaci pored količine emisije (i ostalih tehnoloških parametara izvora emisije) upotrebljavaju meteorološki parametri (potrebni za ocjenu transporta i difuzije); samo s jednog punkta, koji karakterizira lokalitet izvora. Izlazni podaci, dakle rezultati proračuna, dobijaju se, međutim, na raznim, po volji odabranim udaljenostima od izvora emisije. Pritom se ističe da proračuni jednadžbom (1) imaju smisla nad ravnom površinom i do udaljenosti od približno 10 km (PASQUILL 1974, GIFFORD 1976). U praksi, zbog nemogućnosti primjene boljih modela proračuna, često se jedn. (1) upotrebljava za udaljenosti i do stotinu kilometara kao i u orografski

razvijenim područjima. Istovremeno, navedena je pogodnost fizikalno neopravdana, jer implicira prostornu konstantnost meteoroloških elemenata, što se u prirodi ne dešava.

U praktičnim proračunima često se pretpostavlja konstantnost emisije  $Q$ , pa se provode proračuni tzv. »faktora razređenja«  $C/Q$  (iz kojeg kasnije nije teško odrediti koncentraciju  $C$ ).

### 3. SADRŽAJ MODELA PRORAČUNA

Prizemne vrijednosti faktora razređenja  $C/Q$  određivane su našim modelom transporta i difuzije za kontinuirani točkasti izvor emisije ispod osi dimne perjanice, gdje je koncentracija najveća i to na određenim udaljenostima. Udaljenosti su odabrane tako, da mogu prezentirati slučajeve tišina i slabih vjetrova, granicu zone male naseljenosti oko izvora emisije te udaljenosti na kojima treba očekivati maksimalne prizemne koncentracije kod pojedinih stanja stabilnosti atmosfere (TURNER 1970). Model sadrži proračun veličina  $C/Q$  posebno za slučaj širenja dimne perjanice pri tlu ( $H = 0$ ) i posebno za neku odabranu visinu širenja  $H$  iznad tla.

Algoritam modela, na osnovi kojeg je izrađen i program za elektronski računar, ne sadrži određivanje nadvisivanja dimne perjanice iznad samog izvora emisije, što znači da pretpostavlja vremensku stacionarnost visine širenja. Prilikom upotrebe modela za konsekutivan niz satnih vrijednosti, nadvisivanje se ustvari mijenja iz sata u sat u ovisnosti prvenstveno o brzini vjetra. Varijabilno nadvisivanje može se uključiti u model kao ulazni podatak, a određuje se pomoću različitih poluempiričkih formula (BRIGGS 1978, BEYCHOK 1979).

Satne vrijednosti  $C/Q$  određuju se na zadanim udaljenostima unutar 16 sektora oko izvora emisije (što je povezano uz 16 glavnih smjerova vjetra).

### 4. ULAZNI PODACI

Pri upotrebi jednadžbe (1) nastoji se uskladiti osnovne mjerne intervale ulaznih i izlaznih podataka. U današnjoj se praksi najčešće koriste satni podaci, premda postoji potreba za uvođenjem kraćih vremenskih intervala s donjom granicom od 10 minuta (KORACIN 1981).

Naš je model prilagođen satnim vrijednostima ulaznih podataka (smjera i brzine vjetra, stabilnosti zračka i visine sloja miješanja). Od toga, smjer vjetra ne ulazi direktno u proračune, ali se u slučaju većeg broja podataka provodi njihovo programsko grupiranje po smjeru vjetra.

Smjer i brzina vjetra su srednje satne vrijednosti na visini širenja dimne perjanice. Smjerova ima 16. Obzirom da današnji instrumenti počinju mjerenje brzine vjetra najčešće kod  $U = 0,3 \text{ ms}^{-1}$ , manje brzine priključujemo slučajevima tišina. Ako postoje samo podaci o vjetru na 10 m visine iznad tla (anemografski podaci na klimatološkim stanicama), onda se

u model uključuje proračun najvjerojatnije satne brzine vjetera na visini  $H$ . To se obavlja pomoću logaritamskog zakona promjene brzine vjetera u prizemnom sloju atmosfere uz empirijske koeficijente za dani lokalitet izvora emisije — ili pomoću empirijski određenih karakteristika promjene brzine vjetera s visinom. Takva je relacija upotrebljena prilikom primjene našeg modela za proračun  $C/Q$  iz hipotetičnog izvora emisije kod mjesta Oborovo (25 km od Zagreba niz Savu) u radu ŠINIK i JOŠIĆ (1980).

