

OTPOR STRUJANJU ZRAKA NA 100 m DULJINE PODZEMNE PROSTORIJE

Vladimir RENDULIĆ

Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 41000 Zagreb, Hrvatska

Ključne riječi: Vjetrenje rudnika, Zračna struja, Koeficijent trenja, Specifični vjetreni otpor (R_{100})

U sistematizaciji otpora često se prikazuje osnovni linearni otpor kao specifični za 100 metara duljine jamskog vjetrenog provodnika. U standardnim uvjetima takav specifični otpor je karakteriziran prostornim dimenzijama i veličinom relativne hrapavosti izraženom s koeficijentom hidrauličkog trenja (λ) provodnika. Za utvrđivanje veličine specifičnog otpora analizirani su dobiveni rezultati obračuna nakon mjerenja in situ u postojećem rudniku. U orijentacijske svrhe mogu poslužiti određivanja iz nomograma.

Uvodna razmatranja

Poznavanje otpora strujanju zraka u rudničkim prostorijama jedna je od osnovnih pretpostavki koja omogućuje tehnički ispravno i sigurno vođenje jamske vjetrene struje kako u redovnom pogonu, tako i u havarijskom režimu. Poznavanje točnih vrijednosti otpora značajno je u fazi projektiranja novih jamskih pogona ili revira u postojećoj jami sa svrhom proračunavanja vjetrenja podzemnih prostorija ili ocjene stabilnosti projektirane vjetrene mreže. Otpori se određuju prema različitim formulama koje se osnivaju na hidromehanici, ili su to empirijske formule izvedene na temelju velikog broja statističkih podataka, dobivenih mjerenjem vjetrene struje in situ.

Temeljna formula za proračun otpora vjetrenoj struji, izvedena na osnovi Darcy-Weisbachove jednadžbe za pad tlaka u okruglim cijevima i prilagođena jamskim uvjetima, glasi (Skotschinski i Komarow, 1956):

$$R = \frac{\lambda \varrho}{8} \frac{LU}{F^3}, \text{ kg/m}^7 \dots \quad (1)$$

U ovoj formuli osim duljine (L), presjeka (F), opsega jamske prostorije (U) i gustoće zraka (ϱ), koristi se i koeficijent hidrauličkog trenja (λ), koji se za jamske uvjete može odrediti samo eksperimentalno. Za koeficijent trenja (λ) postoje podaci i u stručnoj literaturi. Kod primjene takvih podataka u proračunima vjetrenja smatra se otpor konstantnom vrijednosti za sva područja strujanja.

Međutim, mnogo puta je kod projektiranja jamskog vjetrenja teško izabrati točnu vrijednost koeficijenta trenja (λ) iz literature, jer nisu uvijek poznati svi potrebni činioci, pa su proračunati otpori vjetrenih grana u mreži često opterećeni značajnim pogreškama.

Key-words: Mine ventilation, Air Current, Friction factor, Specific ventilation resistance (R_{100})

The basic linear resistance is often applied to the resistance systematization as the specific resistance of a 100 meter length of an underground ventilation airway. In standard environment the characteristics of such specific resistance are influenced by the room dimensions and relative roughness value that includes hydraulic friction factor (λ) of the airway. To determine the specific resistance value, the calculation results obtained after measurements in situ in the mine in question are herewith analysed. For approximate determination the nomogram in Fig. 4 of this paper can be used.

Eksperimentiranje u jamskim uvjetima jednostavnije je nego na modelima, jer se mjerenjem dobivaju realni podaci za obračun koeficijenta. S druge strane, taj rad je povezan s mnogim teškoćama jer zahtjeva mnogo vremena i sredstava, veći broj ljudi, odgovarajuću organizaciju rada i opremu.

U sistematizaciji otpora često se koristi osnovni otpor provodnika na duljini od 100 m (R_{100}), koji se može izračunati pomoću formule:

$$R_{100} = 12,5 \frac{\lambda \varrho U}{F^3}, \text{ kg/m}^7 \dots \quad (2)$$

gdje su:

- λ – koeficijent hidrauličkog trenja;
- ϱ – gustoća zraka, kg/m^3 ;
- U – opseg poprečnog presjeka prostorije, m;
- F – površina poprečnog presjeka prostorije, m^2 ;
- R_{100} – linijski otpor 100 m jamske prostorije, kg/m^7 .

