

TESTIRANJE CMI MODELA TEŠKIH PLINOVA

Testing of CMI Heavy Gas Model

NADEŽDA ŠINIK

Geofizički zavod PMF, Zagreb

VESNA ĐURIČIĆ

Republički hidrometeorološki zavod SR Hrvatske, Zagreb

Primljeno 6. srpnja 1987, u konačnom obliku 9. listopada 1987.

Sažetak: Na bazi eksperimenta izvršeno je testiranje modela teških plinova, izrađenog u Centru za meteorološka istraživanja Republičkog hidrometeorološkog zavoda SRH. U uvjetima neutralne ili malo stabilne (i labilne) stratifikacije model proračunava koncentracije u prihvatljivim granicama. Kod veoma nestabilne atmosfere model potcjenjuje, dok kod ekstremno stabilne atmosfere model precjenjuje. Uzrok tome je nedovoljno precizno određena stabilnost u najnižim slojevima (prvih par metara uz tlo), gdje se teški plin (H_2S) rasprostire.

Ključne riječi: model teških plinova, stabilnost atmosfere.

Abstract: A heavy gas model constructed in Center for Meteorological Research of Hydrometeorological Institute of Croatia have been tested experimentally. During neutral or slightly stable (unstable) stratifications the model computes concentrations inside acceptable limits. It underestimates in cases of a very unstable atmosphere and overestimates during a very stable atmosphere. This fact is due to insufficiently precise stability determination in the surface layer (up to several meters) where dense gases (H_2S) spread.

Key words: heavy gas model, stability of the atmosphere.

1. UVOD

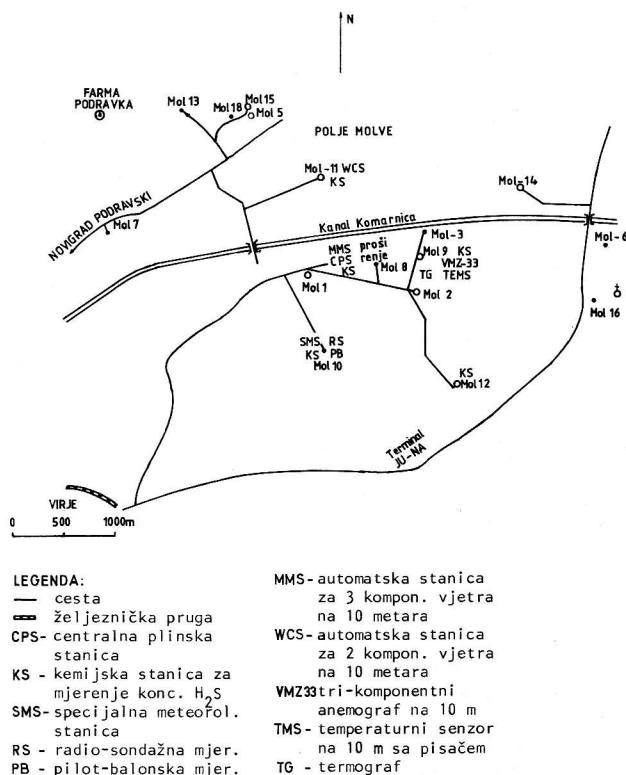
Na osnovi inozemnih iskustava (Eisdvik, 1980; Britter, 1980; Britter and Griffiths, 1982; Hanna et al. 1982) u CMI Republičkog hidrometeorološkog zavoda SRH izveden je originalni model rasprostiranja teških (gustih) plinova, primjenjiv u uslovima male hrapavosti tla (Šinik i Grčić, 1985). Model prati sve faze rasprostiranja plina iz povišenog izvora, uvažavajući »gravitacionu« brzinu u fazi teškog plina, kao i prijelaz u fazu »neutralnog« plina, kada se njegova gustoća izjednačuje s gustoćom okolne atmosfere. Njegova primjena u ravninskom dijelu sjeverne Hrvatske ukazala je na potrebu dopunskih specifičnih mjerenja meteoroloških parametara prizemnog dijela graničnog sloja atmosfere (Koračin, Vidič i Šinik, 1985).