Stabilnost zraka ( $S$ ) svrstavana je po proširenoj Pasquill-Giffordovoj klasifikaciji (TURNER 1970, R. G.1.145 1979) u 7 razreda i označavana slovima A (jako nestabilno) do G (ekstremno stabilno). U modelu je tretirana kao jednaka za prizemni i povišeni izvor emisije. Kod viših izvora emisije može biti potrebno da se ispita promjena stabilnosti s visinom iznad tla u lokalitetu izvora. Rezultati istraživanja pokazuju u takvom slučaju da li je potrebno ulazne podatke o stabilnosti razdvojiti na dva niza: za prizemni i za povišeni sloj.

Svakoj stabilnosti pripada karakteristična širina rasapa po vertikali,  $\sigma_z$ , i po horizontali,  $\sigma_y$ , kao i jednadžbe, koje definiraju njihov porast s udaljavanjem od izvora emisije. Različiti autori odredili su različite skupove krivulja  $\sigma_z(x, S)$  i  $\sigma_y(x, S)$ , gdje je  $x$  udaljenost od izvora emisije, a  $S$  je stabilnost. U ovom su radu korištene P-G krivulje (Pasquill-Giffordove) za prizemni izvor emisije (TURNER, 1970, Mc. MULLEN 1975), a Briggsve interpolacione krivulje za povišeni izvor emisije (GIFFORD, 1976). Jednadžbe krivulja dane su u PRILOGU. Veličine  $\sigma_y$  i  $\sigma_z$  kod navedenih familija krivulja definiraju rasap oko osi dimne struje tokom perioda od 3 minute. Obzirom da modelom određujemo satne vrijednosti  $C/Q$  iskoristili smo novija saznanja o vremenskoj varijabilnosti  $\sigma_y$  i  $\sigma_z$  (HANNA i dr., 1977) prema kojima 3-minutna vrijednost  $\sigma_z$  ostaje dalje kvazikonstantna, ali  $\sigma_y$  raste približno prema zakonu

$$\sigma_y(t) = \sigma_y(3 \text{ minute}) \cdot \left(\frac{t}{3}\right)^{0.2}$$

gdje je  $t$  vrijeme u minutama. Oдавde je satna vrijednost

$$\sigma_y(60) = \sigma_y(3) \cdot 1,82 \quad (3)$$

Prema tome, u model ulazimo s originalnim vrijednostima  $\sigma_z$ , prema P-G ili prema Briggsvim krivuljama, dok vrijednosti  $\sigma_y$  povećavamo faktorom 1,82.

Visina sloja miješanja,  $h$ , označava debljinu prizemnog sloja atmosfere unutar kojeg je moguća difuzija po vertikali. Budući, da gornja granica tog sloja sprečava daljnju disperziju analogno donjoj granici, tlu, uvođenje sloja miješanja u model povećava vrijednost teoretskih  $C/Q$  nakon one udaljenosti od izvora emisije, gdje je postalo

$$2,15 \sigma_z = h - H$$

(Naime, proračun difuzije modelom gausovskog tipa uzima, da je dimna struja došla do prepreke, ako je do prepreke došao onaj njen dio, čija je koncentracija 10% od koncentracije u osi, a to je udaljenost od osi  $2,15 \sigma_z$  (TURNER, 1970).

U našem modelu uključena je mogućnost uvođenja satnih visina sloja miješanja. Za sada je u praktičnim proračunima primijenjujemo samo u labilnoj i neutralnoj atmosferi, jer je za te stabilnosti izrađena metoda za njihovo određivanje (LONČAR 1981) na osnovi termički izazvanog turbulentnog miješanja.

## 5. ALGORITAM MODELA

Proračun satnih  $C/Q$  obavlja se

a) za povišeni izvor emisije uz pretpostavljenu konstantnu efektivnu visinu širenja dimne struje,  $H$

b) za prizemni izvor emisije, za koji se u modelu po pretpostavci uzima  $H = 0$ .

Jednadžbe modela razlikuju se u oba slučaja.

Ujedno, ulazni podaci definiraju fizikalno stanje atmosfere u svakom satu, zbog čega variraju i jednadžbe, koje to stanje opisuju.

