

Projekt »Ekološki usmjereno otkopavanje mineralnih sirovina« br. 195007 financiran od Ministarstva znanosti i tehnologije Republike Hrvatske

MOGUĆNOST REGULACIJE STRUJANJA JAMSKOG ZRAKA U RUDARSKIM PROSTORIJAMA ZRAČNIM ZAVJESAMA

Vladimir RENDULIĆ i Miroslav PETZEL

Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu,
Pierottijeva 6, HR-10000 Zagreb, Hrvatska

Ključne riječi: Vjetrenje podzemnog rudnika, Regulacija zraka, Mlaznica, Zračna zavjesa

Kvalitetni način regulacije količine zraka u podzemnim rudnicima je pomoću zračnih zavjesa. Postupak se sastoji u tomu da se iz razvodne naprave (mlaznice), smještene na bočnoj strani jamske prostorije, ispušta sploštena struja zraka pod nekim kutom u odnosu na os prostorije. Vjetrena struja prostorije djelomično se koči, a jedan se dio struje usmjerava u paralelnu prostoriju.

Prikazana su ispitivanja mogućnosti rada i idejna konstrukcija naprave za stvaranje vjetrene zavjese, na temelju laboratorijskih mjerenja strujanja na modelima.

Key-words: Underground mine ventilation, Air regulation, Nozzle, Air curtain

Air curtain in underground mines is a quality method to regulate the quantity of air. This method consists in releasing the flat stream of air from the nozzle situated on the lateral side of the underground openings. The air stream is released under an angle to the axis of the openings. Air stream is partially blocked and part of it is directed to the parallel working.

On the basis of a laboratory air measurements on various models, this paper describes the tests trying to find out the possibility to construct conceptually and put into function a device to create the air curtains.

Uvod

Utvrđena slobodna raspodjela zraka u jednoj jamskoj vjetrenoj mreži obično ne odgovara glede zahtijevane protočne količine u pojedinim granama vjetrenog sustava. Iz toga razloga, ukupnu protočnu količinu zraka treba raspodijeliti na pojedina radilišta i ostale prostorije u jami, prema stvarnoj potrebi. Treba obaviti »regulaciju« vjetrene struje, koja predstavlja ugradnju dodatnih pozitivnih ili negativnih otpora u postojeću vjetrenu mrežu i izgradnju tzv. »regulacijskih vjetrenih objekata«.

Načelno, regulacija može biti:

– pozitivna, ako se ugradnjom vjetrenog objekta otpor grane povećava;

– negativna, ako se ugradnjom vjetrenog objekta otpor grane smanjuje;

– mješovita, ako se u vjetrenu mrežu ugrađuju djelomično pozitivni i djelomično negativni dodatni otpori.

Načini izvedbe pozitivne ili negativne regulacije vjetrene struje u podzemnim rudnicima su poznati. Tako se, kod pozitivne regulacije, povećava otpor u vjetrenom provodniku, što se postiže ugradnjom pregrade u vidu prigušnice stalnog ili promjenjivog otvora (f), zračnom ili vodenom zavjesom, izgradnjom vjetrenog labirinta, džepova i sl., a u specijalnim slučajevima i ukidanjem postojeće paralelne grane. Drugi način regulacije raspodjele zraka također je i korištenje pomoćnih ventilatora, raznih naprava tipa »ejektor« i sl. Povećanjem otpora u grani izgradnjom jednog od nabrojanih vjetrenih objekata povećava se količina zraka u susjednoj paralelnoj grani. Negativna regulacija izvodi se, kako je izloženo, smanjenjem otpora obično na način promjene karakteristike provodnika, ili ugradnjom paralelne grane što praktički odgovara proširenju presjeka provodnika.

Kada se izgradnjom regulacijskog objekta u grani promjeni protočna količina, pojavi se novi otpor (R')

sastavljen od starog otpora (R) i dodatnog otpora (ΔR) regulacijskog objekta, prema jednadžbi:

$$R' = R \pm \Delta R \quad (1)$$

Kod proračunavanja pozitivna regulacija ima pozitivan, a negativna regulacija negativan predznak.