Formula (2) često se upotrebljava kod proračunavanja otpora dinamički sličnog provodnika jamske vjetrene struje. Kako je vidljivo, otpor R_{100} nije konstantna veličina jer je linearno proporcionalan promjenljivom koeficijentu trenja (λ), koji je zavisn od Reynoldsovog broja (Re) i relativne hrapavosti (k/D). Također, otpor R_{100} ovisan je i od odnosa geometrijskih veličina poprečnog presjeka jamskog provodnika.

Obavljena mjerenja vjetrene struje u jamskim hodnicima bez podgrade izrađenim u krednom vapnencu jedne boksitne jame pokazala su, prema dijagramu strujanja u cijevima od Nikuradzea i Prandtl-Colebrooka, pripadnost hidraulički hrapavom području. Ovdje veličina relativne glatkosti (D/k) iznosi od 20 do 40, a koeficijent hidrauličkog trenja (λ) približno je konstantan i ovisan samo od hrapavosti (Rendulić, 1991). Mnogi istraživači strujanja u

ovom se području rado služe prosječnim vrijednostima otpora dobivenim iz niza mjerenja in situ. Kod praktičnih proračuna može se analitički odrediti konstanta (C) prosječnog otpora, koja omogućava proračun specifičnog otpora (R_{100}) za bilo koji odnos geometrijskih veličina (F^3/U) slične jamske prostorije.

Određivanje koeficijenta trenja (λ) i specifičnih vjetrenih otpora moguće je i grafički pomoću dijagrama i nomograma raznih konstrukcija.

Pripadajući specifični otpor vjetrenog provodnika slične geometrije uz nepromjenjeni koeficijent trenja (λ), a uz promjenu postojećih dimenzija U_0 i F_0 , računa se prema formuli (Teply, 1980 i 1990):

$$R_{100} = R_{100/0} \frac{F_0^3}{U_0} \frac{U}{F^3}, \text{ kg/m}^7 \quad (3)$$

Standardni uvjeti obračuna mjerenja

Rezultati obračuna mjerenja vjetrene struje dani su u standardnim uvjetima kod kojih je uzet tlak $p = 101324,72$ kPa; temperatura $t = 15^\circ\text{C}$ i relativna vlažnost $\varphi = 60\%$. Ovi parametri odgovaraju gustoći zraka $\rho = 1,22$ kg/m³.

Rezultati obračuna mjerenja u standardnim uvjetima vjetrenog uskopa prikazani su u tablici 1, a odnose se na 16 mjerenja dionica u vremenskom razmaku od 3 god.

Dionica u kojoj je obavljeno mjerenje vjetrene struje nalazi se u vjetrenom uskopu na kosoj duljini između kota +128,2 i +145,0 m. Duljinom dionice

uskop prolazi kroz naslage krednog vapnenca pa nije podgrađen. Kako je vidljivo iz sl. 1 uskop ima hrapave stijenke kao posljedica miniranja i raspucalosti, s komadima stijena po podu. U pogledu vjetrenja može se klasificirati kao nepodgrađeni objekt s nepravilnim bokovima i stropom te donekle ravnimjernim i nečistim podom. U dionici je izmjereno sedam poprečnih profila i utvrđene su varijabilnosti od 6,5 do 10 m² (Rendulić, 1992).