### 5.1 Jednadžbe za povišeni izvor

a) Najopćenitiji oblik jednadžbe u osi dimne struje ( $y = 0$ )

$$C/Q = \frac{1}{\pi U_H \sigma_y \sigma_z} \left\{ \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right) + \sum_{m=1}^5 \left[ \exp\left(-\frac{(H+2mh)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(H-2mh)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \right\} \quad (4)$$

prikazuje prizemni ( $z = 0$ ) faktor razređenja  $C/Q$  kao funkciju transporta i difuzije uz postojanje sloja miješanja  $h$  (TURNER 1970, BEYCHOK 1979).

U odnosu na osnovnu gausovsku jednadžbu (1), u kojoj se pretpostavlja neograničeno miješanje otpadnih plinova po vertikali, jedn. (4) ograničava difuziju po vertikali članovima iza znaka sumacije. Uz  $h = \infty$  jedn. (4) prelazi u jedn. (1) za iste uslove ( $z = 0, y = 0$ ).

Visina sloja miješanja uvodi se u jednadžbe difuzije dopunskim članovima, koji označavaju refleksiju s donje i gornje granice sloja, pri čemu gustoća refleksije raste od 1 do  $\infty$  (BEYCHOK, 1979). Ti članovi pokazuju brzu konvergenciju porastom broja refleksije,  $m$ . U našem je modelu uzeto  $m = 5$ ,  $\pi = 3.14$ , a značenje ostalih simbola u jednadžbi opisano je u poglavlju 2 ( $\sigma = \sigma(x, S)$ ). Ovaj se oblik jednadžbe upotrebljava, ako je  $h$  dovoljno visok, da može doći do pojave »refleksije« gornjeg ruba dimne perjanice. U našem modelu postavili smo uvjet, da u takvom slučaju bude

$$h > H + 10 m \quad (4/1)$$

Uvjet (4/1) odabran je tako, da u slučaju neutralne ( $D$ ) stabilnosti, kao srednjoj među svim ostalim klasama, dimna perjanica kod najmanje  $h$ , koja zadovoljava (4/1), stigne do gornje granice sloja miješanja nakon udaljenosti 100 metara od izvora. U labilnijoj atmosferi to se dešava prije, a u stabilnijoj nakon 100 m udaljenosti.

Dimna perjanica širi se unutar sloja miješanja. Dok ne stigne do njegove gornje granice, a to je na udaljenostima  $x \leq x_m$ , gdje se  $x_m$  određuje iz jednadžbe

$$H + 2.15 \sigma_z(x_m, S) = h \quad (5)$$

proračun difuzije provodi se pomoću jednadžbe bez refleksije

$$C/Q = \frac{1}{\pi U_H \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (6)$$

Nakon udaljenosti  $x_m$  prizemni faktor razrjeđenja određuje se pomoću jednadžbe (4). Ilustracija ovog slučaja dana je na sl. 1.

b) Ako je sloj miješanja niži od izvora tj.  $h < H$  dimna perjanica širi se najprije u stabilnoj atmosferi ( $S = G$  ili  $F$  ili  $E$ ), a zatim kod udaljenosti

$$x = x_h$$

kod koje je

$$H - 2.15 \sigma_z(x_h, S) = h \quad (7)$$

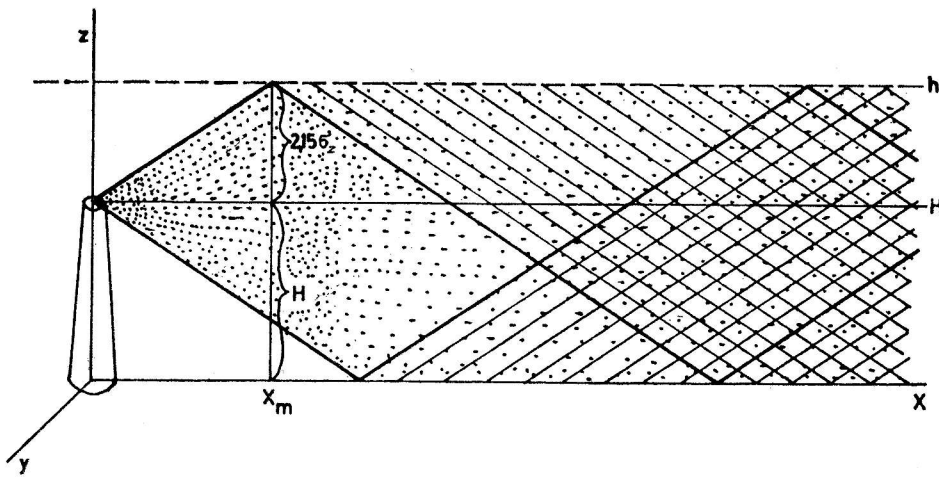
donji dio dimne perjanice prelazi u niži labilniji sloj, dok gornji nastavlja širenje u gornjem, stabilnom sloju.