Raspodjela zraka jamske vjetrene struje upotrebom zavjesa

Vjetrene zavjese kod protusmjernog djelovanja jesu pozitivne regulacije u jamskom vjetrenom sustavu. Kod smjernog djelovanja to su negativne regulacije, jer zbog ejektirajućeg djelovanja slobodne vjetrene struje povećavaju količinu zraka u jamskoj prostoriji.

Količina zraka regulira se na način da se povećava ili smanjuje kut zakošenja (β) u odnosu na smjer vjetrene struje prostorije (sl. 1). Mijenjajući kut zakošenja struje iz mlaznice i puhajuću količinu zraka u zavjesi može se u širokim granicama regulirati zahtjevana protočna količina.

Separatni ventilator lociran u prostoriji slobodno, blizu lokacije zavjese, opskrbljen je kratkim cjevovodom minimalnog promjera 300 mm i izlaznim otvorom u obliku konfuzora.

Dodatni aerodinamički otpor, koji treba stvoriti zavjesa u paralelnom sustavu, računa se prema formuli

$$\Delta R = R_1 m^2 - R_2 \quad (2)$$

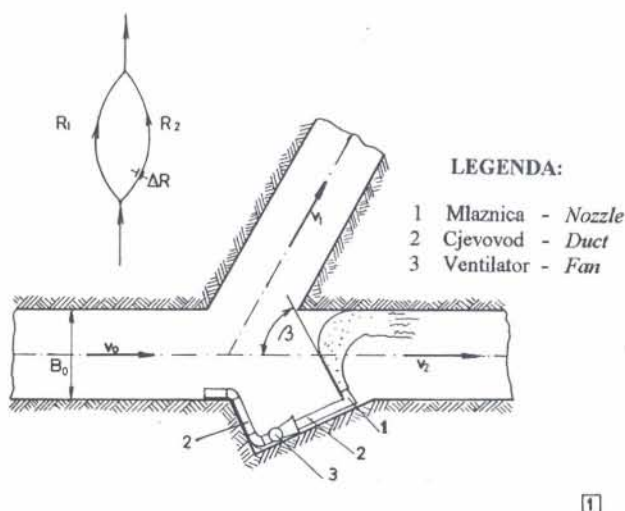
gdje su:

ΔR – dodatni otpor, kg/m^7 ;

R_1, R_2 – otpor 1. i 2. grane paralelnog spoja, kg/m^7 ;

m – odnos količina zraka u granama paralelnog spoja, $m = Q_1/Q_2$;

Q_1, Q_2 – količina zraka, povećana i umanjena u paralelnom spoju, m^3/s ;



Sl. 1. Shematski prikaz lokacije vjetrene zavjese

Fig. 1. Scheme of the location of air curtain

Vjetrena zavjesa

Za regulaciju vjetrene struje u neopasnim jamama rudnika boksita, ili komornim otkopima ukrasnog kamena i sl., vjetrena zavjesa može biti vrlo efikasna. Obično je prostor za transport skučen i obavlja se strojevima na dizelski pogon. Regulacijski sustav pomoću glomaznih vjetrovinih vrata s prigušnicom na transportnom putu u jami nije fleksibilan.

Vjetrene zavjese naprotiv, ne pregrađuju jamske prostorije i ne smetaju transportu, a upravljanje s njima može se vrlo lako automatizirati.

Na protusmjernu zavjesu veliki utjecaj ima brzina zraka u vjetrenoj prostoriji, geometrijske dimenzije prostorije i početna kinetička energija vjetrene struje u zavjesi. Raspršivanjem vode u protok zavjese može se postići povećanje kinetičke energije, a ujedno se može suzbijati prašina. Protusmjerna zavjesa će djelovati ako posjeduje brzinu vjetrene struje veću od brzine vjetrene struje u prostoriji.