Sl. 1 Vjetreni uskop (pogled u smjeru protiv zračne struje)
Fig. 1 Ventilation rise drift (from the point contrary to air current)

Prosječni specifični otpor vjetrenoj struji

Ako obračunate vrijednosti specifičnih otpora na duljini od 100 m (R_{100}) u standardnim uvjetima

Tablica 1 Rezultati mjerenja u vjetrenom uskopu

Table 1 Results of measurements in the Ventilation rise drift

Standardni uvjeti: Standard conditions:							
	$p = 101324,72$ Pa;	$t = 15^\circ\text{C};$	$\varphi = 60\%$				
Redni broj Ord. number	Količina zraka Air quantity Q, m ³ /s	Viskoznost zraka Air viscosity $\nu \cdot 10^6$, m ² /s	Reynoldsov broj Reynolds number Re	Specif. otpor Specific resistance R_{100} , kg/m ⁷	Koeficijent trenja Friction factor λ	Površina profila Cross-section area F, m ²	Odnos Relation U/F ³ , m ⁻⁵
1	2	3	4	5	6	7	8
1	24,341	14,848	616125	0,0197	0,0551	7,687	0,023431
2	20,355	14,891	513735	0,0255	0,0715	7,687	0,023431
3	18,202	14,871	460022	0,0284	0,0795	7,687	0,023431
4	22,068	14,854	557610	0,0245	0,0726	7,835	0,022157
5	20,823	14,897	524636	0,0248	0,0733	7,835	0,022157
6	22,026	14,925	654518	0,0228	0,0676	7,835	0,022157
7	25,606	14,820	648510	0,0188	0,0556	7,835	0,022157
8	21,804	14,858	550810	0,0223	0,0660	7,835	0,022157
9	15,859	14,880	400032	0,0175	0,0518	7,835	0,022157
10	32,154	14,392	838539	0,0168	0,0496	7,835	0,022157
11	16,929	14,381	441837	0,0208	0,0616	7,835	0,022157
12	24,606	14,402	641184	0,0235	0,0695	7,835	0,022157
13	21,772	14,826	551180	0,0218	0,0645	7,835	0,022157
14	22,246	14,677	568927	0,0197	0,0584	7,835	0,022157
15	29,605	14,816	749965	0,0199	0,0590	7,835	0,022157
16	15,333	14,388	399982	0,0216	0,0639	7,835	0,022157
Prosjek Average	22,108	14,733	569851	0,021775	0,0637	7,807	0,022396

pomnožimo s odgovarajućim odnosom F^3/U , zatim zbrojimo i odredimo srednju vrijednost, dobiva se konstanta »C« za određivanje prosječnog otpora jamske vjetrove prostorijske. Konstanta C može se odrediti i iz srednje vrijednosti koeficijentata hidrauličkog trenja ($\Sigma\lambda/n$) sličnih prostorijske množenjem sa 15,25, kako to zahtijeva formula (5).

$$\text{ili } C = \frac{\Sigma R_{100} (F^3/U)}{n} \quad (4)$$

$$C = \frac{\Sigma\lambda}{n} \cdot 15,25, \text{ kg/m}^2 \quad (5)$$

Prosječni otpor R_{100} nekog sličnog jamskog vjetrovog provodnika kod turbulentnog strujanja u pretpostavljenom hidraulički hrapavom području, koristi se kod projektiranja vjetrovskih mreža kada nisu uvijek poznati svi potrebni parametri.

Za bilo koji odnos U/F^3 prosječna vrijednost specifičnog otpora (R_{100}) dobije se množenjem s konstantnim faktorom (C), prema formuli:

$$R_{100} = (U/F^3)C, \text{ kg/m}^7 \quad (6)$$

U skladu s podacima iz tablice 1 moguće je za standardne uvjete vjetrovog uskopa odrediti prosječni specifični otpor dionice na 100 m duljine koji iznosi:

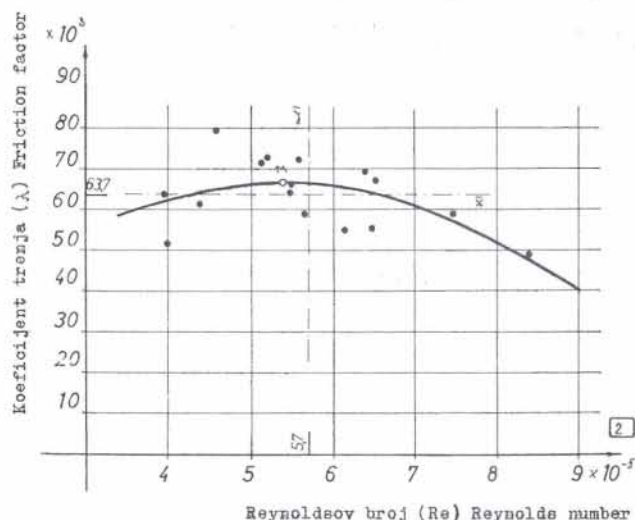
$$\Sigma R_{100} \cdot (F^3/U) = 15,543539$$