Za  $x \leq x_h$  prizemni  $C/Q$  određuje se jednadžbom (6), a za  $x > x_h$  računamo jednadžbom s jednostrukom refleksijom

$$C/Q = \frac{1}{\pi U_H \sigma_y \sigma_z} \left[ \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right) + \sum_{m=1}^5 \exp\left(-\frac{(H + 2mh)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (8)$$

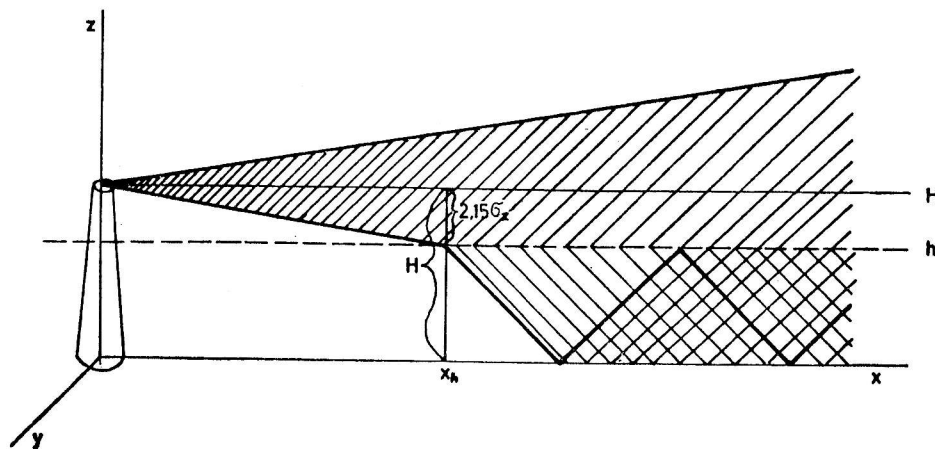
Ilustracija je dana na sl. 2.

c) Ako u danom satu nije označen sloj miješanja,  $h$ , račun prizemnih  $C/Q$  provodi se jednadžbom (6).



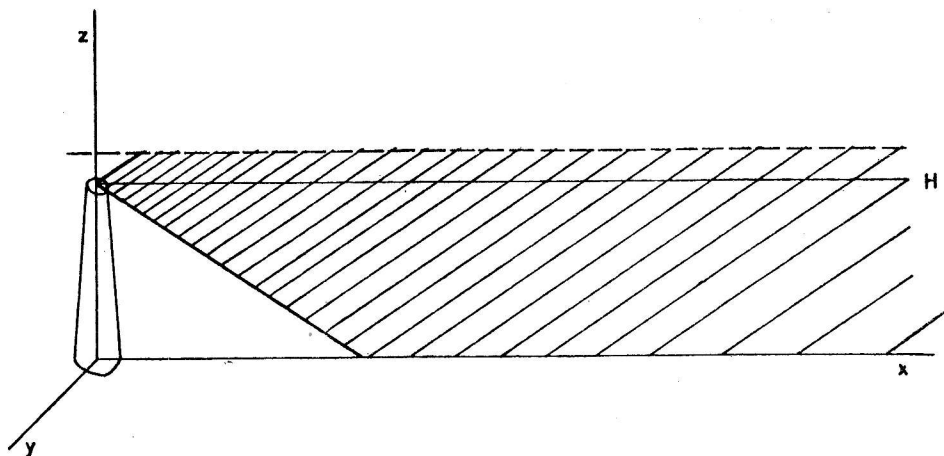
Sl. 1. Shema širenja dimne perjanice ( $h > H + 10m$ )

Fig. 1. A plume spread scheme ( $h > H + 10m$ )



Sl. 2. Shema širenja dimne perjanice ( $h < H$ )

Fig. 2. A plume spread scheme ( $h < H$ )



Sl. 3. Shema širenja dimne perjanice u slučaju zadimljenja ( $H \leq h \leq H + 10\text{m}$ )  
 Fig. 3. A plume spread scheme in the case of »fumigation« ( $H \leq h \leq H + 10\text{ m}$ )

#### d) Zadimljujuća perjanica

Poseban je slučaj »fumigation« ili »zadimljujuća« perjanica, koji se javlja kada donja granica podignute inverzije pređe veći dio dima. Za vrijeme tog procesa otpadni plinovi, koji su se u stabilnoj atmosferi gomilali na visini  $H$ , bivaju dosta naglo privučeni k tlu labiliziranjem donjeg sloja atmosfere, što rezultira u znatnom povećanju prizemnih koncentracija. Ustvari, kod povišenih izvora emisije najveće prizemne koncentracije izmjerene su upravo u »fumigation« slučajevima (WANG 1977, BEYCHOK 1979). Što se taj proces odvija bliže izvoru emisije, to je njegov efekt jači.

