

UDK 532.529.5

Oblikovanje profila masne koncentracije trdnih delcev v turbulentnem toku dvofaznega fluida v kanalu

ROMAN POVŠE

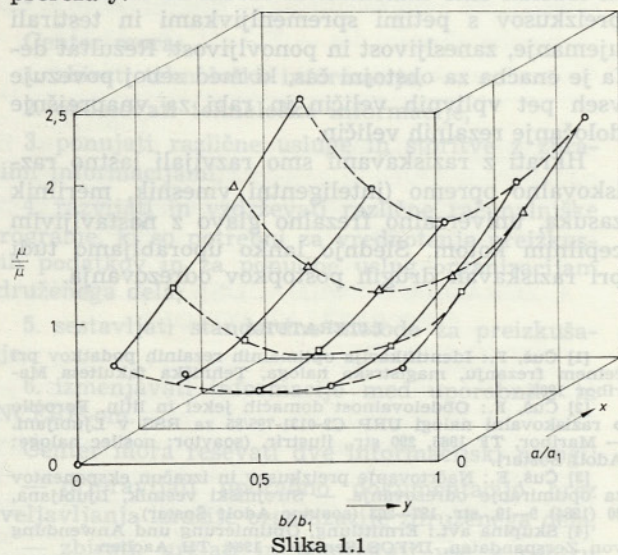
1. UVOD

Dvofazni tokovi trdnih delcev, razpršenih v toku nosilnega fluida, so sestavni del mnogih tehničnih procesov, kakršni so npr. pnevmatični transport trdnih delcev, izločanje trdnih delcev v suhih in mokrih filtrih, emisija trdnih delcev v okolje ipd.

K transportnim lastnostim takih tokov, ki jih raziskujejo raziskovalci in raziskovalne institucije v zadnjih 25 letih, sodi oblikovanje profilov masne koncentracije v pretočnih kanalih med zanimivejše probleme. Te probleme sta raziskovali dve skupini raziskovalcev: prvi poročajo o eksperimentalnih, pretežno laboratorijskih raziskavah [1, 2, 3, 4, 5], drugi pa raziskujejo empirične in polempirične modele oblikovanja profilov masne koncentracije, ki so le v posameznih primerih testirani z eksperimenti [6, 7, 8].

Rešitve teh problemov imajo svojo praktično-uporabno vrednost pri izdelavi strojev in naprav za energetiko in procesno tehniko. Mehanizem oblikovanja takega profila oz. polja masne koncentracije trdnih delcev v kanalu je tema te razprave.

Meritve na industrijskem objektu — pravokotnem prerezu kanala za dimne pline kotla DO ljubljanske toplotarne — so pokazale izrazito nesimetrično polje masnih koncentracij (sl. 1.1.). Zato je problem razdeljen v dva ločena dela: mehanizem oblikovanja profila v smeri prereza x in v smeri prereza y .



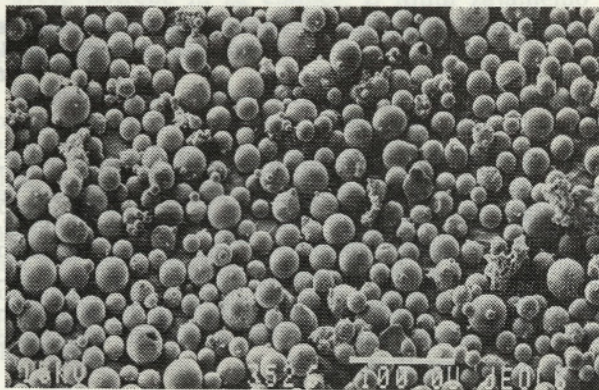
Slika 1.1

Preden je bilo mogoče izdelati ustrezen model oblikovanja takega profila pri pretoku dvofaznega toka skozi kanal, je bilo treba najprej raziskati dinamične značilnosti obeh faz v izbranem primeru dvofaznega toka delcev pepela, razpršenih v nosilnih dimnih plinih. Obe fazi sta produkt zgorevanja,

v našem primeru v kurišču parnega kotla ljubljanske toplotarne.