U ovom je radu prikazan pokušaj testiranja modela. Pouzdano testiranje općenito traži velik broj mjerenih podataka (Grčić i Šinik, 1984). U ovom su slučaju relativno malen i nedovoljno adekvatan niz podataka o koncentracijama H_2S (teški plin iz pogona Molve – INA Naftaplin) i istovremeni (po kvaliteti također manjkav), niz meteoroloških podataka zahtijevali specijalan pristup i analizu. Pokazalo se da algoritam modela zadovoljava zahtjeve operativne primjene, ali uz adekvatne eksperimentalne ulazne meteorološke podatke.

2. PODACI

Testiranje modela je izvršeno na temelju podataka mjerenja u periodu 16.10. do 19.10.1984. U tom razdoblju obavljena su na lokaciji Molve intenzivna meteorološka i kemijska mjerenja. Tada je izmjereno ukupno 375 satnih uzoraka koncentracije H_2S na 5 mjernih mjesta. No zbog nemogućnosti analize svih uzoraka, odabrano je (na osnovi puhanja vjetra prema određenom monitoru) ukupno 124 uzorka, tako da je testiranje provedeno na temelju 124 uzorka sa mjernih mjesta: Molve 9 (udaljenost od dimnjaka cca 730 m u smjeru istoka), Molve 10 (udaljenost cca 920 m od dimnjaka u smjeru jug-jugozapad), Molve 11 (udaljenost cca 840 m od dimnjaka u smjeru sjever-sjeverozapad), Molve 12 (udaljenost cca 1650 m od dimnjaka u smjeru jugoistoka) i Molve CPS praktički kod izvora (na oko 50 m jugozapadno od dimnjaka). Prostorni raspored mjernih mjesta dat je na slici 1.

U toku mjernog perioda uzimani su satni uzorci koncentracije H_2S na pet mjernih mjesta, tokom 24 sata dnevno, kroz cijeli period mjerenja, a istovremeno su na jednom od tih mjernih mjesta obavljana visinska meteorološka mjerenja (vezanom sridom i pilot-balonom) a na druga tri mjesta su uspostavljena ostala specijalna meteorološka mjerenja (slika 1).



Sl. 1. Pregled mjernih mjesta kemijskih i meteoroloških mjerenja na području Molva, 16.-19.10.1984.

Fig. 1. Locations of chemical and meteorological measuring points, Molva, 16.-19. Oct. 1984.

Program instrumentarija i mjerenja je bio kako slijedi:

1. Molva 10
 - specijalna meteorološka stanica s aspiracionim psihrometrom, maksimalnim termometrom, minimalnim termometrom, termografom, higrografom, heliografom (sve na 2 m visine) ombrografom i vjetrokazom s križem na 4 osi,
 - visinska mjerenja: vezanom sondom (do 700-800 m visine) kad su prizemne brzine vjetra ≤ 6 m/s ili pilot-balonima (do 1500 m visine) kad su veće brzine prizemnog vjetra – kontinuirano svaki sat.
2. CPS Molva
 - automatska meteorološka stanica sa trokomponentnim anemografom na 10 m visine, uz zapis podataka na kazetu (uzorkovanje svake sekunde, osrednjavanje na 1 minutu).
3. Molva 9
 - trokomponentni anemograf na 10 m visine, uz zapis podataka na pisač (osrednjavanje svaku minutu).
4. Molva 11
 - trokomponentni anemograf na 10 m visine, uz zapis podataka na kazetu (uzorkovanje svaku sekundu, osrednjavanje na 1 minutu, mjerene su samo dvije komponente).

U vrijeme mjernog perioda obavljeno je 23 radiosondažnih i 58 pilot-balonskih mjerenja, i dobiveno ukupno 75-85 kontinuiranih satnih zapisa na trake i kazete.

Ova meteorološka mjerenja sa uzorkovanjem od 1 sekunde i osrednjavanjem po 1 minuti izvedena su u cilju

što boljeg upoznavanja mikroklimе promatranog lokaliteta i što boljeg definiranja procesa u donjim dijelovima graničnog sloja atmosfere koji je posebno bitan kod rasprostiranja čestica teških plinova.