Slučajevi zadimljujuće perjanice uvode se u naš model kada je

$$H \leq h \leq H + 10\text{ m} \quad (9/1)$$

U takvim slučajevima modelom računamo dvojako:  
 d.1) ako je u prethodnom satu stabilnost  $S = G$  ili  $F$  račun se provodi formulom za »fumigation« (R. G. 1. 145, 1979):

$$C/Q = \frac{1}{U_H H (2\pi)^{1/2} \sigma_y(F)} \quad (9)$$

gdje je

$$\sigma_y(F) = 0,07 x (1 + 0,0001 x)^{-1/2} \quad (\text{vidi PRILOG})$$

Formula (9) izvedena je uz pretpostavku homogenog miješanja u sloju od tla do visine  $H$  (PASQUILL 1974, str. 287). Njom računamo do udaljenosti  $x_F$ , na kojoj je postalo  $C/Q$  (prema jedn. 9) jednako  $C/Q$  (prema jedn. 6 uz  $H = 0$ ). Ovaj je postupak preporučen u R. G. 1. 145 (1979). Za

$$x > x_F$$

račun se provodi formulom (6) uz  $H = 0$ . Naime, do udaljenosti  $x_F$  vrijednost  $C/Q$  izračunata formulom (6) za prizemni izvor veća je od  $C/Q$ , koja je određena formulom (9). To je u skladu s pretpostavkom

(R.G.1. 145, 1979), da povišeni izvor emisije ne može čak ni u slučaju zadimljujuće perjanice uzrokovati veća prizemna onečišćenja od prizemnog izvora.

Ilustracija »fumigation« slučaja dana je na sl. 3.

d.2) ako je u prethodnom satu stabilnost  $S = A$  ili  $B$  ili  $C$  ili  $D$  ili  $E$  račun se provodi jednadžbom (6), jer u tom slučaju nije došlo do naglog labiliziranja atmosfere.

*Napomena: premda »fumigation« u kontinentalnoj klimi traje uglavnom kraće od 1/2 sata, u ovoj studiji zbog konzervativnosti njen efekt pridijeljen je cijelom satu.*

#### e) Tišine

U satovima kada je zabilježena tišina ( $U < 0.3\text{ ms}^{-1}$ ) postoji više pristupa:

e.1) ako je tišina trajala 1 ili 2 sata (a  $S = A$  ili  $B$  ili  $C$  ili  $D$  ili  $E$ ) računamo jednadžbom (OKAMOTO i SHIOZAWA, 1978)

$$(C/Q)_c = \frac{2\gamma}{(2\pi) (\gamma^2 d^2 + \alpha^2 H^2)} \exp\left(-\frac{\gamma^2 d^2 + \alpha^2 H^2}{2\alpha^2 \gamma^2 t_p^2}\right) \quad (10)$$

gdje je:

$$t_p = 3600 \text{ sekundi (za 1 sat)}$$

$$t_p = 7200 \text{ sekundi (za 2 sata)}$$

$d$  = udaljenost, m

$H$  = visina iznad tla na kojoj počinje difuzija, m

$\alpha$  i  $\gamma$  su funkcije stabilnosti  $S$ .

Vrijednosti  $\alpha$  i  $\gamma$  dane su u (ŠINIK, 1981 — tab. 1).

e.2) ako je tišina trajala dulje od dva sata, onda u svakom slijedećem satu neprekidnog trajanja tišina računamo formulom

$$(C/Q)_c = \frac{2\gamma}{(2\pi)^{1.5} (\gamma^2 d^2 + \alpha^2 H^2)} \quad (11)$$

e.3 Ako je u satu s tišinom stabilnost  $S = F$  ili  $G$  treba odrediti vrijeme putovanja izbačenih plinova od visine  $H$  do tla pomoću brzine difuzije po vertikalni  $\gamma$ . Model proračunava prizemne  $C/Q$  tek u onom satu kada je plin stigao do tla.

Fizikalna osnova »modela tišina« obrazložena je u radovima OKAMOTO i SHIOZAWA 1978, ŠINIK 1981.