Utrošak zraka u zavjesi (Q_{zav}) (Maškovcev i Balihin, 1986), iznosi:

$$Q_{zav} = Q_0 \frac{Q_I}{Q_{II}} \sqrt{\frac{b_0 \eta b}{B_0 a}} \quad (3)$$

gdje su:

- Q_0 – količina zraka, koja prolazi po nerazgranatoj prostoriji, m^3/s ;
- Q_I i Q_{II} – odgovarajuća količina zraka u prostoriji prekrivenoj zavjesom i paralelnoj prostoriji do uključivanja ventilatora zavjese, m^3/s ;
- B_0 i b_0 – odgovarajuća širina prostorije i zbroj otvora iz kojih izlazi zrak za zavjesu (po visini zavjese treba biti jednaka visini prostorije), m;
- η – koeficijent korisnog djelovanja zavjese,

$$\eta = \frac{Q_I - Q'_I}{Q_I}$$

- Q'_I – količina zraka, koja protječe u prekrivenoj grani vjetrene mreže poslije uključivanja u rad zavjese, m^3/s ;
- a i b – eksperimentalni koeficijenti.

Depresija ventilatora zavjese (hv) treba iznositi

$$h_v = h_{st} + h_{l.o.} + h_{din} \quad (4)$$

gdje su:

- h_{st} – gubitak statičkog tlaka vjetrene struje zavjese u cjevovodu, Pa;
- $h_{l.o.}$ – gubici tlaka na lokalne otpore u zavjesi: zavoji u cjevovodu, konstrukcija za razvod zraka i sl., Pa;
- h_{din} – dinamička depresija na izlazu zraka iz mlaznice, Pa.

Ispitivanje koeficijenta ξ lokalnih otpora konfuzora

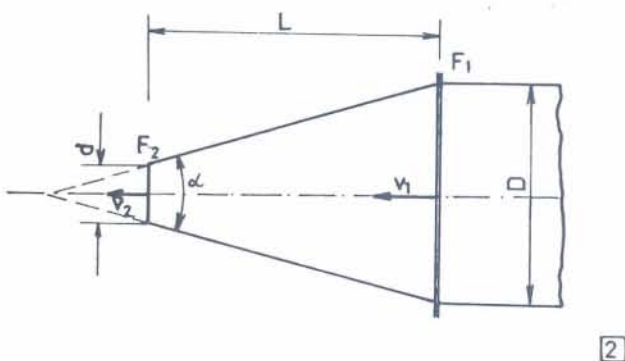
Laboratorijska ispitivanja mnogo puta imaju prednost pred ispitivanjima in situ jer su obično jeftinija, a uvjeti mjerenja mogu se jednostavno mijenjati. Formula za određivanje gubitka tlaka na lokalnim otporima, izražena kao dio brzinske energije strujanja, često se koristi kod praktičnih ispitivanja (Ušakov et. al., 1978), glasi:

$$h = \xi v^2 \rho / 2, \text{ Pa} \quad (5)$$

Iz formule (5) je vidljivo da veličina depresije lokalnog otpora ovisi uglavnom od kvadrata brzine vjetrene struje u lokalnom otporu. Veličina bezdimenzijskog koeficijenta (ξ) lokalnog otpora u formuli ovisna je od oblika i hrapavosti stijenki provodnika te od Re-broja, a određuje se danas za bilo kakve vjetrene objekte eksperimentalno. Mjeri se depresija (h) na dijelu lokalnog otpora, brzina (v) strujanja zraka u lokalnom otporu i gustoća (ρ) zraka.

Ako se formula izrazi preko protočne količine, dobiva oblik:

$$h = \xi Q^2 \rho / 2F^2, \text{ Pa}$$

Sl. 2. Prikaz glavnih dimenzija pravokutnog konfuzora
Fig. 2. Presentation of the main dimensions of the rectangular confuser

Aerodinamički otpor (R) kod toga iznosi:

$$R = \xi \rho / 2 F^2, \text{ kg/m}^7$$

Nakon određivanja ulaznih podataka, veličina koeficijenta (ξ) računa se prema formuli:

$$\xi = 2 F^2 h / \rho Q^2 \quad (6)$$

Tablica 1 - Duljina (L) mm ispitivanih pravokutnih konfuzora, kod kuta suženja (α) i odnosa površina (F_2/F_1)