Med najpomembnejše dinamične lastnosti fluida sodi, poleg gostote ρ in viskoznosti ν , porazdelitev hitrosti v prerezu kanala. Le-ta je odvisna predvsem od Reynoldsovega brezdimenzijskega števila. Izračun te vrednosti za dejanske razmere pokaže, da smo v našem primeru globoko v turbulentnem področju ($Re > 10^6$).

Dinamične lastnosti trdne faze delcev definira, poleg gostote, oblika delcev. Na sliki 1.2. je mikroskopski posnetek delcev pepela rjavega premoga. Izrazita kroglasta oblika delcev pepela omogoča izdelavo preprostega dinamičnega modela, ker so lastnosti krogle v zadostni meri raziskane.



Slika 1.2

Dvofazni tok, ki smo ga raziskovali, je polidisperzen, kroglasti delci so različnih premerov $0,1 < d_d < 500 \mu\text{m}$. Granulacijska analiza delcev pepela pokaže, da ima kolektiv delcev izrazito nesimetrično gostoto porazdelitve. Statistično lahko tako porazdelitev opišemo s porazdelitveno funkcijo po Rosin-Rammler-Bennetu

$$F(d) = 1 - e^{-(d_d/d_d')^n} \quad (1.1.)$$

kjer je

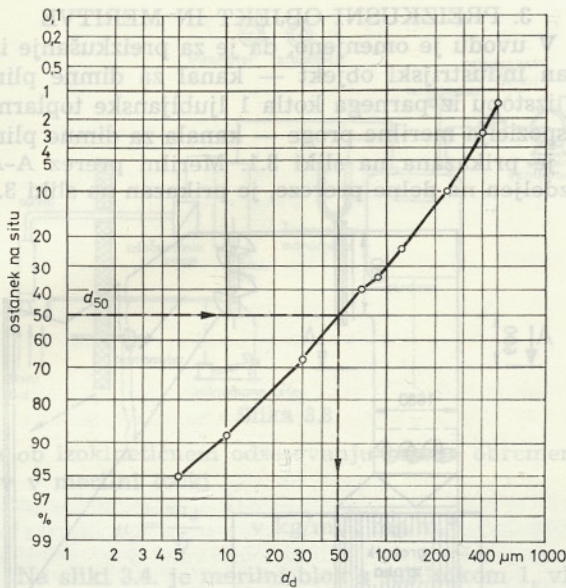
$$F(d_d') = 0,632$$

n = parameter statične porazdelitve.

Taka porazdelitev je posledica procesa mletja v mlinu za premog s prebiralnikom, ki vrača grobe delce premoga v ponovno mletje. Delci pepela so zgorevalni ostanki zmletih delcev premoga in imajo podobno porazdelitev.

Slika 1.3. prikazuje rezultate granulacijske analize vzorca pepela velenjskega lignita. Vidimo, da rezultati meritve granulacije dajejo približno premico (v diagramu z enojno in dvojno logaritemsko mrežo), ki jo da modelna porazdelitev.

Medsebojna razmerja obeh faz prikazuje prostorninska oz. masna obremenitev $\mu = \dot{m}/\dot{V}$.



Slika 1.3

2. IZBIRA MODELA

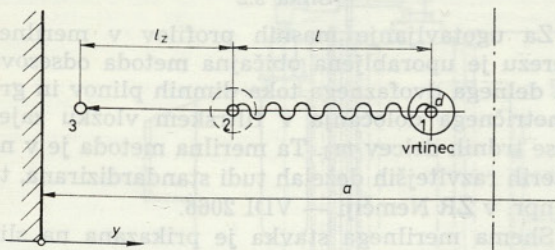
Zaradi velike razlike v gostoti obeh faz ($\rho_d/\rho > 10^3$) je izbran dvofluidni model, ki upošteva medsebojne vplive gibanja fluida in gibanja delcev. Če predpostavimo, da dispergirani delci ne vplivajo na fluid in eden na drugega (gibanje v grozdu), lahko model poenostavimo na gibanje posameznega delca.

