

PRIBLIŽNO DOLOČANJE VIŠINE NIZKIH IN SREDNJE VISOKIH DIMNIKOV V SLOVENIJI

A ROUGH ESTIMATION OF THE HEIGHT OF SMALL AND MIDDLE HIGH STACKS IN SLOVENIA

551.510.42:551.511.6

JOŽE RAKOVEC, ZDRAVKO PETKOVŠEK  
Katedra za meteorologijo FNT, Ljubljana

#### SUMMARY

The problem of rough estimation of the sufficient height of stacks for power up to 40 MW, regarding emission of sulphur dioxide is studied. On the average, the plume rises in valleys and basins are small because of frequent occurrence of stable stratification and temperature inversions. Therefore, the most suitable equation here is the one proposed by Holland and Stümke. This equation, combined with Bosannquet and Pearson's equation for dispersion of plumes, gives, at prescribed maximal concentration of SO<sub>2</sub> at the ground, the dependence of stack height on emission intensity of SO<sub>2</sub> leaving the stack. The obtained stack height is corrected with regard to the height of surrounding.

The equation for stack heights is analysed according to the change of parameters included. In this way an estimation of the mistakes, which could be a consequence of selected values of emission and weather parameters, is obtained. By that, as well, the possibility is given for correction in the case when some parameters have different values from the ones chosen. It is proved that the result is considerably influenced by sulphur content in fuel and wind velocity, while changes of other parameters can hardly affect the results.

Finally, the qualitative estimation of influences of background pollution, relief, and specific climatic conditions and special demands for air quality on stack height, is given.

#### POVZETEK

Obravnavana je problematika približnega določevanja potrebne gradbene višine dimnikov glede na emisijo SO<sub>2</sub> za standardna kurišča z močjo do ca. 40 MW. Za vire v dolinah in kotlinah, kjer so dimni dvigi zaradi pogostnega pojavljanja stabilne stratifikacije in temperaturnih inverzij v poprečju dokaj nizki, je najprimernejša enačba za določevanje dimnega dviga enačba Hollanda-Stümkeja. Povezava te enačbe z Bosannquet-Pearsonovo enačbo za disperzijo dimnih plinov, daje, ob predpisani največji dovoljeni koncentraciji SO<sub>2</sub> pri tleh in postavljenih emisijskih parametrih, odvisnost gradbene višine dimnika od masnega toka SO<sub>2</sub> iz dimnika. Dobljena gradbena višina je še popravljena z upoštevanjem poprečne višine okolice.

## UVOD

Onesnaženje zraka je pri nas resen problem, čeprav stopnja industrializacije še ni tako visoka kot v nekaterih razvitejših predelih sveta. Kljub temu pa vsebnost maj, žvepovega dioksida in drugih polutantov pri nas v zraku pri tleh ponekod preneha vrednosti, ki jih namerijo v velikih industrijskih centrih. Vzrok za to je predvsem v razgibanosti reliefa Slovenije in v klimatskih razmerah. Glavni viri onesnaženja ležijo prav v kotlinah in dolinah, to je na krajih, kjer so, zaradi pogostnih temperaturnih inverzij, pogoji za naravno čiščenje zraka še posebej neugodni. Poleg vremenskih in klimatskih vzrokov je še cela vrsta drugih, ki vplivajo na tako visoke koncentracije  $\text{SO}_2$  in drugih plinov in saj v zraku slovenskih mest in industrijskih središč. To so na primer slaba tehnologija, slaba goriva in neustrezna kurišča, neustrezne višine dimnikov in podobno. Pozornost posvetimo tu prav višinam dimnikov. Cene čistilnih naprav za  $\text{SO}_2$  skupaj z obratovalnimi stroški namreč nekajkrat presegajo ceno zelo visokih dimnikov. Zato bomo marsikje še vedno zmanjševali onesnaženost zraka pri tleh z visokimi dimniki.

Naloga dimnika je - poleg tega, da zagotavlja dober vlek v kurišču - tudi ta, da dimne pline dvigne dovolj visoko od tal. Dvignil naj bi jih tako visoko, da po normalni disperziji v zraku nobena od snovi, ki so v dimu, ne bi povzročila pri tleh (ali v mestih v višini stavb) škodljivo visokih koncentracij.

Ker je relief bistven dejavnik, je predvsem za velike vire onesnaževanja (z močjo nad 40 MW) potrebna povsem individualna obravnava za vsak primer posebej. Ta bi bila sicer zaželena tudi pri majhnih virih, toda teh je veliko in potrebno je ugotoviti osnovne splošne zakonitosti in določiti osnovne smernice za gradnjo številnih dimnikov v Sloveniji.

## ZAHTEVE IN PREDPOSTAVKE

Dogaja se, da predvidijo nekateri projektanti ob izdelavi idejnega projekta za kako novo kotlarno celo nekajkrat prenizek dimnik, ker izhajajo le iz potreb vleka. Res je, takrat navadno še niso poznani vsi potrebni parametri za točnejšo določitev potrebne višine tudi glede na zahteve po kvaliteti zraka. Navadno so znane le potrebe po energiji in vrsta goriva. Zato se natančne potrebne višine ne da ugotoviti, toda možna je vsaj orientacijska ocena.

V tej razpravi želimo določiti osnove za oceno potrebne višine dimnika kot funkcijo jakosti vira onesnaževanja, in sicer pri neki, vnaprej predpisani največji dopustni koncentraciji  $\text{SO}_2$  pri tleh, in to za vire z močjo do 40 MW ali z emisijo do  $400 \text{ kg SO}_2 \text{ h}^{-1}$ . Pri tem se opremo na predlog zakona o varstvu zraka, ki predvideva največjo dopustno dnevno koncentracijo  $0.3 \text{ mg SO}_2 \text{ m}^{-3}$  (miligram SO<sub>2</sub> na normni kubični meter zraka).

Enačbe, ki se uporabljajo za določevanje potrebne višine dimnikov, veljajo za razmere nad ravnino brez nehomogenosti, torej za idealiziran primer. Atmos-

ferske pogoje upoštevajo le v grobem, kar pomeni, da s takimi metodami lahko dobimo le oceno potrebne višine, ki jo je treba vsekakor še popraviti glede na lokalne klimatske, reliefne in druge pogoje.

Kritično onesnaženje nastopa pri nas ob mirnem, stabilnem vremenu, zato bomo izbrali za izhodišče značilno stanje (standardne pogoje), ko imamo šibak veter, katerega hitrost naj z višino narašča po logaritemskem profilu. Na višini 50 m od tal naj bo hitrost vetra  $2 \text{ m s}^{-1}$ . Izbiro logaritemskega profila opravičimo s tem, da želimo obravnavati atmosfero s srednje močno stabilnostjo; za tako atmosfero pa tudi drugi profili ne dajo bistveno drugačnega poteka hitrosti z višino /1/. Stabilnost atmosfere karakteriziramo z vertikalnim gradientom potencialne temperature  $\partial\theta/\partial z$  ter z Bosanquet-Pearsonovima /2/ parametroma turbulencije  $p$  in  $q$ . Vzamemo, da je  $\partial\theta/\partial z = 0.012 \text{ K m}^{-1}$  in razmerje  $p/q = 0.60$ . Pri metodi, ki jo bomo uporabili, so: poprečna hitrost vetra  $u$ , parametra  $\partial\theta/\partial z$  in  $p/q$  ter temperatura zraka  $T$  edini vremenski parametri, kar pa seveda zadošča le za približen rezultat, saj je širjenje onesnaženja v kotlinah in dolinah precej zapleten proces /3,4/.