$$C = 15,543539/16 = 0,9714712 \text{ kgm}^{-2}$$

$$R_{100} = 0,9714712 \cdot 0,022396 = 0,021757 \text{ kgm}^{-7}$$

Dijagram Re – λ

Mjerenja su obavljena kod različitih količina zraka koje su dobivene prigušivanjem vjetrove struje na glavnom ventilatoru ili u jamskoj prostorijske izgradnjom posebnih pregrada. Na taj način dobivena je različita brzina strujanja zraka, koja na dijagramu ograničava područje za koje vrijede izmjereni podaci. Iz dijagrama Re – λ , može se očitati vrijednost koeficijenta trenja (λ), ako je poznata vrijednost Re-broja. Iz takvog dijagrama disperzije (sl. 2)



Sl. 2 Dijagram funkcije $\lambda = f(Re)$ za standardne uvjete dionice

Fig. 2 Diagram of the function $\lambda = f(Re)$ for standard environment of a section

dobiva se ujedno i prva informacija o obliku krivulje koja se najbolje prilagođava vrijednostima u standardnim uvjetima.

Jednadžba dobivene regresijske krivulje daje funkcijsku zavisnost koeficijenta trenja (λ) od Re-broja i glasi:

$$\lambda = -20,9664(Re/10^7)^2 + 2,26749(Re/10^7) + 0,0054391$$

Indeks korelacije (R_{xy}) pokazuje stupanj ovisnosti varijable y o varijabli x i iznosi

$$R_{xy} = \frac{\sigma_y}{\sigma_x} = 0,54508$$

Kako je vidljivo iz priloženog Re – λ dijagrama, koeficijent trenja varira s povećanjem brzine strujanja. Kod porasta brzine koeficijent raste do neke maksimalne točke, a zatim u području većih Re – brojeva blago pada.

Razgraničenje usponskog i padajućeg dijela krivulje određeno je točkom M, koja se može izračunati iz uvjeta ekstrema:

$$\frac{d\lambda}{dRe} = -\frac{2 \cdot 20,9664}{10^{14}} Re + \frac{2,26749}{10^7} = 0$$

Koordinate točke maksimuma krivulje iznose:

$$Re = 540743,7614; \lambda = 0,066746$$

Ako se računa s prosječnim kinematičkim koeficijentom za standardne uvjete $v = 14,733 \cdot 10^{-6}$ i srednjim hidrauličkim promjerom $D = 2,931$ m, može se dobiti brzina koja odgovara ekstremnoj točki i ona iznosi:

$$v = \frac{540743,7614 \cdot 14,733 \cdot 10^{-6}}{2,931} = 2,72 \text{ m/s}$$

Iz dijagrama Re – λ može se očitati vrijednost koeficijenta trenja (λ), ako je poznata veličina Re-broja, nakon čega se može analitički odrediti veličina specifičnog otpora (R_{100}) uz pomoć navedene jednadžbe (2).