Na gibanje delca v turbulentnem toku vplivajo, poleg determinističnih sil, kakor so: vzgon, težnost, vztrajnost, Magnusova sila, še fluktuacijske sile, ki imajo odločujočo vlogo pri oblikovanju profilov masne koncentracije.

S predlaganim modelom se predvideva, da delec ne sledi hitrostnim razmeram fluida (turbulentnemu profilu hitrosti v kanalu) zaradi

- Brownove difuzivnosti,
- turbulentne fluktuacije fluida in
- vztrajnosti delca.

Poglavitna zamisel modela je prikazana na sliki 2.1. Opisana je komponenta gibanja delca v smeri y , ki je pravokotna na steno kanala (radialna smer pri kanalu okroglega prereza).



Slika 2.1

Delec d se v času dt pod vplivom fluktuacijske hitrosti fluida v skupaj z vrtincem V nosilnega plina premakne za t.i. mešalno dolžino l iz začetne lege 1 v 2. Fluktuacijska hitrost

$$v' = l \frac{d\bar{u}}{dy} \quad (2.1.)$$

kjer je $\frac{d\bar{u}}{dy}$ — gradient povprečne fluktuacijske hitrosti $\bar{u}$ v smeri y

Ker je gostota delca $\rho_d > \rho$ (gostote fluida), se delec zaradi vztrajnosti giblje naprej do 3, kjer se zaustavi. Razdalja med 2 in 3 je pot zaustavljanja l_z , ki jo doseže delec d z začetno hitrostjo v_d v času τ_d .

$$l_z = \tau_d v_d' \quad (2.2.)$$

v_d' — časovno povprečje začetne hitrosti delca: $v_d' = v'$.

Empirično konstanto σ izberemo v našem primeru $\sigma = 2$.

Ob predpostavki Stokesovega režima obtekanja je [8]

$$\tau_d = (\rho_d/18\eta) d_d^2 \quad (2.3.)$$

Tu pomenita

η — kinematično viskoznost fluida

d_d — premer delca v m, μm

Izhajajoč iz začetne predpostavke sil (sl. 2.1.), ki vplivajo na gibanje delca, lahko tok delcev v smeri y opišemo z [8]

$$\Phi_d = -D_d \frac{d\bar{u}}{dy} + \bar{v}' \bar{\mu}' \quad (2.4.)$$

kjer so

D_d — Brownova difuzivnost delcev,

μ — obremenjenost prostornine z delci,

$$\mu = \dot{m}_d / \dot{V} \text{ v kg/m}^3$$

$\dot{m}_d$ — masni tok delcev v kg/s, g/s,

$\dot{V}$ — prostorninski tok fluida v m^3/s .

Ob upoštevanju modela, Prandtlove vrtinčne teorije in izraza za vrtinčno difuzivnost $\varepsilon = l^2 (d\bar{u}/dy)$, dobimo za drugi člen enačbe (2.4.)

$$\bar{v}' \bar{\mu}' = -\varepsilon \left[1 + 2\sigma \tau_d \frac{d\bar{u}}{dy} + \sigma^2 \tau_d^2 \left(\frac{d\bar{u}}{dy} \right)^2 \right] \frac{d\bar{u}}{dy} \quad [8] \quad (2.5.)$$

Ta izraz vstavimo v enačbo (2.4.) in dobimo

$$\Phi_d = - \left\{ D_d + \varepsilon \left[1 + 2\sigma \tau_d \left(\frac{d\bar{u}}{dy} \right) + \sigma^2 \tau_d^2 \left(\frac{d\bar{u}}{dy} \right)^2 \right] \right\} \frac{d\bar{u}}{dy} \quad [8] \quad (2.6.)$$

Z vstavljanjem brezdimenzijskih vrednosti dobimo

$$\frac{\Phi_d}{\bar{\mu} w_*} = - \left\{ \frac{1}{Sc} + \frac{\varepsilon}{v} \left[1 + 2\sigma \tau_d^* \left(\frac{du^*}{dy^*} \right) + \sigma^2 \tau_d^{*2} \left(\frac{du^*}{dy^*} \right)^2 \right] \right\} \frac{du^*}{dy^*} \quad (2.7.)$$

Brezdimenzijske vrednosti so dobljene na način, ki je običajen pri reševanju podobnih problemov.