Table 1 Rectangular confusor testing length (L), with narrowing angle (α) and relations areas (F_2/F_1)

Površina presjeka, m ² Cross section area		Kut suženja, $\alpha/2$ Narrowing angle				Ekvivalentni promjer d_e , mm Equivalent diameter	Odnos F_2/F_1 Relation
ulazni dio F_1 Input part	izlazni dio F_2 Output part	15°	20°	25°	30°		
0,0324	0,0090	242,58	178,59	139,39	112,58	78,26	0,28
0,0324	0,0054	279,90	206,06	160,84	129,90	51,43	0,17

gdje su:

- ξ – koeficijent lokalnog otpora konfuzora;
- v – srednja brzina vjetrene struje u lokalnom otporu, m/s;
- Q – protočna količina zraka kroz lokalni otpor, m³/s;
- F – površina izlaznog presjeka lokalnog otpora, m².

Istraživanja su pokazala da najveće povećanje količine zraka daju slobodno ovješeni aksijalni ventilatori, koji imaju na izlaznom otvoru cjevovoda pričvršćeno lagano suženje (konfuzor). Tada se povećanje količine zraka dobiva uslijed povećanog dinamičkog tlaka na izlazu zraka iz cjevovoda.

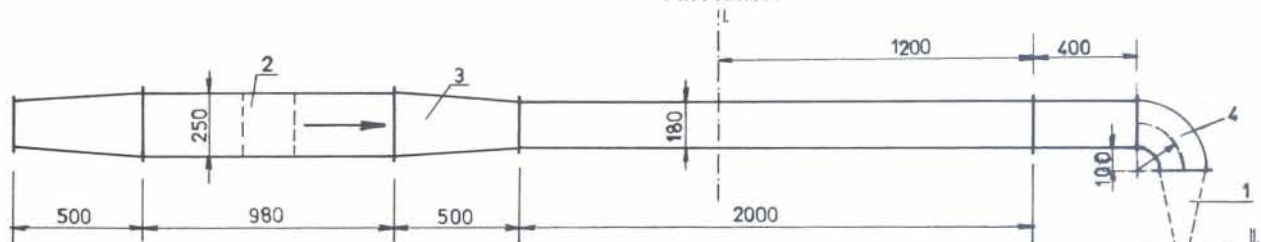
Laboratorijsko vjetreno postrojenje (sl. 3) za ispitivanje kartonskih modela konfuzora sastojalo se iz ci-

Površina (180×180) mm kvadratnog poprečnog presjeka zrakovoda (crtkana linija I na sl. 3) rastavljena je na 9 elementarnih površina u težištu kojih je predviđeno mjerenje dinamičkog tlaka potrebnog za račun srednje brzine strujanja.

Protočna količina zraka pojedinog lokalnog otpora (Q) određena je pomoću formule

$$Q = \sum_{i=1}^{i=n} F_i \times v_i \quad (8)$$

Temperatura kod eksperimenta mjerena je Asmanovim aspiracijskim psihrometrom očitanjem suhog i vlažnog termometra, a barometrijski tlak očitavan je na baroluksu.



LEGENDA:

- | | |
|--|--|
| 1 Konfuzor
Confuser | 2 Cijevni ventilator
Buster Fan |
| 3 Prelazni dio
Intermediate Section | 4 Pravokutno koljeno 90°
Rectangular Radius Elbow 90 Deg. |

[3]

Sl. 3. Laboratorijsko vjetreno postrojenje, M 1:20

Fig. 3. Laboratory air ventilation device, M 1:20

jevnog aksijalnog ventilatora, limenog cjevovoda kvadratnog presjeka (180×180 mm), nekoliko fazonskih dijelova i konfuzora prema sl. 2, koji se ispitivao.

Za ispitivanje odabrano je 8 pravokutnih konfuzora dimenzija izlaznog otvora (180×50) mm i (180×30) mm te s kutom suženja (α) od 30 do 60° (tab. 1). Na taj način obuhvaćeno je područje optimalnog gubitka tlaka u konfuzoru (Altšulj, 1982).