3. METODA

Model za difuziju teških plinova računa koncentracije plina u osi dimne perjanice na određenoj udaljenosti od izvora, tj. dimnjaka. Jednadžbe koje čine algoritam modela sakupljene su u 5 faza: proračun nadvisivanja, proračun udaljenosti dodira oblaka sa tlom, proračun prizemne koncentracije na toj udaljenosti, proračun prizemnih koncentracija modelom »teškog plina« i proračun prizemne koncentracije modelom neutralnog plina. Jednadžbe su djelomice opisane u radovima Šinik i Grčić, 1985, Koraćin, Vidić i Šinik, 1985, a kompletan prikaz modela predmet je novog rada koji je u pripremi za štampu. Ulazni podaci u model su brzina vjetra, kategorija stabilnosti i temperatura. Za testiranje je također trebalo znati smjer vjetra, da se može odrediti na kojem mjernom mjestu se mogu očekivati koncentracije H₂S. Pošto su koncentracije plina mjerene u trajanju od jednog sata radi usporedivosti su bile potrebne i ostale veličine u srednjim satnim vrijednostima. Stabilnost zraka je određivana Pasquillovim kriterijem pomoću podataka o naoblaci, insolaciji i brzini vjetra (na 10 m visine). Tako određena satna vrijednost stabilnosti je reprezentirana za šire područje izvora i monitora.

Smjer i brzina vjetra mjereni su na visini 10 m na stupu udaljenom oko 50 m od dimnjaka što je uzeto kao podatak o vjetru na izvoru. Iz mjerenih minutnih vrijednosti smjera i brzine vjetra računati su satni srednjaci (radi usporedivosti sa mjerenim satnim koncentracijama H₂S).

Na svom putu od otvora dimnjaka do tla plin H₂S se toliko razredi da je pri tlu njegova gustoća već jednaka gustoći okolnog zraka tokom hladnijeg perioda godine, u koji spada i mjerni – test period. Zbog toga se taj plin prilikom daljnjeg širenja ponaša kao »neutralni« i njegove se prizemne koncentracije prate odgovarajućim gausovskim formulama, koje čine dio algoritma modela. Te izračunate vrijednosti prevedene su standardnom metodom povećanja lateralnog rasapa σ_y od 3-minutne na 60-minutnu vrijednost na satne, da bi ih se moglo usporediti sa mjerenim uzorcima satnih koncentracija.

Testiranje je obavljeno na dva načina:

- A) bez obzira na smjer vjetra, dakle uz uvažavanje samo satne brzine vjetra i stabilnosti,
- B) uz uvažavanje smjera vjetra na osnovi minutnih meteoroloških mjerenja.

4. ANALIZA PODATAKA

A) Ulazni podaci: – **satne vrijednosti brzine vjetra i stabilnosti atmosfere**

Test podaci: satne koncentracije H₂S izmjerene na mjernim stanicama Molva 9, 10, 11, 12 i CPS; razmatrane su koncentracije, koje su bile veće od 0.0 mg/m³ (ukupno 55 podataka o koncentracijama na svim mjernim stanicama).

Za svaku od 55 koncentracija izračunata je modelom odgovarajuća teoretska vrijednost na udaljenosti pojedine mjerne stanice. Nakon toga su izmjerene (C_M) i pripadne izračunate (C_T) koncentracije svrstane po stabilnostima i osrednjene radi konačne usporedbe. Rezultati su prikazani u tablici 1.

Tabela 1. Srednje vrijednosti izmjerenih (C_M) i izračunatih (C_T) satnih koncentracija H_2S (mg/m^3) po stabilnosnim razredima (S) – period 16-19.10.1984.Table 1. Mean values of measured (C_M) and calculated (C_T) hourly H_2S concentrations (mg/m^3) according to stability classes (S), period 16-19 Oct. 1984.