Sc je Schmidtovo število. Iz enačbe (2.7.) izhaja, da je gradient brezdimenzijske obremenjenosti μ^* vzdolž prereza y^*

$$\frac{du^*}{dy^*} = - \frac{\Phi_d \bar{\mu} w_*}{\left\{ \frac{1}{Sc} + \frac{\varepsilon}{\nu} \left[1 + 2\sigma \tau_d^* \left(\frac{du^*}{dy^*} \right) + \sigma^2 \tau_d^{*2} \left(\frac{du^*}{dy^*} \right)^2 \right] \right\}} \quad (2.8.)$$

S predpostavko, da so variacije strižne napetosti τ in toka Φ_d podobne, dobimo z integriranjem (2.8.)

$$\int_{r_d^*}^{a^*} d\mu^* = \int_{r_d^*}^{a^*} \frac{(1 - y^*/a^*) dy^*}{\left\{ \frac{1}{Sc} + \frac{\varepsilon}{\nu} \left[1 + 2\sigma \tau_d^* \left(\frac{du^*}{dy^*} \right) + \sigma^2 \tau_d^{*2} \left(\frac{du^*}{dy^*} \right)^2 \right] \right\}} = 1 \quad (2.9.)$$

Meje integriranja so

r_d^* — oddaljenost od stene za polmer delca (v brezdimenzijski obliki),

a^* — sredina kanala (prav tako v brezdimenzijski obliki).

Za numerični izračun masnih profilov po (2.9.) smo izbrali

— vrtnično difuzivnost po Liuju [7]

$$\text{za laminarno področje } \varepsilon/\nu = (y^*/14,5)^3 \quad (2.10.)$$

$$\text{za mešano področje } \frac{(a^* - y^*)/a^*}{(du^*/dy^*)} - 1 \text{ in} \quad (2.11.)$$

$$\text{za turbulentno področje } \frac{(a^* - y^*)/a^*}{(du^*/dy^*)_{y_i}} - 1 \quad (2.12.)$$

— hitrostni profil po Nikuradseju [8]

$$\frac{du^*}{dy^*} = \frac{\bar{w}}{w_*} \frac{(2u + 1)(u + 1)}{2u^2} \frac{1}{a^* n} \left(\frac{y^*}{a^*} \right)^{(1/n)-1} \quad (2.13.)$$

oziroma po Reichardt [8]

$$\frac{du^*}{dy^*} = \frac{1}{1 + 0,4 y^*} + \frac{7,8}{11} \cdot [\exp(-y^*/11) + (y^*/11) \exp(-0,33 y^*)] \quad (2.14.)$$

— hitrost trenja

$$w_* = \bar{w} \sqrt{\lambda/8}$$

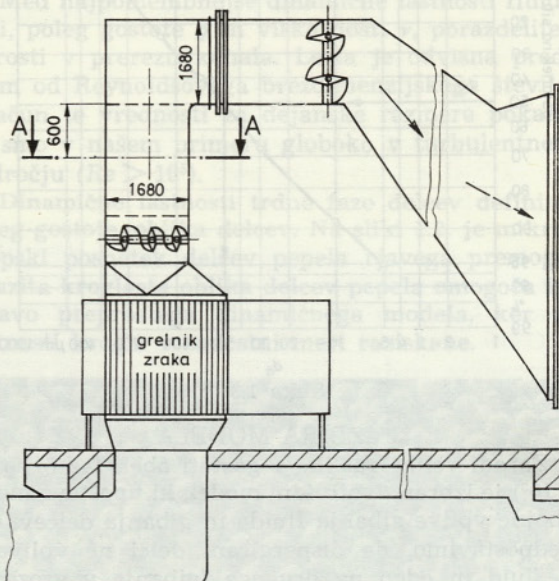
Novejše raziskave [9] kažejo, da se izmerjene upornosti v pravokotnem prerezu kanala ujemajo z upornostmi, ki so izračunane po znani Blasiusovi enačbi za krožni prerez. Če v Reynoldsovem brezdimenzijskem številu premer D zamenjamo s hidravličnim premerom D_h je upornost