## 5.2. Jednadžbe za prizemni izvor

U slučaju prizemnog izvora upotrebljavaju se modificirane jednadžbe povišenog izvora. Osim toga, parametri difuzije  $\sigma_y$  i  $\sigma_z$  mijenjaju se sa stabilnošću  $S$  i udaljenosti  $x$  prema P-G krivuljama, te ih dalje označujemo kao  $\sigma_y(P)$  i  $\sigma_z(P)$ . Za prizemni izvor obično se upotrebljavaju podaci brzina  $U_{10}$  na visini anemografa.

Modifikacije su slijedeće:

1) Nema slučaja zadimljujuće perjanice što znači da se ne upotrebljava formula (9).

2) U satu, gdje je označena visina sloja miješanja  $h$  računamo kompleksnom formulom (4) uz  $H = 0$ , dakle

$$C/Q = \frac{1}{U [\pi\sigma_y(P)\sigma_z(P) + 100]} \left\{ 1 + \sum_{m=1}^5 \exp \left[ -2 \left( \frac{mh}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \quad (12)$$

Član »100« u (12) označava polovinu najmanjeg vertikalnog presjeka okolnih zgrada, koja po pretpostavci u ovom radu iznosi  $200 \text{ m}^2$ , a dodan je prema preporukama u R.G.1.145 (1979) da uključi u model izvjesno povećanje rasapa uslijed prisustva blizih zgrada.

3) U satu bez visine sloja miješanja računamo formulom

$$C/Q = \frac{1}{U \{ \pi\sigma_y(P)\sigma_z(P) + 100 \}} \quad (13)$$

4) Tišine obrađujemo kao kod povišenog izvora, ali uz  $H = 0$ , osim što nema ograničenja za  $S = G$  ili  $F$ . Prema tome, u prva dva sata tišinu računamo formulom:

$$(C/Q)_c = \frac{2}{(2\pi)^{1.5} \gamma d^2} \exp \left( -\frac{d^2}{2\alpha^2 t_p^2} \right) \quad (14)$$

a daljnje satove kontinuiranog trajanja tišina formulom

$$(C/Q)_c = \frac{2}{(2\pi)^{1.5} \gamma d^2} \quad (15)$$

$\alpha$  i  $\gamma$  određuju se prema tabeli 1. u (ŠINIK, 1981).

## 6. KOREKCIJA ZA MALE BRZINE

Kod malih brzina vjetra dolazi do meandriranja dimne perjanice u horizontalnoj ravnini zbog velike promjenljivosti smjera vjetra. Taj efekt djeluje u smislu povećanja lateralnog rasapa. Rezultantne prizemne koncentracije mogu biti nekoliko puta manje od proračunatih vrijednosti gausovskom jednadžbom.

Taj se efekt uvodi u model »umjetnim« povećanjem veličine  $\sigma_y$ , što vrijedi jednako za povišeni i za prizemni izvor. Modifikacija parametra horizontalne difuzije provodi se za

$$0.3 \leq U \leq 4.0 \text{ ms}^{-1}$$

tako da u formule ulazimo sa  $\sigma_y'$ , koji je

$$\sigma_y' = a_s \sigma_y \quad (16)$$

Korekturni faktor  $a_s$  uvodi se za stabilnosti  $S = G$ ,  $F$ ,  $E$  i  $D$  i jednak je

$$\begin{aligned} a_G &= 2.61 U^{-0.63} \\ a_F &= 2.10 U^{-0.54} \\ a_E &= 1.80 U^{-0.42} \\ a_D &= 1.45 U^{-0.27} \end{aligned} \quad (17)$$

U labilnijoj atmosferi ( $C$ ,  $B$  i  $A$ ) rasap prema P-G krivuljama dovoljno je velik, te se smatra da nije potrebno povećavati veličinu  $\sigma_y$ .

U gornjim je izrazima brzina vjetra  $U$  bez indeksa, da označimo da je korekcija jednaka za  $U_{10}$  i  $U_H$ . Faktor » $a$ « funkcija je brzine  $U$  i opada s njenim povećanjem.

Jednadžbe (17) izvedene su u kombinaciji R.G.1.145 (1979) i VIDIĆ (1981).