S	MOLVE 9 (24 podataka)			\bar{U} , m/s	MOLVE 11 (15 podataka)		
	\bar{C}_M	\bar{C}_T	\bar{C}_T/\bar{C}_M		\bar{C}_M	\bar{C}_T	\bar{C}_T/\bar{C}_M
A	0,0209	0,001	0,05	2,4	0,064	0,001	0,02
B	–	–	–	–	–	–	–
C	0,0139	0,042	2,2	–	0,0097	0,0034	0,35
D	0,0080	0,0120	1,5	5,4	–	–	–
E	0,0280	0,0519	1,8	4,9	–	–	–
F + G	0,0145	0,1593	11,0	1,8	0,0212	0,1932	9,1

- Molve 10: 1 podatak o $C(H_2S) \neq$ u G stabilnosti
 $C_M = 0,0073 mg/m^3$
 $C_T = 0,0511 mg/m^3$ $C_T/C_M = 7,0$
- Molve 12: sve izmjerene satne koncentracije H_2S jednake 0
- Molve CPS: 16 podataka. Model precjenjuje u svim stabilnostima za 2 reda veličine.

Statistika izmjerenih i izračunatih (teoretskih) vrijednosti pokazuje:

- pri veoma nestabilnoj stratifikaciji (A i B) atmosfere model potcjenjuje, odnosno izračunava satne prizemne koncentracije H_2S jedan do dva reda veličine manje od izmjerenih,
- pri veoma stabilnoj stratifikaciji (F i G) atmosfere model precjenjuje, odnosno izračunava satne prizemne koncentracije oko jedan red veličine veće od izmjerenih,
- u prevladavajućim slučajevima neutralne (D) te malo labilne i stabilne (C i E) stratifikacije atmosfere model računa satne koncentracije H_2S u opće prihvatljivim okvirima unutar faktora 1 do 2 (rezultantni omjer \bar{C}_T/\bar{C}_M za Molve 9 i Molve 11 je 1,46).

Osnovni razlog odstupanja između izračunatih i izmjerenih prizemnih koncentracija kod ekstremnih kategorija stabilnosti (A i B te F i G) nije u algoritmu modela nego u neodgovarajućem ulaznom podatku stabilnosti. Naime stabilnost je određivana tako da bude reprezentativna za čitav lokalitet pogona Molve, što je u svakom slučaju potreban podatak za ocjenu mikroklimatskih – lokalnih prilika. Međutim teški plinovi se rasprostiru u prvih nekoliko metara uz tlo, a za ocjenu stabilnosti kao ulaznog podatka u model, za taj najniži prizemni sloj atmosfere potrebna su dopunska specijalna mjerenja samo za taj sloj.

Podaci o veoma labilnoj atmosferi za okoliš lokaliteta ukazuju na intenzivan razvoj turbulentnih vrtloga. Blizina tla je prepreka takvom razvoju, što znači da pojava A i B labilne stratifikacije tu nije realna. Model proračunava prizemne koncentracije kao da doista postoji intenzivna disperzija, dok je ona zbog prisustva tla zapravo smanjena – te su stvarne koncentracije veće od izračunatih. S druge strane, u veoma stabilnoj F i G stratifikaciji, reprezentativnoj za cijeli okoliš, nije uvaženo naglo vertikalno smicanje smjera i brzine vjetra u prvih desetak centimetara iznad tla, koja pojačava u tom sloju razvoj mehaničke turbulencije, a to nužno povećava intenzitet rasapa plinova pri tlu u odnosu na vrijednosti koje se pripisuju stabilnosti F i G.

Prema tome, ulazni podaci stabilnosti, koji su najbliži realnom stanju u prizemnom sloju, su stabilnost C, D i E za koje model proračunava prizemne koncentracije H_2S u

očekivanim granicama točnosti. Pritom treba imati u vidu da model proračunava koncentracije ispod osi perjanice plina, gdje su one najveće, a mjerne stanice mjere sve koncentracije, dakle i one koje ne pripadaju osi, zbog čega su manje.

Ogromne i neprihvatljive razlike između teoretskih vrijednosti i mjerenih koncentracija u neposrednoj blizini dimnjaka (CPS-mjerno mjesto) ukazuju na potrebu proširenja algoritma modela izrazom za nadvisivanje plinova prilikom izbacivanja iz dimnjaka u onom slučaju kada se plin, kao što je to bilo s H_2S u eksperimentalnom test periodu ne ponaša kao »teški« nego kao »neutralni« plin. U tom se slučaju plin spušta do tla u većoj udaljenosti od izvora, pa su u neposrednom okolišu (radiusa oko 100 m) koncentracije plina male. Tokom mjernog perioda vjetar je samo jednom puhao u smjeru Molve CPS, što je u svakom slučaju nedovoljno za izvođenje numeričkih pokazatelja u spomenutoj dopuni algoritma modela.