$$\lambda = 0,3164 Re^{-0,25} \quad (2.15.)$$

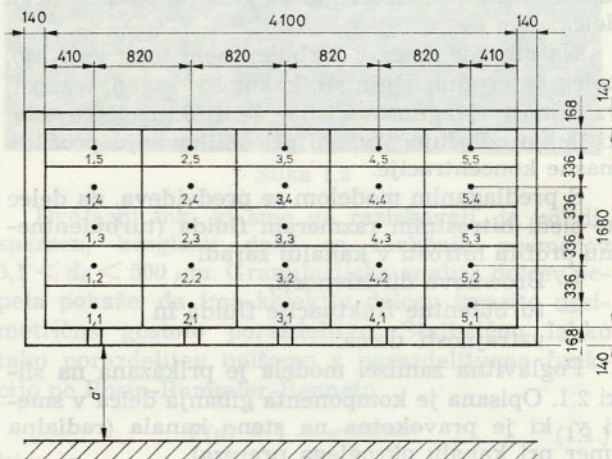
Na teh osnovah je bil izdelan računalniški program.

3. PREIZKUSNI OBJEKT IN MERITVE

V uvodu je omenjeno, da je za preizkušanje izbran industrijski objekt — kanal za dimne pline na izstopu iz parnega kotla 1 ljubljanske toplarne. Dispozicija merilne proge — kanala za dimne pline — je prikazana na sliki 3.1. Merilni prerez A-A, razdeljen na delne prereze, je prikazan na sliki 3.2.



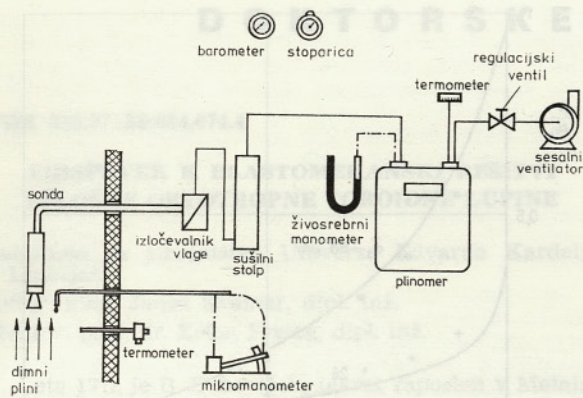
Slika 3.1



Slika 3.2

Za ugotavljanje masnih profilov v merilnem prerezu je uporabljena običajna metoda odsesovanja delnega dvofaznega toka dimnih plinov in gravimetričnega določanja v filtrskem vložku zajete mase trdnih delcev m_d . Ta merilna metoda je v nekaterih razvitejših deželah tudi standardizirana, tako npr. v ZR Nemčiji — VDI 2066.

Shema merilnega stavka je prikazana na sliki 3.3. Merilna sonda je pod pravim kotom ukrivljena cev, na kateri je pritrjena merilna glava. Poglavitna sestavna dela merilne glave sta ostroroba merilna šoba in filtrski vložek s polnilom iz steklene volne, ki lovi trdne delce pepela. Na natančni tehtnici ugotovljena masa zajetih delcev m_d v času Δt