## 7. ZAKLJUČAK

Uključenjem dopunskih jednadžbi, kojima se iz sata u sat prate promjene meteoroloških parametara difuzije, model proračuna prizemnih faktora razrjeđenja u ovom radu predstavlja korak naprijed u odnosu na osnovnu jedn. (1). Međutim osnovni nedostatak gausovske jednadžbe, pretpostavka prostorne invarijabilnosti — još više dolazi do izražaja u proširenom modelu, jer se odražava i na dopunskim parametrima difuzije. To se (pored vjetra i stabilnosti) posebno odnosi na visinu sloja miješanja, koja se u prijedpodnevnim satima može tokom jednog sata promijeniti i do 300 m. Prema tome, ako dimna perjanica putuje dulje od jednog sata, trebalo bi u područjima, u koje tada dolazi, uzeti u obzir promjenu visine sloja miješanja.

Pridruživanje modela tišina algoritmu općeg modela proračuna rješava problem proračuna prizemnih koncentracija samo za vrijeme tišina. Naime, postojeći model trebalo bi proširiti matematičkim prikazom činjenice, da se plinovite primjese, nagomilane oko izvora emisije za vrijeme tišina, proširuju na veće udaljenosti, kada nakon tišina zapuhne vjetar.

Ranije spomenuta ovisnost visine širenja dimne perjanice  $H$ , o brzini vjetra  $U$ , može se uvesti u algoritam modela pomoću neke od formula, koje prikazuju

$$H = H(U).$$

Ovaj se postupak planira u daljnjem proširenju modela.

Prilikom primjene modela gausovskog tipa u orografski razvijenom području potrebna je njegova daljnja modifikacija. Visina dimne perjanice  $H$  mijenja se u tom slučaju na njenom putu zbog promjene visine podloge kao i zbog nagiba podloge. Ujedno, transport ne može ostati pravocrtan, zbog čega je potrebna i procjena putanje dimne perjanice. Ovi efekti lokalnog su karaktera te zahtijevaju specifične dopunske analize u svakom razmatranom slučaju.

PRILOG

1. Jednadžbe Briggsovih interpolacionih krivulja (GIFFORD, 1976) u uslovima otvorenog terena (preporučuju se za  $10^2 < x < 10^4$  m):

$\sigma_y, m$	$\sigma_z, m$
A $0.22 x (1 + 0.0001 x)^{-1/2}$	0.20 $x$
B $0.16 x (1 + 0.0001 x)^{-1/2}$	0.12 $x$
C $0.11 x (1 + 0.0001 x)^{-1/2}$	$0.18 x (1 + 0.0002 x)^{-1/2}$
D $0.18 x (1 + 0.0001 x)^{-1/2}$	$0.06 x (1 + 0.0015 x)^{-1/2}$
E $0.06 x (1 + 0.0001 x)^{-1/2}$	$0.03 x (1 + 0.0003 x)^{-1}$
F $0.04 x (1 + 0.0001 x)^{-1/2}$	$0.016 x (1 + 0.0003 x)^{-1}$
$G^* \sigma_y(G) = \frac{2}{3} \sigma_y(F)$	$\sigma_z(G) = \frac{3}{5} \sigma_z(F)$

\* prema R. G. 1. 145

2. Jednadžbe P-G krivulja (iz Mc MULLEN, 1975)

$$\sigma = \exp [I + J (\ln x) + K (\ln x)^2], m$$

$x =$  udaljenost, km

P-G klasa stabilnosti	za $\sigma_y$			za $\sigma_z$		
	I	J	K	I	J	K
A	5.357	0.8828	-0.0076	6.035	2.1097	0.2770
B	5.058	0.9024	-0.0096	4.694	1.0629	0.0136
C	4.651	0.9181	-0.0076	4.110	0.9201	-0.0020
D	4.230	0.9222	-0.0087	3.414	0.7371	-0.0316
E	3.922	0.9222	-0.0064	3.057	0.6794	-0.0450
F	3.533	0.9181	-0.0070	2.621	0.6564	-0.0540
G*	$\sigma_y = \frac{2}{3} \sigma_y(F)$			$\sigma_z = \frac{3}{5} \sigma_z(F)$		

\* prema R. G. 1. 145

7. LITERATURA

BEYCHOK, M. R. (1979): Fundamentals of Stack Gas Dispersion, Irvine, Col.  
 BRIGGS, G. A. (1978): Plume Rise Prediction, Workshop on Meteorology and Environment Assessment, Boston, Massachusetts, Sept. 29 Oct. 3, 1975.  
 BUDIANSKY, S. (1980): Dispersion Modeling, ES and T, Outlook, Vol. 14, No 4, str. 370-374.