Za disperzijo dimnih plinov privzamemo, da je taka, kot jo opisujeta Bosanquet in Pearson /2/. Pri tej daje največjo koncentracijo pri tleh enačba:

$$c_{\max} = 4M p/q (2H)^{-1/2} e^{-2u^{-1}H^{-2}} \quad (1)$$

kjer je (poleg znanih količin)  $M$  masni tok snovi-polutanta,  $e$  Neperjevo število in  $H$  efektivna višina vira onesnaževanja, to je tista višina, ki jo doseže dim, ko se dvigne iz dimnika. Ta je torej vsota gradbene višine dimnika ( $H_{gr}$ ) in dimnega dviga zaradi vztrajnosti in vzgona ( $H$ ):

$$H = H_{gr} + \Delta H \quad (2)$$

Ker smo določili pogoje, ki opisujejo stanje atmosfere, odloča, pri danih postavkah, o največjih koncentracijah pri tleh le še masni tok polutanta in seveda efektivna višina dimnika. Ob predpisani  $c_{\max}$  nam torej enačba (1) pomeni zvezo med efektivno višino dimnika in masnim tokom, enačba (2) pa, če poznamo dimni dvig, skupaj z (1), zvezo med gradbeno višino dimnika in količino v časovni enoti emitiranega polutanta. Zato moramo torej določiti še kakšen je dimni dvig v odvisnosti od masnega toka polutanta.

## ENAČBE ZA DIMNI DVIG

V literaturi je mogoče najti čez trideset enačb za dimni dvig in približno dve na leto se pojavita na novo /5/. Že to kaže, da je problem, ki ga opisujejo, zelo zamotan. Različne enačbe dajejo namreč precej različne dimne dvige, saj se ti lahko razlikujejo tudi za faktor deset in več /5/. Vzrok za to je predvsem ta, da večina enačb sicer upošteva osnovna vzroka za dvig dima, to sta vztrajnost in vzgon, toda na različne načine in z različnimi, ponavadi eksperimentalno določenimi koeficienti.

Nove enačbe pri taki množici obstoječih gotovo ni treba sestavljati, treba pa je najti najprimernejšo. Ker je upravičenost uporabe enačb za dimni dvig v neravnem terenu, kjer so razmere vse prej kot homogene, dodaten problem, je izbira enačbe za dimni dvig problematična. Zato se vnaprej ne odločimo za eno od enačb, temveč bomo računali po različnih enačbah in se šele po pregledu poskusnih rezultatov odločili za tisto, za katero bomo menili, da najbolj ustreza našim pogojem in spoznanjem.

Dimne dvige računamo po enačbah: Holland-Stümke /6/, po drugi verziji Stümkejeve enačbe /7/, po enačbi Berljanda /8/ ter po enačbah ASME in CONCAWE /9/. Enačbe navajamo nekoliko predelane. Premeri dimnikov ob vrhu so kaj različni, izstopne hitrosti pa so za manjše vire dokaj enotne, zato v enačbah povsod nadomestimo premer dimnika  $d$  po zvezi:

$$R = \sqrt{d^2 w T_0} / 4T \quad (3)$$

z izstopno hitrostjo  $w$  in normiranim (273 K in 1 atm) volumskim tokom iz dimnika  $R$ .  $T$  je temperatura izstopajočih plinov,  $T_0 = 273$  K. Poleg tega opremimo koeficiente s potrebnimi enotami kgms sistema. V enačbah nastopajo poleg že naštetih količin še: toplotni tok iz dimnika  $Q$ , poprečna hitrost vetra gradient potencialne temperature  $\partial\theta/\partial z$  ter gravitacijski pospešek  $g$ .

Holland-Stümke

$$\Delta H = \left[ k_1 (RwT)^{1/2} + k_2 R(T-T') \right] u^{-1} \quad (4)$$

$$k_1 = 0.293 \text{ K}^{-1/2}$$

$$k_2 = 0.038 \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

Stümke II

$$\Delta H = \left[ k_3 (RwT)^{1/2} + k_4 (R/w)^{3/4} (T-T')^{1/4} \right] u^{-1} \quad (5)$$

$$k_3 = 0.102 \text{ K}^{-1/2}$$

$$k_4 = 1.160 \text{ m}^{-1/2} \text{ K}^{-3/4}$$

Berljand

$$\Delta H = \left[ k_5 (RwT)^{1/2} + k_6 (RwT)^{1/2} (T-T') \right] u^{-1} \quad (6)$$

$$k_5 = 0.128 \text{ K}^{-1/2}$$

$$k_6 = 0.830 \text{ ms}^{-2} \text{ K}^{-1/2}$$

ASME

$$\Delta H = k_7 (QT' / gu \partial\theta/\partial z)^{1/3} \quad (7)$$

$$k_7 = 0.042 \text{ m}^{2/3} \text{ kg}^{-1/3}$$

CONCAWE

$$\Delta H = k_8 Q^{1/2} u^{-3/4} \quad (8)$$

$$k_8 = 0.085 \text{ m}^{3/4} \text{ kg}^{-1/2} \text{ s}^{-5/4}$$

EMISIJSKI PARAMETRI

Količin, ki nastopajo v enačbah (3) do (8), je precej. Osnovna spremenljivka, ki jo želimo imeti, je masni tok polutanta - v našem primeru  $\text{SO}_2$  - iz dimnika ( $M$ ), ostale pa moramo z  $M$  povezati ali pa jih določiti kako drugače. Na podlagi podatkov Bringfelta /10/ ter ob upoštevanju normativov za konstrukcije dimnikov /11/ in iz vseh drugih razpoložljivih podatkov in mnenj, smo se odločili po vrsti križnih preverjanj za naslednje vrednosti parametrov:  $w = 10 \text{ ms}^{-1}$ ,  $T = 490 \text{ K}$  in  $T' = 280 \text{ K}$ . Ti emisijski parametri nam karakterizirajo zamišljene pogoje in nekakšen "standardni" tip dimnika. Vrednosti hitrosti vetra  $u$  in gradienta potencialne temperature  $\partial\theta/\partial z$  smo že opredelili, tako da nam v enačbah (4) do (6) ostane spremenljiv le volumski tok  $R$ , v enačbah (7) in (8) pa toplotni tok  $Q$  iz dimnika. Ti dve količini pa lahko povežemo z masnim tokom  $\text{SO}_2$  iz dimnika.