Slika 3.3

da ob izokinetičnem odsesovanju masno obremenitev v merilni točki

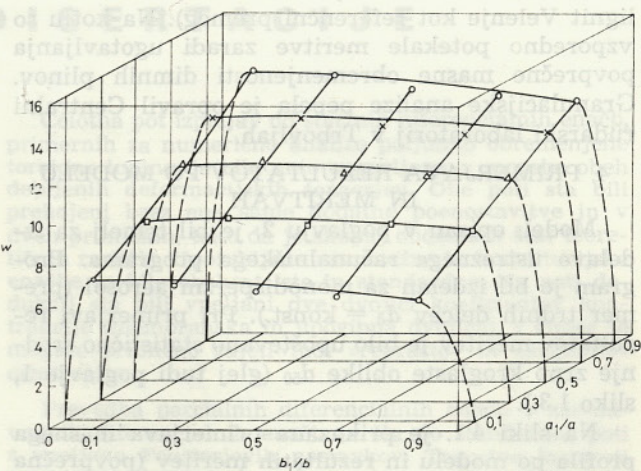
$$\mu = \frac{\dot{m}_d}{V} \quad \text{v kg/m}^3; \text{mg/m}^3$$

Na sliki 3.4. je merilni blok s sušilnikom 1, vlažilnikom 2; plinskim števcem 3, regulacijskim ventilom pretoka 4 in sesalnim ventilatorjem 5. Celotni merilni stavek je bil zasnovan in izdelan v Laboratoriju za termoeenergetiko na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani.

Specifični problem merjenja obremenjenosti dimnih plinov je vlaga, produkt zgorevanja vodika in uparjanja vlage v gorivu. Ta težava je bila v pretežni meri izločena z namestitvijo filtrskega vložka v kanal.

Čas odsesovanja posameznega vzorca je bil na spodnji meji dopustnega (2 do 3 min) zaradi velike masne obremenjenosti dimnih plinov s trdnimi delci pepela pred elektrofiltrom (18,14 do 47,31 g/m³ — merjeno na suhe dimne pline pri normalnem stanju).

Hitrostno polje fluida je bilo izmerjeno s standardno opremo Laboratorija za termoeenergetiko na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani (sonda Anubar, diferenčni manometer s pretvornikom, voltmeter

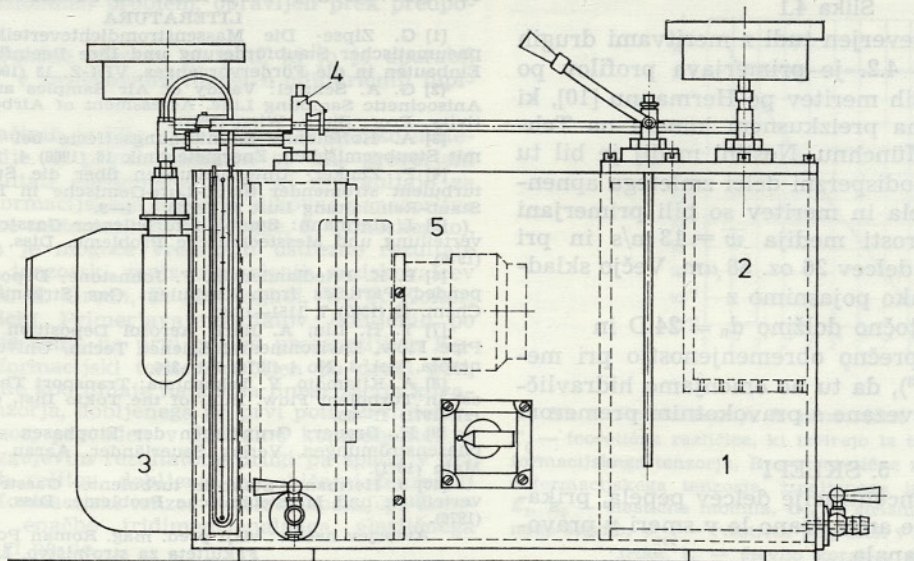


Slika 3.5

in procesni računalnik HP 3052 A). Primer izmerjenega hitrostnega polja je prikazan na sliki 3.5. Manjša nesimetrija hitrostnih profilov v smeri prereza y je posledica razdelitve toka dimnih plinov v dve vzporedni veji. Skoraj konstantni profil hitrosti med obema mejnima plastema je značilen za nerazvit turbulentni profil (natočna dolžina $l_n = 4 D_h$ — 4 hidravlični premeri). Izrazita nesimetrija hitrostnega polja v smeri prereza x je posledica vpliva centrifugalne sile na delce v kolenu kanala $4 D_h$ pred merilnim prerezom. Preizkusna naprava — parni kotel v ljubljanski toplarni — je med preizkušanjem normalno obratovala. Odstopki so bili naslednji:

— Kotel je bil med preizkušanjem enakomerno obremenjen (80 oz. 100-odstotna obremenitev). Nihanja porabe je prevzemal kotel 2.