DISPERSION AND FORECASTING OF AIR POLLUTION, Tech. Note No 121, (1972), WMO, Geneva  
 DRAXLER, R. R. (1980): An Improved Gaussian Model for Long — Term Average Air Concentration Estimates, Atm. Environment, Vol. 14, str. 597-601.  
 GIFFORD, F. A. (1976): Turbulent Diffusion — Typing Schemes, A. Review, Nuclear Safety 17, No 1, str. 68-86.  
 HANNA, S. R., G. A. BRIGGS, J. DEADORFF, B. A. EGAN, F. A. GIFFORD i F. PASQUILL (1977): AMS Workshop on Stability Classification Schemes and Sigma Curves — Summary of Recommendations, Bulletin AMS, Vol. 58, No 12, str. 1305-1309.  
 KORACIN, D. (1981): Utjecaj perioda osrednjavanja meteoroloških parametara na procjenu stabilnosti prizemnog sloja atmosfere, Rasprave 16, RHMZ SRH, Zagreb  
 LONČAR, E. (1981): Metoda određivanja satnih vrijednosti visine sloja miješanja, Rasprave 16, RHMZ SRH, Zagreb  
 Mc MULLEN, R. W. (1975): The Change of Concentration Standard Deviations With Distance, JAPCA, Oct.  
 OKAMOTO, S. i K. SHIOZAWA (1978): Validation of an Air Pollution Model for the Keihin Area, Atm. Environment 12, str. 2139-2149.  
 PASQUILL, F. (1974): Atmospheric Diffusion, London  
 SINIK, N. (1981): Procjena difuzije za vrijeme tišina, Rasprave 16, RHMZ SRH, Zagreb  
 SINIK, N. i D. JOŠIĆ (1980): Prosječni difuzijski potencijal okoliša NE Prevlaka, studija, izrađena u Centru za meteorološka istraživanja, RHMZ SRH, Zagreb  
 TURNER, B. (1970): Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates, EPA, Research Triangle Park  
 VEIGELE, Wm. J. i J. H. HEAD (1978): Derivation of the Gaussian Plume Model, JAPCA, Vol. 28, No 11, str. 1139-1141  
 VIDIĆ, S. (1981): Modifikacija parametra lateralne difuzije u uvjetima slabog strujanja zraka, Rasprave 16, RHMZ SRH  
 U.S.N.R.C. REGULATORY GUIDE 1.145 (1979): Atmospheric Dispersion Models for Potential Accident Consequence Assesments at Nuclear Power Plants  
 WANG, I. T. (1977): On Dispersion Modeling of Inversion Breakup Fumigation of Power Plant Plumes, Atm. Environment 11, str. 573-576.

SUMMARY

The algorithm of the Gaussian model for calculating ground level concentrations is discussed. The input data are hourly values of wind speed and direction, air stability and mixing height. The lateral diffusion is then  $\sigma_y$ , determined from the P-G curves of stability, calculated in hourly values using the equation (3). The initial Gaussian equation (1) is broadened in the algorithm of the model, with a series of supplemental equations.

Of these:

— equation (4) determines the ground level dilution factor as a function of transport and diffusion along with the existing mixing depth.

— equation (4/1) shows the condition that in our model can lead to a reflexion of the upper edge of the plume.

— after the distance  $x_m$  determined with equation (5), calculation is done with equation (4), and to  $x_m$  using equation (6).

— for mixing height  $h$  less than the height of plume spread  $H$ , the lower section of the plume reaches the mixing depth from above at a distance of  $x_h$ , which is determined using equation (7). For  $x > x_h$ , the calculation of  $C/Q$  is carried out with equation (8).

— for cases described by the expression (9/1), we use the equation for fumigation (9), in as much as in the previous hour the stability was  $S = F$  or  $S = G$ .

— cases of calm winds ( $U < 0,3 \text{ ms}^{-1}$ ) are described by the model of OKAMOTO and SHIOZAWA (1978): equation (10) up to two hours, duration of calm and (11) for longer calm persistency.

— equations for nearground emission source are (12), (13), (14) and (15). The term + 100 is introduced to them, which increases diffusion due to the presence of nearby buildings.

— the correction of the  $C/Q$  calculation at low wind speeds ( $0.3 \leq U \leq 4.0 \text{ ms}^{-1}$ ) has been introduced into the model using the equation (17).

The »conclusions« discuss the need to expand the model with the variable height of plume spread  $H$  as well as with the spatial-temporal variability of input parameters. A special modification of the model is necessary in regions more orographically developed.