Usvojen je način mjerenja depresije direktnom metodom upotrebom mikromanometra, s tim da se mjerila statička depresija koja se korigirala s dinamičkom depresijom, prema formuli

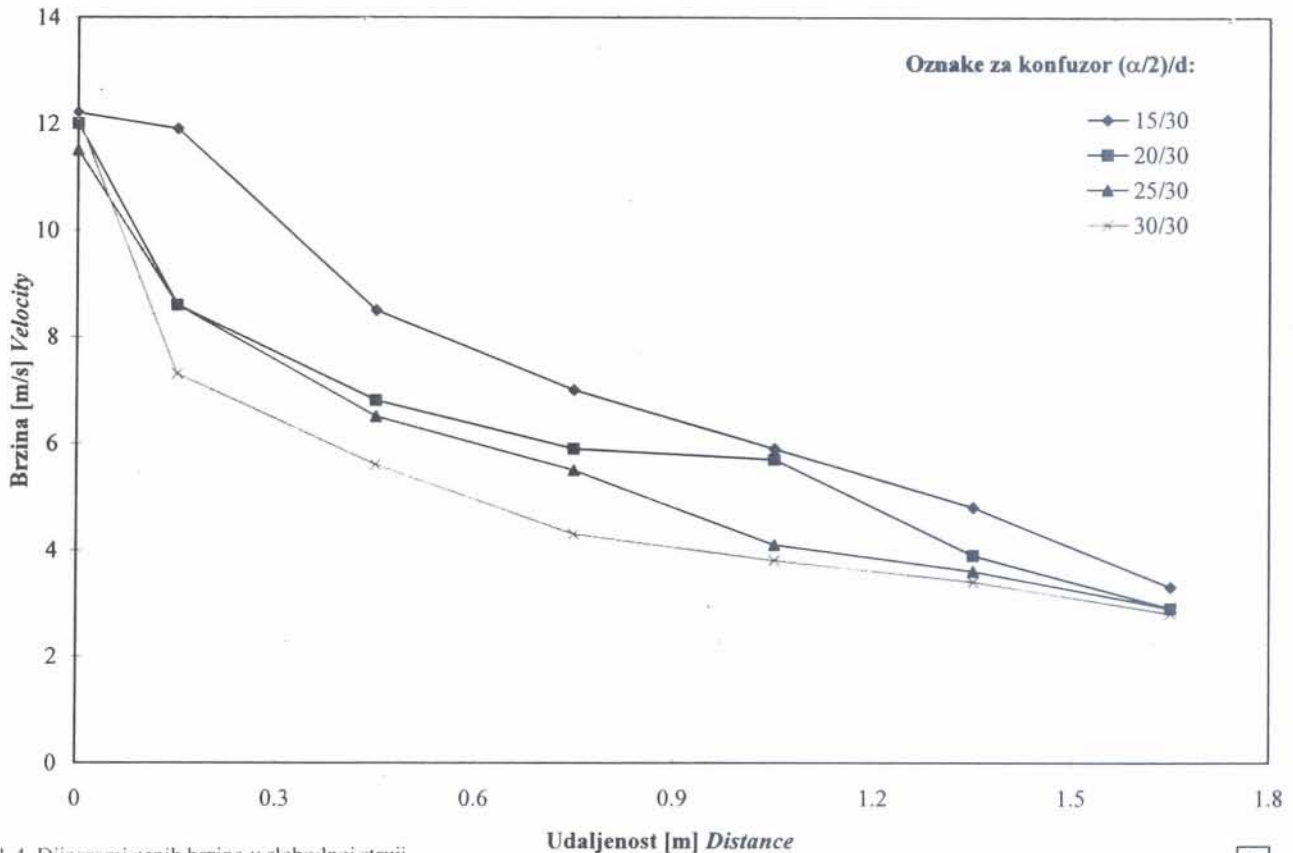
$$h = h_{st} + h_{din} \quad (7)$$

Kako je poznato, veličina gubitka tlaka (h_l) kod protjecanja zraka kroz lokalni otpor može se odrediti primjenom jednadžbe

$$h_l = h - h_{tr} \pm \Delta h_d \quad (9)$$

gdje su:

- h_l – depresija lokalnog otpora, Pa;
- h – suma veličina gubitaka tlaka na lokalne otpore i trenja o stijenke provodnika, Pa;
- h_{tr} – veličina gubitka tlaka na trenje o stijenke provodnika, Pa;
- Δh_d – razlika dinamičkog tlaka u mjerenim presjecima, Pa.