— Premog se je transportiral v bunkerje kotla neposredno iz vagonov. Tako je bil zagotovljen enoten premog. Za preizkušanje so bili izbrani premogi ekstremne sestave (lignit Kolubara — 48,26 % vlage, rjavi premog Zagorje — 32,36 % pepela in



Slika 3.4

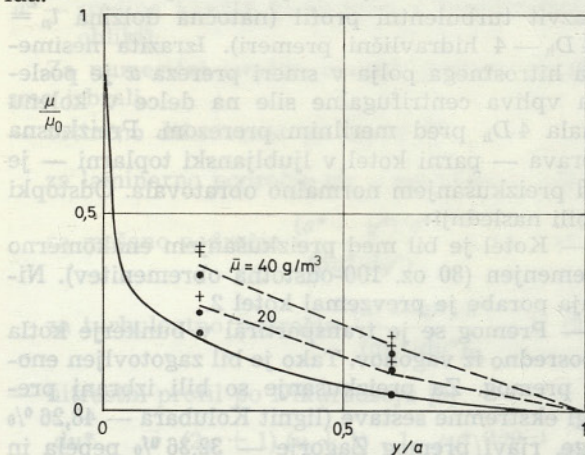
lignit Velenje kot referenčni premog). Na kotlu so vzporedno potekale meritve zaradi ugotavljanja povprečne masne obremenjenosti dimnih plinov. Granulacijske analize pepela je opravil Centralni rudarski laboratorij v Trbovljah.

4. PRIMERJAVA REZULTATOV PO MODELU IN MERITVAH

Model, opisan v poglavju 2, je bil temelj za izdelavo ustreznega računalniškega programa. Program je bil izdelan za monodisperzni aerosol (premer trdnih delcev $d_d = \text{konst.}$). Pri primerjavi rezultatov meritev je bilo upoštevano statistično srednje zrno kroglaste oblike d_{50} (glej tudi poglavje 1, slika 1.3.).

Na sliki 4.1. je prikazana primerjava masnega profila po modelu in rezultatih meritev (povprečna hitrost dimnih plinov 6,8 m/s, srednji premer delcev $d_{50} = 50 \mu\text{m}$, eksponent profila hitrosti po Nikuradsu $n = 10$). Odstopanja merjenih vrednosti od modela so posledica

- nerazvitega turbulentnega profila hitrosti (natočna dolžina $d_n = 4 D_h$) in
- velike povprečne masne obremenjenosti fluída.



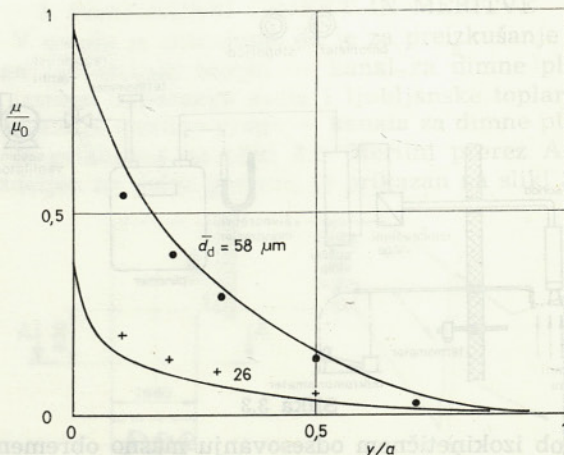
Slika 4.1

Model je bil preverjen tudi z meritvami drugih avtorjev. Na sliki 4.2. je primerjava profilov po modelu in rezultatih meritev po Hermannu [10], ki so bile izvedene na preizkusnem kanalu na Tehnični univerzi v Münchnu. Nosilni medij je bil tu zrak, delci pa monodisperzni delci zmlatega apnenca. Rezultati modela in meritev so bili primerjani pri povprečni hitrosti medija $\bar{w} = 13 \text{ m/s}$ in pri srednjih premerih delcev 26 oz. $58 \mu\text{m}$. Večjo skladnost rezultatov lahko pojasnimo z