Vzemimo za primer, premog z 2.5% gorljivega žvepla in da daje 1 kg premoga  $5 \text{ m}_n^3$  dimnih plinov. Tedaj je masni tok:

$$\text{za premog } M = 1.00 \cdot 10^{-2} \text{ kgSO}_2 \text{ m}_n^{-3} \text{ R} \quad (9)$$

Za mazut vzemimo, da ima 4% gorljivega žvepla in da daje  $13 \text{ m}_n^3$  dimnih plinov na kilogram. Masni tok je:

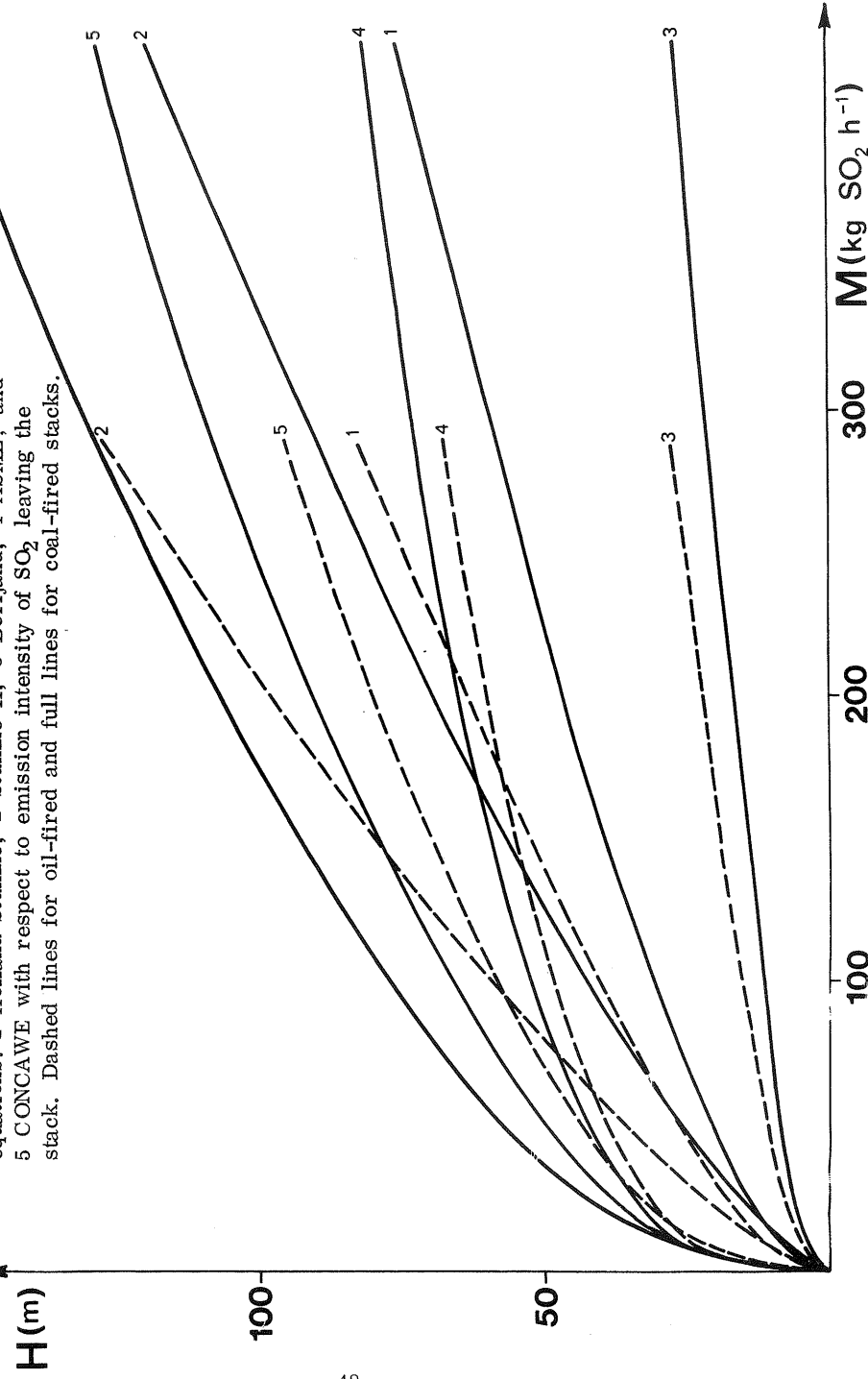
$$\text{za mazut } M = 6.15 \cdot 10^{-3} \text{ kgSO}_2 \text{ m}_n^{-3} \text{ R} \quad (10)$$

Toplotni tok iz dimnika povežemo z masnim tokom polutanta prek neizkoriščene toplote (upoštevajoč neenak izkoristek za premog in mazut) in dobimo:

$$\text{za premog } M = 1.65 \cdot 10^{-8} \text{ kgSO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^2 \text{ Q} \quad (11)$$

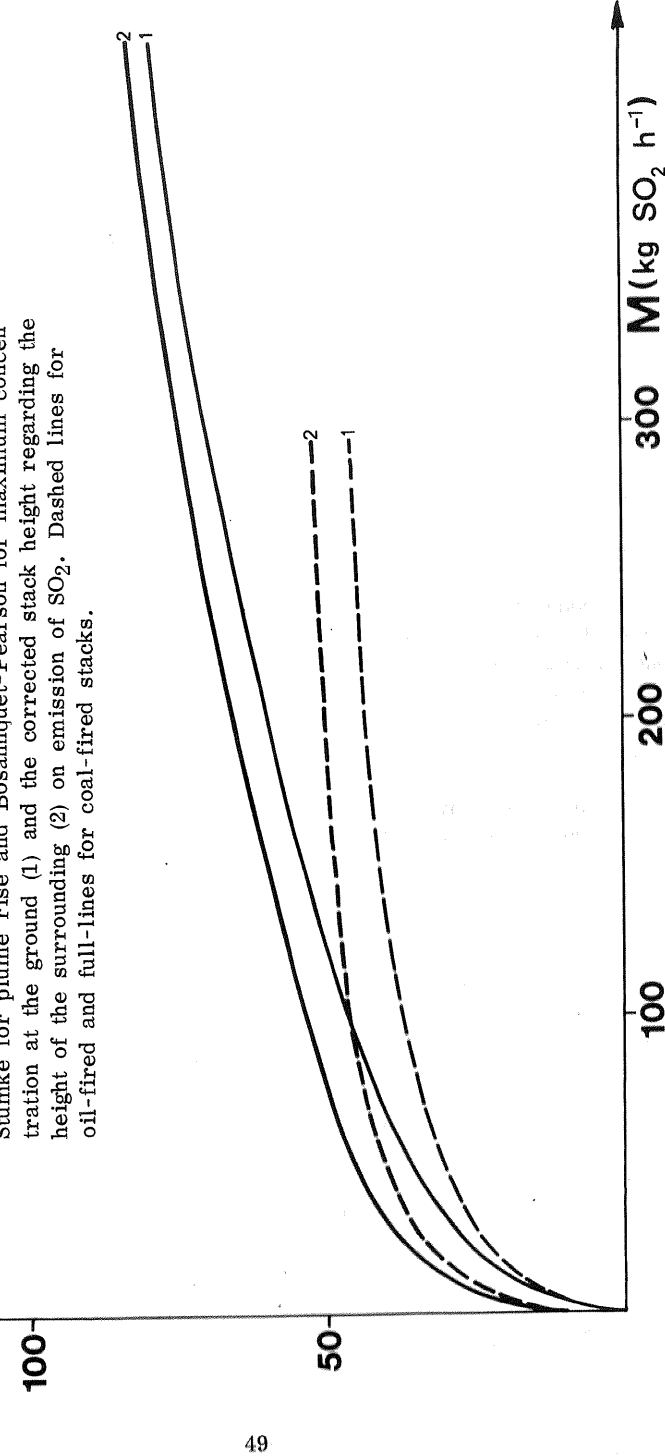
Potrebna efektivna višina dimnika (O) in dimni dvigi po enačbah:  
 1 Holland-Stümke, 2 Stümke II, 3 Berljang, 4 ASME in 5 CONCAWE  
 v odvisnosti od masnega toka  $\text{SO}_2$  iz dimnika. Črtkane krivulje velja-  
 jo za kurjenje z mazutom, polno izvlečene pa za kurjenje s premogom.