Sl. 4. Dijagrami osnih brzina u slobodnoj struji

Fig. 4. Axial velocity diagrams in free current

4

Tablica 2 - Podaci mjerenja i obračun

Table 2 - Measurements data and accounting

Suženje, α^0 Narrowed condition	Presjek, (a×b) mm Cross section	Brzina, m/s Velocity of Air		Odnos, Q_2/Q_1 Relation	Količina, $Q_1, m^3/s$ Quantity	Depresija, Pa Total pressure		Gustoća, $\rho, kg/m^3$ Density	Koefficient lokal. otpora Factor loc.res	
		v_1	v_2			h_{din}	h		ξ_{10}	ξ_k
30	180 × 180	5,7	5,7	1,00	0,1857	20,2	32,0	1,1971	-	-
	180 × 50	4,3	11,4	0,73	0,1408	12,6	67,0	1,1992	1,23	0,03
	180 × 30	3,1	15,1	0,82	0,1009	6,4	118,0	1,1924	1,45	0,25
40	180 × 50	3,9	12,8	0,91	0,1266	10,5	84,0	1,1933	1,32	0,12
	180 × 30	3,0	14,7	0,82	0,0991	6,1	116,0	1,1918	1,47	0,27
50	180 × 50	4,1	12,0	0,82	0,1315	10,7	71,0	1,1948	1,24	0,04
	180 × 30	3,2	14,5	0,77	0,1041	7,0	122,0	1,2040	1,49	0,29
60	180 × 50	3,9	12,9	0,92	0,1264	9,4	80,0	1,2116	1,26	0,06
	180 × 30	3,3	14,8	0,76	0,1067	7,0	120,0	1,2045	1,46	0,26

Veličina gubitka tlaka na trenje h_{tr} računa se prema formuli

$$h_{tr} = \alpha \frac{LU}{F^3} Q^2 \quad (10)$$

gdje su:

α – koeficijent trenja, za cjevovod od lima $\alpha=0,0025$ do $0,0037 \text{ N s}^2/\text{m}^4$;

L – duljina provodnika, m;

U – opseg provodnika, m;

F – površina presjeka, m^2 ;

Q – protočna količina, m^3/s .

Razlika dinamičkog tlaka Δh_d je

$$\Delta h_d = (v_2 - v_1)^2 \frac{\rho}{2} \quad (11)$$

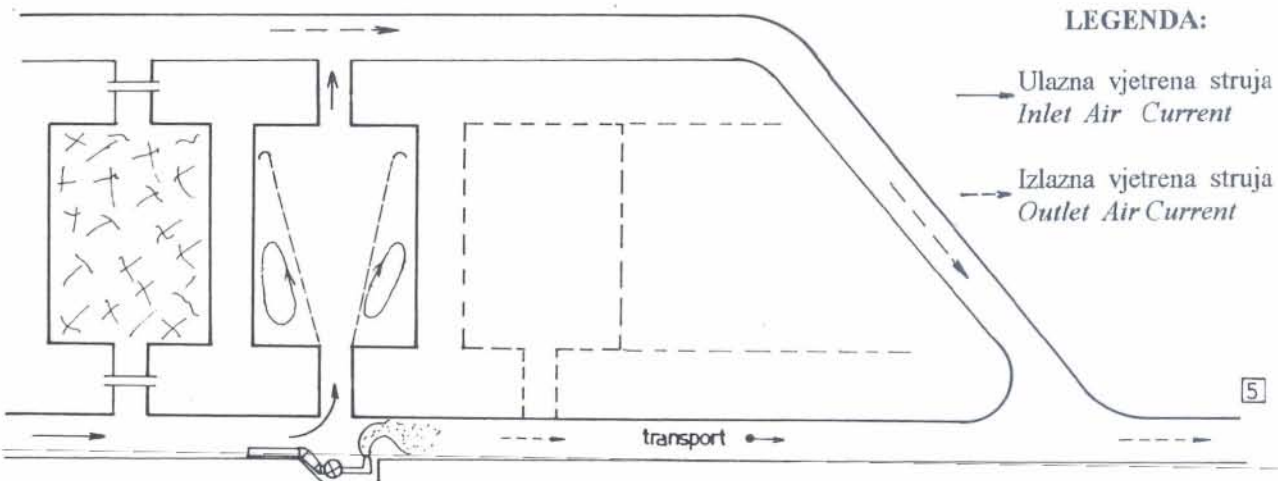
gdje su:

v_2 i v_1 – srednje brzine na uskom i širokom presjeku, m/s;

ρ – gustoća zraka za vrijeme eksperimenta, kg/m^3 .

Strujanje zraka iz mlaznice

Eksperimentalna mjerenja brzine (v_2) istjecanja vjetrene struje na laboratorijskom postrojenju utvrdila



Sl. 5. Prijedlog dijagonalnog vjetrenja komornog otkopa

Fig. 5. Proposal for diagonal ventilation of cavity space

su znatna povećanja, kako je to prikazano u četvrti koloni priložene tablice 2. Vjetrena struja pod utjecajem sila inercije prevladava koheziju s tvrdom površinom, odljepljuje se od nje i rasprostire u okolni zrak u obliku slobodne struje. Za granicu slobodne struje može se uzeti geometrijsko mjesto točaka u kojima su brzine čestica jednake nuli. Mjerenje malih brzina struje na periferiji mlaza, kako je utvrđeno, vrlo je netočno pa je i eksperimentalno određivanje bočnih granica struje vrlo teško. Može se zaključiti da slobodna struja iz mlaznice predstavlja prošireni mlaz zraka koji sadrži u svakom slijedećem poprečnom presjeku duž osi različiti vektor osne brzine. Brzina duž osi u svakom presjeku je maksimalna, a brojčano se smanjuje s udaljenošću od početnog presjeka mlaza. Na vanjskim granicama mlaza brzina slobodne struje i intenzivnost turbulencije zraka jednaki su nuli.

Snimljena promjena osne brzine strujanja u ovisnosti o udaljenosti za četiri tipa slobodne struje iz različitih konfuzora, slikovito je prikazama dijagramom na sl. 4.

Brzina zraka i dobačaj veći su u plosnatoj nego u okrugloj struji, što ovisi od oblika izlaznog otvora (Ušakov i Mihailov, 1985). Za plosnatu struju, kut suženja (α) određuje se prema empirijskoj formuli

$$\operatorname{tg} \alpha = 2,4 a$$

gdje je:

a – koeficijent strukture struje, za plosnatu struju $a = 0,09$ do $0,12$. Razne rešetke i kape mogu promijeniti veličinu konstante a.

Prema iskustvenom koeficijentu (a), slobodna vjetrenja struja iz mlaznice širi se na obje strane od osi pod kutom (α) veličine od 12° do 16° . Čim je koeficijent (a) veći, struja mlaza se više širi, a brzina brže smanjuje.

Zaključak

Eksperimentalna laboratorijska istraživanja na modelima, izvedena u skladu s dostupnim literaturnim saznanjima o regulaciji jamske vjetrene struje zavjesama, rezultirala su nizom praktičnih podataka:

1. Dobiveni podaci mjerenja, prikazani u tablici 2 članka, odnose se na mlaznicu pretpostavljene naprave za stvaranje vjetrene zavjese, oblika konfuzora izrađenog iz kartonskog papira, pa se prezentirani podaci u pogledu točnosti mogu uzeti s rezervom. Sigurno je da se upotrebom konfuzora izlazna brzina mlaza vjetrene struje povećava prosječno 3,3 puta, a maksimalno i 4,9 puta kod

uzorka od 8 ispitanih modela konfuzora, čime će se odgovarajuće povećati i dinamički tlak u budućoj zavjesi.