- zadostno natočno dolžino $d_n = 24 D$ in
- manjšo povprečno obremenjenostjo pri meritvah ($\bar{\mu} \cong 1 \text{ g/m}^3$), da tu ne omenjamo hidravličnih težav, ki so povezane s pravokotnim premerom kanala.

5. SKLEPI

Polje masne koncentracije delcev pepela, prikazano na sliki 1.1., je analizirano le v smeri y pravokotnega prereza kanala.



Slika 4.2

Nesimetrični profil v smeri x je posledica centrifugalne sile v kolenu kanala pred merilnim prezom. Problem je bil že raziskan, npr. po Brauerju [9].

Predlagani model je

- preprost,
- uporaben za monodisperzne in polidisperzne aerosole in
- uporaben za različne snovne kombinacije trdne in tekoče faze.

Pomanjkljivosti pa so:

- model ne upošteva natočne dolžine d_n in povprečne masne obremenjenosti $\bar{\mu}$,
- industrijski objekt kot eksperimentalna naprava je po pričakovanju pokazal več slabih kakor dobrih lastnosti. Onemogočal je večje spreminjanje posameznih parametrov ter s tem ugotavljanje mej veljavnosti predlaganega modela. Najpomembnejše ugotovitve te raziskave so, vsaj v določenem območju hitrosti in srednjih premerov delcev, da polidisperzni aerosoli oblikujejo profil masne obremenjenosti podobno kakor monodisperzni z enakim premerom delcev ($d_{50} = d_d$) in da snov trdnih delcev ne vpliva v večji meri na oblikovanje profila.

LITERATURA

- [1] G. Zipse: Die Massenstromverteilung bei der pneumatischen Staubbeförderung und ihre Beeinflussung durch Einbauten in die Fördervorgänge. VDI-Z, 13 (1966) 3.
- [2] G. A. Sehmel: Validity of Air Samples as Affected by Anisocnetic Sampling Line. Assessment of Airborne Radioactivity, Proc. Simp. Wien (1967).
- [3] A. Hoffmann: Entmischungseffekte bei Fallversuchen mit Staubbegleichen. Energietechnik 16 (1966) 4, 181–182.
- [4] P. Zenker: Untersuchungen über die Staubverteilung turbulent strömender Staub-Luft-Gemische in Rohrleitungen. Staub-Reinhaltung Luft 32 (1972) 1, 1–9.
- [5] J. Hermann: Staub in turbulenter Gasströmung-Staubverteilung und Messtechnische Probleme. Diss. TH München (1976).
- [6] S. K. Friedlander, H. F. Johnstone: Deposition of Suspended Particles from Turbulent Gas Streams. Ind. Engn. Chem. 49 (1957) 7, 1151–1156.
- [7] Y. H. Liu, A. Ilori: Aerosol Deposition in Turbulent Pipe Flow. Environmental Science Techn. University of Minnesota, Vol. 3, No 4 (1974) 351–356.
- [8] A. Kitamoto, Y. Takashima: Transport Theory of Aerosol in Turbulent Flow. Bull. of the Tokio Inst. of Techn. No. 121 (1971) 41–65.
- [9] H. Brauer: Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen. Verlag Sauerländer. Aarau in Frankfurt/Main (1971).
- [10] J. Hermann: Staub in turbulenter Gasströmung-Staubverteilung und Messtechnische Probleme. Diss. TH München (1976).

Avtorjev naslov: višji pred. mag. Roman Povše, dipl. inž. Fakulteta za strojništvo, Ljubljana