Fig. 1 Required effective stack height (O) and plume rises according to the  
 equations: 1 Holland-Stümke, 2 Stümke II, 3 Berljang, 4 ASME, and  
 5 CONCAWE with respect to emission intensity of  $\text{SO}_2$  leaving the  
 stack. Dashed lines for oil-fired and full lines for coal-fired stacks.



Gradbena višina dimnika pri kombinaciji enačb Holland-Stümke za dim-  
 ni dvig in Bosanquet-Pearson za največjo koncentracijo pri tleh (1)  
 in glede na višino okolice popravljena gradbena višina (2) v odvisnosti  
 od masnega toka  $\text{SO}_2$  iz dimnika. Črtkano - mazut, polno izvlečeno -  
 premog.

Fig. 2 Dependence of stack height for combination of equations Holland-  
 Stümke for plume rise and Bosanquet-Pearson for maximum concen-  
 tration at the ground (1) and the corrected stack height regarding the  
 height of the surrounding (2) on emission of  $\text{SO}_2$ . Dashed lines for  
 oil-fired and full-lines for coal-fired stacks.



$$\text{za mazut } M = 2.00 \cdot 10^{-8} \text{ kgSO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^2 \text{ Q} \quad (12)$$

Ko smo v enačbah za dimni dvig tako določili emisijske parametre, lahko izračunamo dimne dvige po zvezah (4) do (8) v odvisnosti od masnega toka M. Ob predpisani največji koncentraciji SO<sub>2</sub> pri tleh, lahko z uporabo enačb (1) in (2) približno določimo tudi potrebno gradbeno višino dimnikov v odvisnosti od masnega toka za navedene standardne pogoje.

#### POSTAVITEV OSNOVNE ENAČBE

Gradbena višina dimnika se kaže kot razlika med potrebno efektivno višino in dimnim dvigom iz dimnika. Dimne dvige po navedenih enačbah smo izračunali v odvisnosti od masnega toka polutanta in dobili rezultate, kot jih kaže slika 1.

Vidimo, da dobimo po različnih enačbah zelo različne dimne dvige; za faktor štiri se razlikujeta npr. tista po enačbah Stümke II in Berljanda in za faktor pet tista po enačbah CONCAWE in Berljanda. Če primerjamo dimne dvige s po enačbi (1) izračunano potrebno efektivno višino dimnika, vidimo, da bi glede na nekatere enačbe dobili dokaj nizke dimnike; sama vztrajnost in vzgon bi dim dvignila dovolj visoko. Tak rezultat za naše razmere seveda ne ustreza, medtem ko so vrednosti krivulj po enačbah Holland-Stümke in Berljanda precej v skladu z našimi opazovanji in spoznanji. V naših krajih, kjer so pogoji za širjenje onesnaženja slabi, so namreč v poprečju dimni dvigi dokaj nizki. Ker kaže, da je enačba Berljanda delana in primerna predvsem za velike vire enačba Holland-Stümke pa za manjše /8,12/, si podrobneje oglejmo rezultate po enačbi Holland-Stümke.

Gradbene višine, to so razlike med potrebno efektivno višino po enačbi (1) in dimnim dvigom po enačbi Holland-Stümke (4), so v odvisnosti od masnega toka SO<sub>2</sub> iz dimnika narisane na sliki 2. Popravili smo jih še v skladu z napotki za varstvo urbanizirane ali z gozdom porasle okolice vira /13/. Pri tem smo privzeli, da je del okolice pozidan ali porasel z gozdom s poprečno višino 10 m.

Menimo, da bi enačbo Holland-Stümke lahko pri nas uporabljali za oceno potrebne gradbene višine dimnikov in to za ne prevelike vire onesnaževanja (z močjo do 40 MW). Tudi Gilbert nam v svojem članku /6/ daje potrditev tega mnenja, saj pravi, da je enačba Holland-Stümke uporabna za hitrosti vetra od 2 do 4 ms<sup>-1</sup> in za največjo dopustno koncentracijo pri tleh c<sub>max</sub> = 0.35 mgSO<sub>2</sub>m<sup>-3</sup> zraka; to je približno za take pogoje, kot jih obravnavamo v skladu s poprečji za Slovenijo. Tudi izkušnje Hidrometeorološkega zavoda SRS /12/ kažejo, da enačba Holland-Stümke za manjše emisije najbolj ustreza. Za dimni dvig izberemo torej to enačbo, ki nam v kombinaciji z enačbo (1) da približno gradbeno višino dimnika

$$H_{gr} = (4M p/q)^{1/2} (2)^{-1/4} e^{-1} (u_{c_{max}})^{-1/2} - \left[ k_1 (\varepsilon MwT)^{1/2} + k_2 \varepsilon M(T-T') \right] u^{-1} \quad (13)$$

kjer je  $\varepsilon = R/M$ .

Enačba (13) naj služi kot osnova za oceno gradbenih višin dimnikov v Sloveniji za standardne vire z jakostjo do 400 kgSO<sub>2</sub>h<sup>-1</sup> ali moči do 40 MW. V tej enačbi nastopa poleg znanih vrednosti oziroma konstant ter poleg osnovne spremenljivke M še šest parametrov. Ugotoviti pa je koristno koliko lahko vrednosti teh parametrov odstopajo od izbranih in koliko ta odstopanja vplivajo na gradbeno višino dimnika, kdaj torej smemo vzeti kar njihove standardne vrednosti, kdaj pa moramo vplive njihovih sprememb upoštevati.

#### ANALIZA GLEDE NA SPREMEMBE PARAMETROV

Enačbo (13) analizirajmo glede na možne spremembe parametrov, ki v njej nastopajo: u, T', p/q, T, w in  $\varepsilon$ . Pri dosedanji obravnavi se je, spreminjala le hitrost vetra z višino, medtem ko so bili drugi parametri konstantni. Sedaj pa jih variramo.

##### 1. Odvisnost od hitrosti vetra

Enačbo (13) zapišemo v obliki:

$$H_{gr} = a_1 u^{-1/2} - b_1 u^{-1} \quad (14)$$

$$a_1 = (4Mp/q)^{1/2} (2)^{-1/4} e^{-1} c_{max}^{-1/2}$$

$$b_1 = k_1 (\varepsilon MwT)^{1/2} + k_2 \varepsilon M(T-T')$$

in jo prevedemo v brezdimenzijsko obliko:

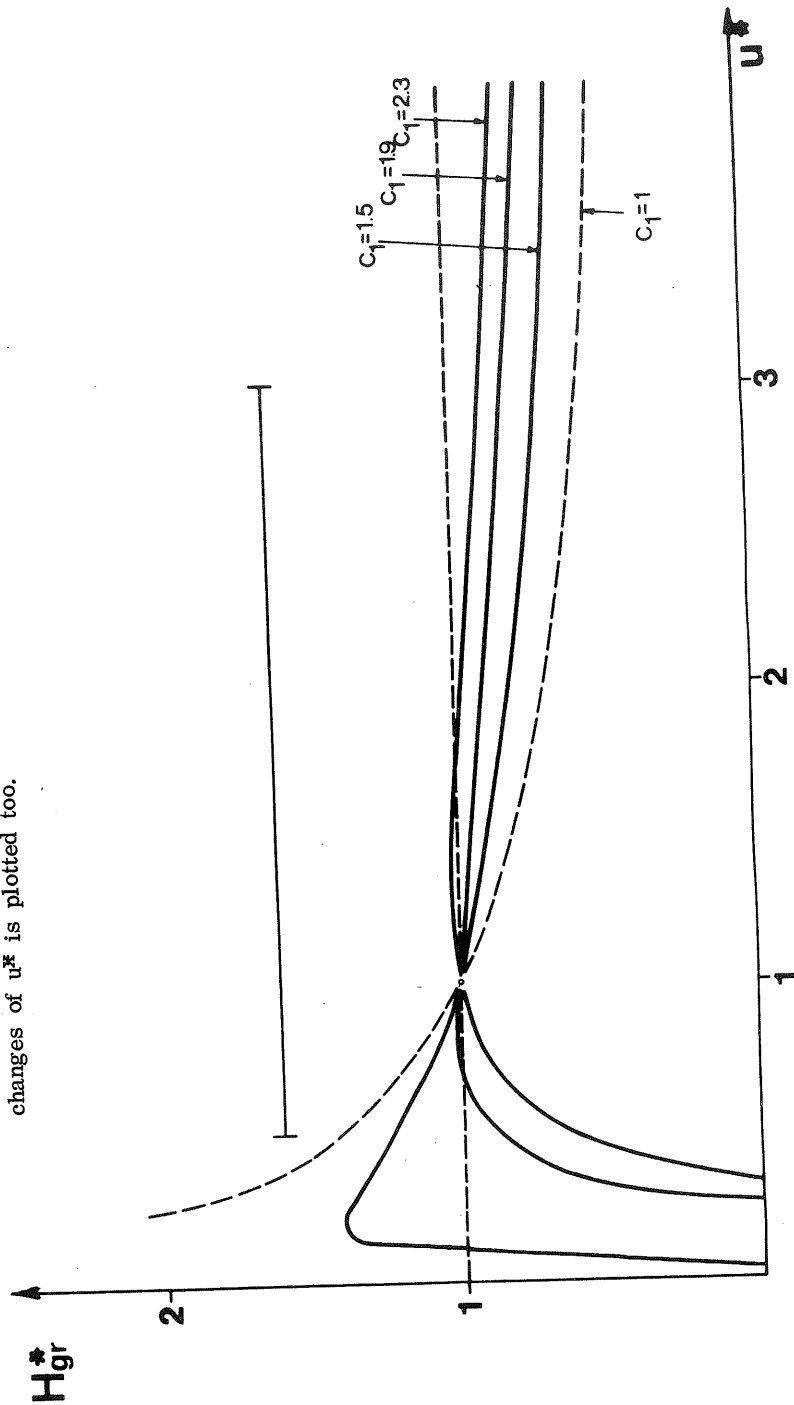
$$H_{gr}^* = c_1 u^{*1/2} + (1-c_1) u^{*1} \quad (15)$$

$$c_1 = \left[ 1 - b_1 a_1^{-1} u^{0-1/2} \right]^{-1}$$

kjer je  $H_{gr}^* = H_{gr}/H_{gr}^0$  in  $u^* = u/u^0$ . Količini, označeni z ničlo, veljata za računske s standardnimi vrednostmi, opisanimi v prejšnjih poglavjih. Ker predstavlja izraz  $b_1 a_1^{-1} u^{0-1/2}$  razmerje med dimnim dvigom in potrebno efektivno višino in je torej pozitiven in manjši od 1, je tudi c<sub>1</sub> vedno večji od 1. Primeri, ki jih obravnavamo, so v območju normalnih razmer in so vrednosti c<sub>1</sub> med 1.5 za manjše in 2.3 za večje vire.

Slika 3 Odvisnost brezdimenzijske gradbene višine dimnika od brezdimenzijske hitrosti vetra ob njegovem vrhu za nekatere vrednosti koeficienta  $c_1$ . Označeno je tudi območje možnih sprememb  $u^*$ .

Fig. 3 Dependence of the normalised stack height on normalised wind velocity at stack top for some values of coefficient  $c_1$ . The range of probable changes of  $u^*$  is plotted too.



Slika 3 kaže odvisnost brezdimenzijske gradbene višine dimnika od brezdimenzijske hitrosti vetra za nekatere vrednosti koeficienta  $c_1$ ; narisana je tudi asimptotična, fiktivna krivulja za vrednost  $c_1=1$ . Krivulje imajo zlasti pri nizkih hitrostih vetra zelo različen potek, zato je smiselno le območje desno od vrednosti  $u^* = 0.5$ , posebno ker to pomeni že zelo šibko gibanje zraka. Pri šibkejšem vetru bi moral biti dimnik za majhne vire višji od standardnega, pri močnejšem ( $u^* > 1$ ) pa bi bil lahko v glavnem nekoliko nižji.

Vidimo, da je vpliv hitrosti vetra v enačbi (13) na gradbeno višino precej močan. Ker pa se veter dejansko ves čas spreminja, kritični pogoji glede onesnaženja pa nastopajo pri njegovih nizkih vrednostih, a ker zrak v naravi nikoli ne miruje, so izbrane standardne vrednosti za  $u$  za večino nižinskih področij Slovenije reprezentativne, sicer pa dobra osnova za nakazane korekcije.

## 2. Odvisnost od temperature zraka

Enačbo (13) lahko napišemo tudi v obliki:

$$H_{gr} = a_2 - b_2 T' \quad (16)$$

$$a_2 = a_1 u^{-1/2} \left[ -k_1 (\epsilon M w T)^{1/2} + k_2 \epsilon M T \right] u^{-1}$$

$$b_2 = -k_2 \epsilon M u^{-1}$$

kjer je  $T'$  temperatura zraka. Po deljenju enačbe (16) s  $H_{gr}^0$  dobimo brezdimenzijsko obliko te enačbe:

$$H_{gr}^* = c_2 + (1 - c_2) T'^* \quad (17)$$

$$c_2 = \left[ 1 - b_2 T'^0 a_2^{-1} \right]^{-1}$$

Vrednost  $c_2$  za območje standardnih vrednosti so med 0.9 za manjše in 1.7 za večje vire, kar pomeni, da je odvisnost gradbene višine dimnika od temperature zraka majhna, kajti brezdimenzijska temperatura zraka se spreminja za manj kot 10%,  $H_{gr}^*$  pa zato največ za 6% (slika 4).