2. Veličina koeficijenta lokalnih otpora postrojenja (ξ_p) s jednim kvadratnim koljenom i konfuzorom varira, prema tipu konfuzora, od minimalne 1,23 do maksimalne 1,49. Vrijednosti koeficijenta lokalnih otpora konfuzora (ξ_k), dobivene iz relacije $\xi_k = \xi_p - \xi_{kv.k.}$ (gdje je: $\xi_{kv.k.}$ – koeficijent lokalnog otpora kvadratnog koljena, iznosi 1,2 za $\alpha = 90^\circ$), mogu se upotrebljavati samo kod istraživanja lokalnih otpora i za brzinu na izlaznom presjeku kod koje su i određene, a koju treba vidljivo označiti kao indeks na simbolu koeficijenta ξ lokalnog otpora.

Najmanji gubitak tlaka na lokalne otpore istraživanih modelskih konfuzora (ξ_k) imaju, prema tablici 2, koeficijenti s brzinama $\xi_{11,4}$, $\xi_{12,0}$ i $\xi_{12,9}$.

3. Dijagram osnih brzina u slobodnoj struji zavjese prikazuje na slici 4 razvoj maksimalne brzine u mlazu kod 4 tipa konfuzora. Mjerenje je ovdje obavljeno posebno, digitalnim anemometrom u 6 poprečnih profila kod dobačaja mlaza 1,8 m. Dalje nije bilo moguće slijediti strujanje mlaza zbog vrtloga i vraćanja vjetrene struje odbijene od tvrde površine.

Kako je vidljivo iz slike, najveću osnu brzinu u mlazu postigao je konfuzor 15/30 sa suženjem $\alpha = 30^\circ$ površine izlaznog otvora $0,0054 \text{ m}^2$.

4. Mogućnost dijagonalnog vjetrenja jednog komornog otkopa kod rada dizelskih strojeva na transportu, idejno je prikazana na priloženoj sl. 5.

5. Ideju o regulaciji jamske vjetrene struje u nemetanskim jamama vjetrenim zavjesama treba i dalje razvijati, po mogućnosti, na pokusnim radilištima rudnika. Takvo radilište, neovisno o zahtjevima proizvodnje, moglo bi odgovarajućim mjerenjima in situ osigurati podatke koji su neophodni kod konstruiranja naprave za moguću instalaciju vjetrene zavjese na određenoj lokaciji u jami.

Primljeno: 1998-02-25

Prihvaćeno: 1998-07-07

LITERATURA

- Altšulj, A. D. (1982): Hidravličeskije soprotivlenija. »Nedra« Moskva, 220 pp.
- Maškovcev, I. L. & Balihin, G. A. (1986): Aerologija i ohrana truda na šahtah i v karjerah. Izdatelstvo univerziteta družbi narodov Moskva, 312 pp, Moskva.
- Ušakov, K. Z., Burčakov, A. S. i Medvedev, I. I. (1978): Rudničnaja aerologija. »Nedra« Moskva, 440 pp, Moskva.
- Ušakov, K. Z. & Mihailov, V. A. (1985): Aerologija karjerov. »Nedra« Moskva, 270 pp, Moskva.

Possible Regulation of Mine Air Flow in Working Areas Using Air Curtains

V. Rendulić and M. Petzel

This paper discusses the specific way how to regulate mine ventilation currents in underground mine spaces based on available literary knowledge dealing with the application of air curtains.

Experimental laboratory tests of several types of cardboard nozzle models of the ventilation device resulted in practical information for the coefficient of local resistance ξ . Results obtained during tests can

be used for the construction of the project device for the creation of air curtains on corresponding locations in cavity spaces.

Lay-out for the solution how to regulate the ventilation current in diagonal ventilation network is given schematically in the paper in Fig. 5.