B) Ulazni podaci: minutne vrijednosti smjera i brzine vjetra i stabilnosti zraka.

Test podaci: koncentracije H_2S izmjerene kao satni uzorci, a prevedene na dužinu intervala vremena tokom kojeg je vjetar nosio plin prema pojedinom monitoru.

Satne vrijednosti prizemnih koncentracija i njima pridružene srednje satne vrijednosti meteoroloških parametara sadrže u sebi znatne varijacije tokom sata, od čega su za testiranje modela najvažnije varijacije smjera vjetra. Naime ako se radi samo s jednim izvorom emisije plina (što je pretpostavka u ovom testiranju), onda pojedini monitor može određene koncentracije tokom pojedinog sata bilježiti samo ako je u tom satu vjetar nosio plin prema monitoru barem neko vrijeme tokom sata. (Napominjemo da se H_2S tokom mjernog perioda ponašao kao neutralan plin tako da je njegov transport ovisio isključivo o smjeru i jakosti vjetra).

Iz skupa minutnih podataka o smjeru vjetra tokom test perioda izdvojeni su svi slučajevi kada je vjetar puhao prema jednom od monitora (uvaženo je odstupanje smjera $\pm 5^\circ$, jer je u skladu sa širinom perjanice plina na udaljenosti monitora). Iz pripadnih minutnih podataka izračunata je srednja brzina vjetra i s njom se ušlo u model. S obzirom na

upotrebu P-G krivulja stabilnosti model u fazi neutralnog plina proračunava 3-minutne koncentracije. Tako proračunate (dakle teoretske) koncentracije provedene su u odgovarajući period vremena u minutama kontinuiranog puhanja vjetra prema monitoru (mjernoj stanici) za svaki pojedini slučaj odvojeno pomoću standardnog postupka

$$C(t_1) = C(t_2) \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^{0.2}, \quad (1)$$

gdje je $t_2 = 3$ minute, a t_1 trajanje (minute) puhanja vjetra prema monitoru.

Izmjerenе satne koncentracije H_2S prevedene su na koncentracije koje odgovaraju periodu od t_1 minuta drugom tehnikom. Monitor registrira plin tokom t_1 minute, ali izračunava koncentracije na bazi ukupnog volumena plina koji je prelazio preko filtera kroz cijeli sat, dakle 60 minuta. Odavde slijedi da je

$$C(t_1) = C(60) \left(\frac{60}{t_1}\right). \quad (2)$$

Ovakvim postupkom izračunate su i usporedene simultane vrijednosti izmjerenih i izračunatih koncentracija H_2S . Statistička rezultatna analiza dobivenog skupa podataka prikazana je u slijedećoj tablici.

Tabela 2. Srednje vrijednosti izmjerenih C_M i izračunatih C_T koncentracija H_2S , mg/m^3 – svedene na kontinuirano trajanje u minutama puhanja vjetra prema monitoru – period 16-19.10.1984.

Table 2. Mean values of measured (C_M) and calculated (C_T) H_2S concentrations (mg/m^3) according to continuous wind blowing (in minutes) towards the monitor.

Molve 9			
	\bar{C}_M	\bar{C}_T	\bar{C}_T/\bar{C}_M
A	0,3750	0,0100	0,03
Ukupno 33 minute transporta prema			
F+G	0,0397	0,3006	7,6
monitoru koji bilježi koncentracije.			
Molve 11			
A	0,0792	0,0013	0,02
Ukupno 95 minuta transporta prema			
F+G	0,0835	0,2329	2,8
monitoru koji bilježi koncentracije.			

Tabela 2. pokazuje da do sada navedeni zaključci o uplivu stabilnosti kao ulaznog podatka ostaju važeći. Nažalost, tokom nijedne minute puhanja vjetra prema nekom od monitora nije zabilježena stabilnost D, uz koju je poklapanje modela s izmjerenim koncentracijama najbolje.

5. ZAKLJUČAK

1. Model svojim fizikalnim postavkama i matematičkim aparatom realno procjenjuje opterećenje okoliša pogona INA-naftaplin – Molve.