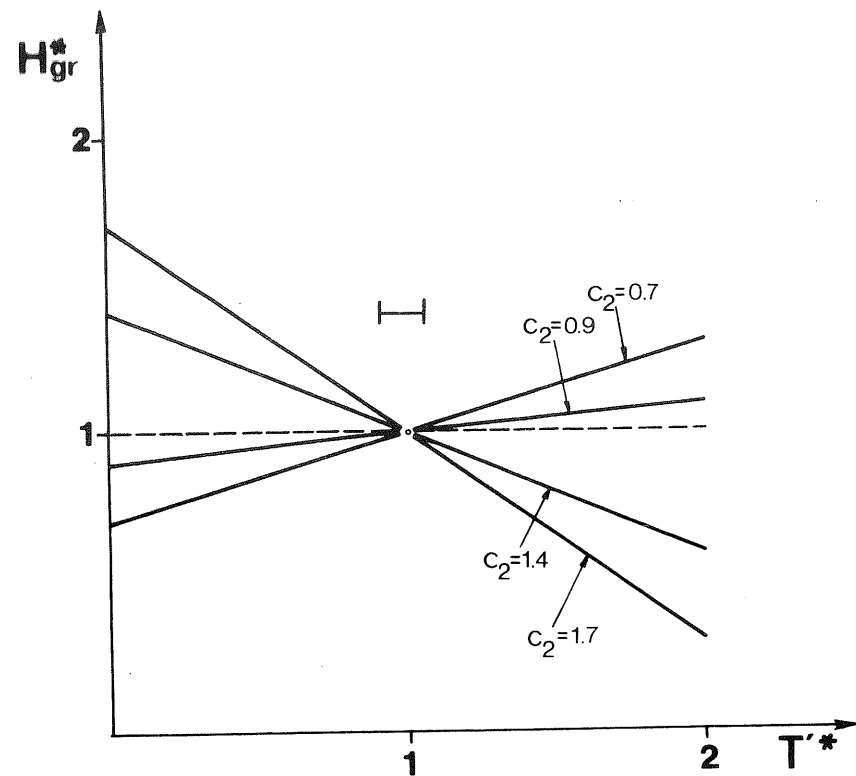
## 3. Odvisnost od parametrov turbulence

Oglejmo si nadalje odvisnost enačbe za gradbeno višino dimnika od parametrov turbulence ali od kvocienta  $p/q$ . Po podobni poti kot prej pridemo do enačbe:

$$H_{gr}^* = c_3 (p/q)^*^{1/2} + (1 - c_3) \quad (18)$$

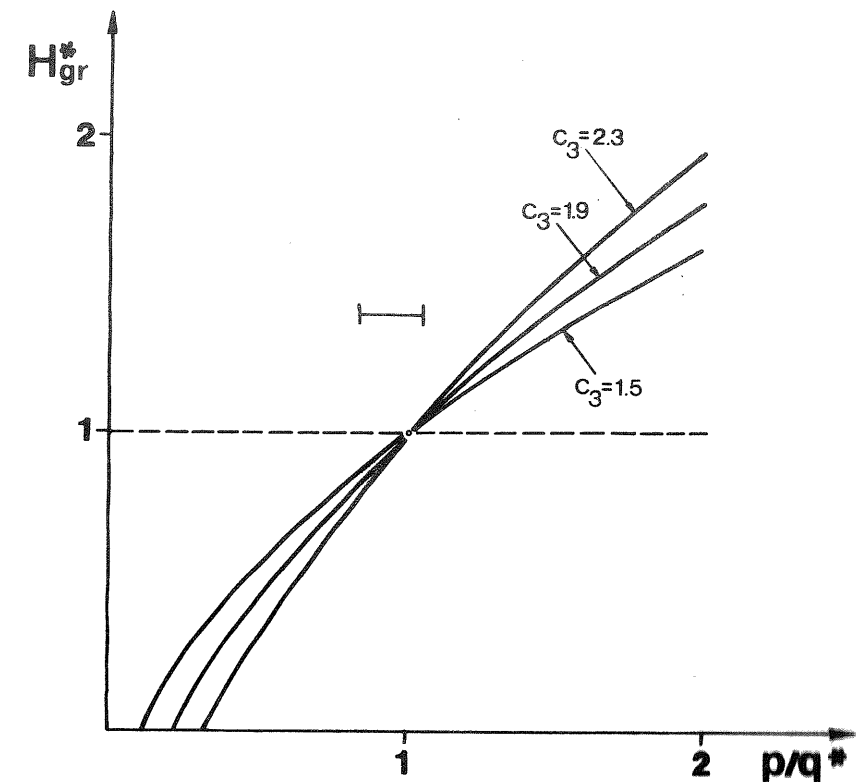
$$c_3 = \left[ 1 - b_3 a_3^{-1} (p/q)^0^{-1/2} \right]^{-1}$$

kjer sta  $a_3 = a_1(up/q)^{-1/2}$  in  $b_3 = b_1u^{-1}$ . Za standardne vrednosti ima koeficient  $c_3$  vrednosti med 1.5 za majhne in 2.3 za velike vire.



Slika 4 Odvisnost brezdimenzijske gradbene višine dimnika od brezdimenzijske temperature okolnega zraka za nekatere vrednosti koeficienta  $c_2$ . Označeno je tudi območje možnih sprememb  $T'^*$ .

Fig. 4 Dependence of the normalised stack height on normalised air temperature for some values of coefficient  $c_2$ . The range of probable changes of  $T'^*$  is plotted too.



Slika 5 Odvisnost brezdimenzijske gradbene višine dimnika od brezdimenzijskega parametra turbulence za nekatere vrednosti koeficienta  $c_3$ . Značeno je tudi območje možnih sprememb  $p/q^*$ .

Fig. 5 Dependence of the normalised stack height on normalised turbulence parameter for some values of coefficient  $c_3$ . The range of probable changes of  $p/q^*$  is plotted too.

Slika 5 kaže, kako se spreminja  $H_{gr}^*$  s  $p/q^*$ . Ker je  $p/q$  med 0.60 pri šibki turbulenci in 0.63 pri močni /2/, se nam  $p/q^*$  spreminja le v označenem območju. Iz slike 5 torej lahko vidimo, da lahko največje možne spremembe koeficienta  $p/q$  povzročijo popravko  $H_{gr}$  navzdol za 12% in navzgor za največ 5%.

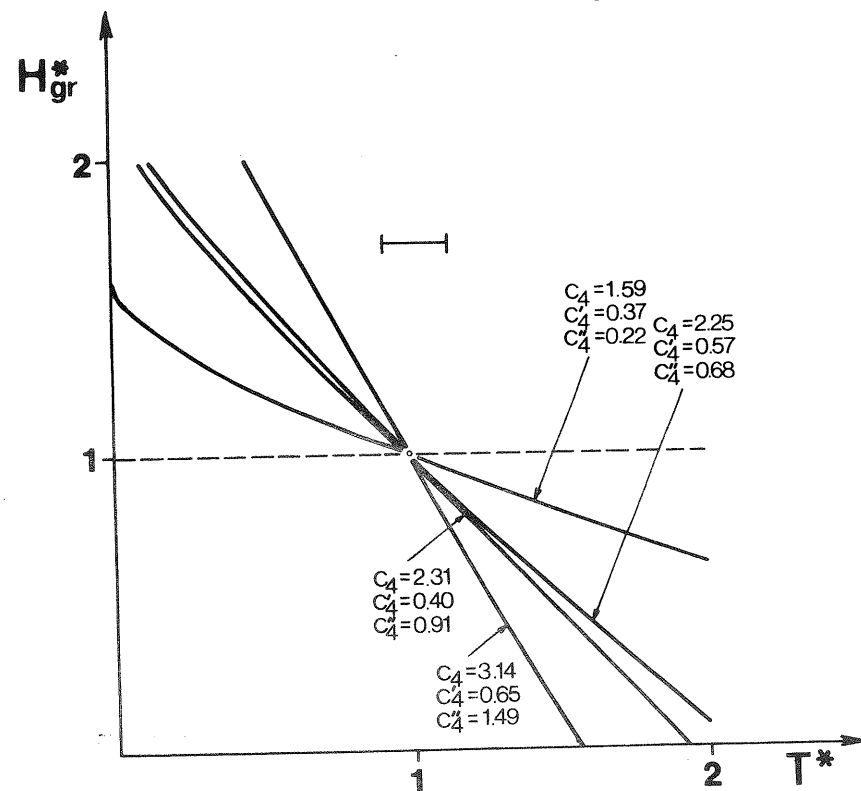
4. Odvisnost od temperature dimnih plinov  
Analogno kot prej, dobimo enačbo:

$$H_{gr}^* = c_4 - c_4' T^{*1/2} - c_4'' T^{*x} \quad (19)$$

$$c_4 = \left[ a_1 u^{-1/2} + k_2 \xi M T' u^{-1} \right] H_{gr}^0 - 1$$

$$c_4' = k_1 (\xi M w T^0)^{1/2} u^{-1} H_{gr}^0 - 1$$

$$c_4'' = k_2 \xi M T^0 u^{-1} H_{gr}^0 - 1$$



Slika 6 Odvisnost brezdimenzijske gradbene višine dimnika od brezdimenzijske temperature dimnih plinov za nekatere vrednosti koeficientov  $c_4$ ,  $c_4'$ ,  $c_4''$ . Večji  $c_4$  pomeni močnejši vir. Označeno je tudi območje možnih sprememb  $T^*$ .

Fig. 6 Dependence of the normalised stack height on normalised temperature of plume for some values of coefficients  $c_4$ ,  $c_4'$  and  $c_4''$ . Greater value of  $c_4$  means stronger source. The range of probable changes of  $T^*$  is plotted too.

Na sliki 6 vidimo potek odvisnosti obeh normiranih količin za nekatere vrednosti koeficientov. Večji koeficient  $c_4$  pomeni močnejši vir. Vrisano je tudi območje možnih sprememb temperature dimnih plinov. Če upoštevamo, da so pri močnejših virih te temperature verjetno nižje, pri šibkejših pa višje od tistih, ki smo jih izbrali kot standardne, potem iz slike 6 vidimo, da se gradbena višina dimnika spreminja zaradi vpliva sprememb temperature izstopnih plinov za okrog 15%.

5. Odvisnost od izstopne hitrosti

Izstopna hitrost  $w$  je parameter, ki v enačbi za potrebno gradbeno višino dimnika nastopa na dva načina: eksplicitno ter implicitno v  $M$ . Večja izstopna hitrost pomeni namreč (pri nespremenjenih drugih parametrih) večji masni tok polutanta iz dimnika. Ta implicitna odvisnost je prikazana torej že na sliki iz dimnika. Ta implicitna odvisnost je prikazana torej že na sliki 2. Kakšna pa je sprememba gradbene višine dimnika, če bi se spremenila le izstopna hitrost, vsi preostali parametri, vključno z masnim tokom pa bi ostali nespremenjeni (npr. ob manjšem premeru dimnika ob vrhu). Za to spremembo dobimo brezdimenzijsko enačbo:

$$H_{gr}^* = c_5 + (1 - c_5) w^{*1/2} \quad (20)$$

$$c_5 = \left[ 1 - b_5 w^0 \right] a_5^{-1}$$

kjer sta  $a_5 = a_1 u^{-1/2} - k_2 \xi M (T - T') u^{-1}$  in  $b_5 = k_1 (\xi M T^0)^{1/2} u^{-1}$ . Vrednosti  $c_5$  so za obravnavane primere okrog 1.03, torej je odvisnost od izstopne hitrosti plinov zanemarljivo majhna.

6. Odvisnost od emisijske koncentracije

Parameter je obratna vrednost tako imenovane emisijske koncentracije;  $1/\xi$  nam torej pove, koliko polutanta je v enoti volumna izstopajočih dimnih plinov. Ustrezna brezdimenzijska enačba za odvisnost gradbene višine dimnika od parametra je:

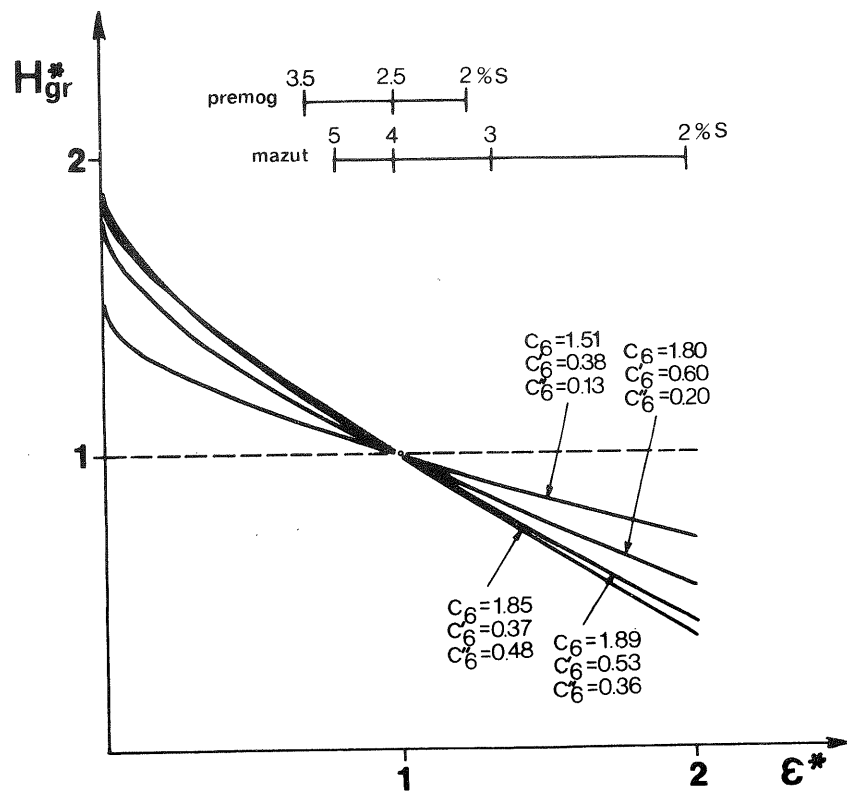
$$H_{gr}^* = c_6 - c_6' \xi^{*1/2} - c_6'' \xi^{*x} \quad (21)$$

$$c_6 = a_1 u^{-1/2} H_{gr}^0 - 1$$

$$c_6' = k_1 (M w T^0)^{1/2} u^{-1} H_{gr}^0 - 1$$

$$c_6'' = k_2 M (T - T') \xi^0 u^{-1} H_{gr}^0 - 1$$





Slika 7 Odvisnost brezdimenzijske gradbene višine dimnika od brezdimenzijskega parametra  $\xi^*$  za nekatere vrednosti koeficientov  $c_6, c_6'$  in  $c_6''$ . Večji  $c_6$  pomeni močnejši vir. Podana je tudi skala za  $\xi^*$  v odvisnosti od vsebnosti žvepla v gorivih.

Fig. 7 Dependence of normalised stack height on normalised parameter  $\xi^*$  for some values of coefficients  $c_6, c_6'$  and  $c_6''$ . Greater value of  $c_6$  means stronger stack. The scales for  $\xi^*$  in dependence of sulphur content in fuels are plotted too.