Međutim prije pripreme modela za operativnu primjenu trebalo bi njegov algoritam upotpuniti jednadžbom za nadvisivanje plina prilikom izlaza iz dimnjaka za slučaj kada se plin ponaša kao neutralan. U tu je svrhu potrebno snimanje oblaka plina uz simultano mjerenje meteoroloških parametara, kako bi se odredila udaljenost na kojoj se dimna perjanica spušta do tla uz razne brzine vjetra.

2. Upotreba modela kod različitih stabilnosti ukazala je na potrebu preciznijeg određivanja stabilnosti u pravom prizemnom sloju (debljine nekoliko metara iznad tla). Model je u fazi »neutralnog« plina, koja slijedi iza faze »te-

škog« (gustog) plina, veoma osjetljiv na stabilnost kao ulazni podatak. Greška u određivanju stabilnosti najviše se očituje kod izrazito labilnih i izrazito stabilnih situacija, koje su nerealne za sloj zraka uz tlo, gdje se plin širi nakon što je stigao do tla.

3. S obzirom da je testiranje obavljeno samo za H_2S u hladnijem dijelu godine, kada je odnos njegove gustoće i gustoće okolnog zraka takav da se plin ponaša kao neutralan, nedostaje još testiranje modela u toplijem dijelu godine, kada se H_2S na početnom dijelu svog širenja ponaša kao teški plin. U svrhu tog testiranja (kao i izrade operativne verzije modela) potrebno je određivati stabilnost pomoću mjerenja turbulentnih fluksova količine gibanja i topline. Operativna verzija modela traži i kartiranje parametra »hrapavosti« okoliša.

4. S obzirom na tokstičnost plina H_2S očito je da satni uzorci ne mogu biti reprezentativni za opterećenje okoliša. Pored toga, proračunavanje koncentracija u periodima od nekoliko minuta na osnovi mjerenih satnih vrijednosti ukazalo je na mogućnost visokih koncentracija, koje bi svakako trebalo provjeriti relevantnim mjerenjima.

LITERATURA

- Britter, R. E. and R. F. Griffiths, 1982: Dense gas dispersion, E. S. P. Company.
- Britter, R. E., 1980: The ground level extension of a negatively buoyant plume in a turbulent boundary layer, *Atm. Env.* 14, 779-785.
- Eisdvick, K., 1980: A model for heavy gas dispersion in the atmosphere, *Atm. Env.*, 14, 769-777.
- Grčić, M. i N. Šinik, 1984: Kumulativne razdiobe koncentracija u verifikaciji modela difuzije, *Rasprave – Papers* 19, RHMZ SRH, Zagreb, 29-32.
- Hanna, S. R., G. A. Briggs and R. P. Hosker, 1982: Handbook on atmospheric diffusion, TIC, US Dept. of energy, 102 pp.
- Koraćin, D., S. Vidić and N. Šinik, 1985: Heavy gas dispersion experiments and modeling, NATO/CCMS Pilot study on air pollution control strategies and impact modeling, First Follow – Up – Report, NATO Committee on the Challenges of Modern Society, No. 153, 397-399.
- Šinik, N. i M. Grčić, 1985: Modeliranje rasprostiranja teških plinova, 7th International Symposium: Computer Aided Design and Computer Aided Manufacturing, Zagreb, 335-340.

SUMMARY

On the basis of a complex experiment with intense meteorological and chemical measurements performed at the gas fields at Molve (northern Croatia) on 16-19 October 1984, a heavy gas model constructed at Center for Meteorological Research of the Hydrometeorological Institute of Croatia was tested.

Model input data were wind speed, stability and temperature of the atmosphere. The test data were measured hourly concentrations of H_2S . The model have been tested for the cold period of the year. In spite of relative small number of data the testing required special access and analysis.

Testing was conducted in two ways: a) consideration of only hourly wind speed and stability and b) consideration of wind direction as well, on the basis of close meteorological measuring. Both ways gave the same results.

In cases of neutral or slightly stable (and unstable) stratifications, the model computes concentrations inside acceptable limits. It underestimates in cases of a very unstable atmosphere and overestimates during a very stable atmosphere. This fact is due to insufficiently precise stability determination in the surface layer (up to several meters) where dense gases (H_2S) spread.