Iz slike 7, ki kaže potek  $H_{gr}^*$  ( $\xi^*$ ) za nekatere vrednosti koeficientov (večji koeficient  $c_6$  pomeni večji vir), vidimo, da je  $H_{gr}^*$  močno odvisna od  $\xi^*$ . To ni nič novega; kurjenje s čistejšim gorivom dopušča pri uporabi metodiki seveda nižje dimnike. Toda tudi pri gorivu čisto brez žvepla bi ne mogli shajati povsem brez dimnika zaradi drugih primesi v dimnih plinih (saje,  $CO_2, H_2O$  ipd.)

V pogojih, ki so blizu standardnim, lahko torej privzamemo, da so nastopajoče količine približno take, kot pri našem standardnem dimniku in je verjetna napaka pri oceni višine dimnika pod 10%. Gradbena višina pa je, poleg kvalitete goriva, močno občutljiva na različne hitrosti vetra, zato je za kraje, kjer so hitrosti vetrov različne od tu privzetih, vsekakor potrebno to posebej upoštevati v skladu z enačbo (15) in sliko 3.

Tako je torej mogoče dobiti prvo približno vrednost gradbene višine dimnika iz krivulj na sliki 2. Če poznamo vse potrebne parametre konkretnega dimnika, pa lahko uporabimo enačbo (13). Dokler pa vsi parametri v njej niso poznani, nam zgornja analiza njihovih vplivov omogoča oceno njih samih, pa tudi napak, ki smo jih morda napravili. To pa ne pomeni, da smo problem končno rešili.

#### DODATNI VPLIVI

Višina dimnika je bila obravnavana z vidika primerne kvalitete zraka pri tleh za standardne, toda glede nekaterih vplivov idealizirane pogoje. Pri tem, kakšne bodo koncentracije onesnaženja pri tleh ali na področju vpliva dimnika, kjer živijo ljudje in rastejo rastline, pa močno vpliva vrsta doslej še nezajetih dejavnikov, ki so lahko zelo pomembni in zahtevajo, da je višina dimnika višja. Med te štejemo npr. že obstoječe onesnaženje na področju, reliefne razmere področja, klimatske razmere in posebne okoliščine. Te dejavnike bomo obravnavali predvsem kvalitativno, ker so večinoma specifični in premalo raziskani, da bi njihov vpliv lahko obče podali v obliki enačbe ali grafikona.

Obstoječe onesnaženje, zlasti v mestih in če to onesnaženje že presega dovoljne meje, lahko povzroči zahtevo po mnogo višjem dimniku ali pa postavi rešitev problema na drugačne osnove, ki so izven domene tega dela.

Reliefne razmere so bile v dosedanjih postavkah idealizirane v ravnino. Če naj bi stal dimnik v ozki dolini ali blizu pobočij, ki so morda celo naseljena, je treba to seveda posebej upoštevati. V nekaterih primerih bi lahko gradbeno višino le korigirali npr. v skladu z ugotovitvami Berljanda /14/, ki glede na to predlaga popravke za faktor 1.2 do 1.5. Včasih pa so reliefni pogoji tako specifični, da je zlasti pri velikih virih potrebno določiti "ničelno višino" terena širše okolice, kot je bilo to storjeno za TE Trbovlje II /15/.

Posebni so pogoji v kotlinah, v katerih se pojavljajo pogosto jezera hladnega zraka z izrazitimi temperaturnimi inverzijami, ki delujejo kot močne zaporne plasti. Tu celo nekaj deset metrov višji dimnik ne pomeni bistvenega izboljšanja, vse dokler ni tako visok, da odvaja dimne pline iz kotlinskega jezera hladnega zraka. Za to pa bi moral biti v večini naših kotlin visok nad 120 m. To pa je večinoma smiselno le tedaj, če je v njem združena dovolj velika emisija (več porabnikov).

Dodatne popravke za višji dimnik lahko terjajo posebne okoliščine kot je npr. bližina rekreacijskih objektov, bolnic, šol ipd. Na področjih, ki so izrazito turistična, pa je navadno spet treba poseči po drugačnih rešitvah za zmanjšanje onesnaženja zraka.

Vidimo, da je obravnavana problematika zelo kompleksna, vendar pa menimo, da je za manjše in srednje vire ob sliki 2 in analizah za popravke ter z upoštevanjem vsega povedanega, možno razmeroma preprosto oceniti približno potrebno višino nekega dimnika pri nas že na podlagi osnovnih podatkov.

## ZAHVALA

Avtorja sva dolžna zahvalo Bogdanu Babšku, dipl.ing. iz inženirskega biroja Elektroprojekt za nekatere koristne podatke o emisijskih parametrih in izkoristkih kotlov za proizvodnjo pare.

## LITERATURA

- / 1/ Rakovec J.: Vertikalni profili vetra v prizemni turbulentni plasti. Razprave-Papers DMS XIV, Ljubljana 1972.
- / 2/ Air Pollution Handbook, ed. by P. L. Magill, F. R. Holden and C. Ackley, pogl. 5. McGraw-Hill, New York 1956.
- / 3/ Petkovšek Z. in sod.: Širjenje onesnaženja zraka v kotlinah - I. faza. Poročilo za Sklad Borisa Kidriča SBK 784/269-72, Ljubljana 1973.
- / 4/ Petkovšek Z.: Širjenje onesnaženja v kotlinah. Zaštita atmosfere, leto 2, št. 3., Sarajevo 1974.
- / 5/ Briggs G. A.: Plume Rise. U.S. Atomic Energy Commission, Office of Inform. Services, Oak Ridge, Tenn. 1969.
- / 6/ Gilbert T.: Probleme bei der Berechnung von Schornsteinhöhen in Internationaler Sicht. Proceedings of the Third Int. Clean Air Congress Düsseldorf. VDI-Verlag GmbH, Dusseldorf 1973.
- / 7/ Brummage K. G.: The Calculation of Atm. Dispersion from a Stack. Round Table on Plume Rise and Atm. Dispersion. Atm. Env. Vol. 2, No. 3, 1968.
- / 8/ Berljand M. E. in sod.: O rasčete zagrzaznenija atmosfery vybrosami iz dymovyh trub elektrostacij. Trudy glavnoj geofiz. obs. imeni A. J. Voejkova, vypusk 158. Gidrometeoizdat, Leningrad 1964.
- / 9/ Trampf W.: Formeln zur Berechnung der Schornsteinüberhöhung speziell für Grossemittenten und für kalte Quellen. Inst. für theor. Met. der Freien Univ. Berlin, Berlin 1973.
- /10/ Bringfelt B.: Plume rise measurement at industrial chimneys. Atm. Env. Vol. 2, No. 6, 1968.
- /11/ Schiedel Handbuch. Herausgeber und Radaktion: Schiedel Kaminwerke, St. Veit a. d. Glan, 1974.
- /12/ Paradiž B.: Vrednost enačb za določanje efektivnih višin dimnikov pri kritičnih vremenskih razmerah. Zbornik radova I. Jug. Kongresa HIPT, III. knjiga, Beograd 1971.
- /13/ Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft; Gemeinsames Ministerialblatt, 25. Jahrgang, Nr. 24, Bundesministerium des Innern, Bonn 1974.
- /14/ Berljand M. E.: Atmospheric diffusion investigations in the U.S.S.R., Appendix to: Dispersion and forecasting of air pollution. WMO-No. 319. WMO, Geneva 1972.
- /15/ Dokumentacija za sanacijo Termoelektrarne Trbovlje za zmanjšanje koncentracij SO<sub>2</sub> v Zasavju. Tehn. poročilo. Hidrometeorološki zavod SR Slovenije, Ljubljana 1974.