Za točku maksimuma krivulje specifični otpor (R_{100}) iznosi:

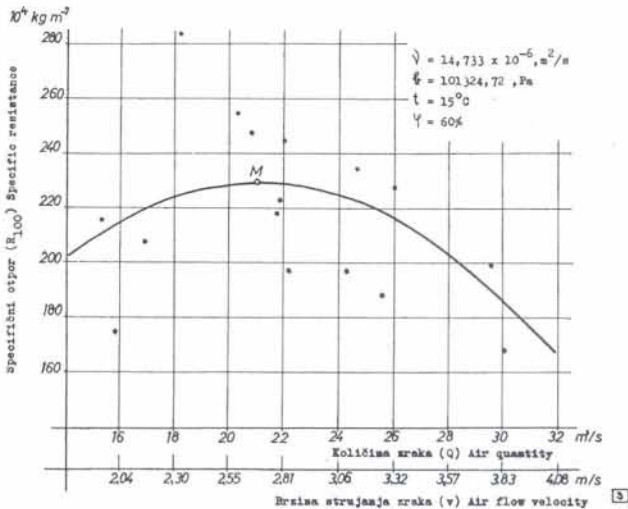
$$R_{100} = 12,5 \cdot 0,066746 \cdot 1,22 \cdot 0,022395 = 0,022795 \text{ kgm}^{-7}$$

Dijagram Q – R_{100}

Podatak o otporu R_{100} nekog provodnika, kod neke brzine odnosno protočne količine, može se odrediti i direktno iz dijagrama Q – R_{100} . Dijagram vrijedi za prosječnu kinematičku viskoznost $v = 14,733 \cdot 10^{-6}$ te tlak $p = 101324,72$ Pa, temperaturu $t = 15^\circ\text{C}$ i relativnu vlažnost $\varphi = 60\%$, što odgovara standardnim uvjetima mjerenih vrijednosti. Na apscisi dijagrama osim protočne količine treba biti obilježena i skala brzine strujanja zraka u provodniku, dok je na ordinati prikazana odgovarajuća skala specifičnog otpora R_{100} (sl. 3).

Metodom najmanjih kvadrata iz niza mjerenja dobivena je jednadžba aproksimacijske krivulje funkcije:

$$R_{100} = -54,238(Q/10^3)^2 + 2,2896(Q/10^3) - 1,1945 \cdot 10^{-3}$$



Sl. 3 Dijagram funkcije $R_{100} = f(Q)$ za standardne uvjete dionice
 Fig. 3 Diagram of the function $R_{100} = f(Q)$ for standard environment of a section

Kako je vidljivo iz konstruiranog dijagrama, s porastom brzine strujanja otpor (R_{100}) raste, a zatim daljim povećanjem brzine opada. Razgraničenje područja strujanja dano je ekstremom krivulje slijedećih koordinata:

$$Q = 21,1069 \text{ m}^3/\text{s}; R_{100} = 0,022968 \text{ kg/m}^7$$

Odgovarajuća brzina za točku ekstrema iznosi:

$$v = 2,70 \text{ m/s (približna brzina i u dijagramu } \lambda - Re)$$

Konstruirana skala brzine na apscisi dijagrama pokazuje ovisnost specifičnog otpora R_{100} od brzine (v).

Lijevo od ekstremne točke M nalazi se područje gdje s povećanjem brzine strujanja otpor R_{100} blago

raste, a u području desno od točke M otpor R_{100} blago pada. Vidljivo je da brzina strujanja ima veliki utjecaj na veličinu otpora R_{100} .

Nova funkcija ima oblik $R = f(Q)$ i ona se kod točnih proračuna mora uzimati u obzir.

Nomogram za određivanje specifičnog otpora R_{100}

Specifični otpor (R_{100}) nepodgrađene jamske prostorije može se jednostavno i u granicama točnosti odrediti upotrebom dvostrukog mrežastog nomograma. Nomogram se sastoji iz dva kvadranta sa jednom zajedničkom ordinatom na koju je u skladu s jednadžbom (2) konstruirana skala dimenzije $12,5 \lambda \rho$, kg/m^7 . Ovaj jednostavni nomogram prikazan je na sl. 4, a iz podataka mjerenja odnosno izračunatog koeficijenta trenja (λ), odgovarajuće gustoće (ρ) zraka te geometrijskih odnosa provodnika (U/F^3), daje na apscisi drugog kvadranta vrijednost specifičnog otpora (R_{100}), odgovarajućeg vjetrenog provodnika.

Nomogram odgovara za površine poprečnih presjeka veličine od 5 do 10 m^2 .

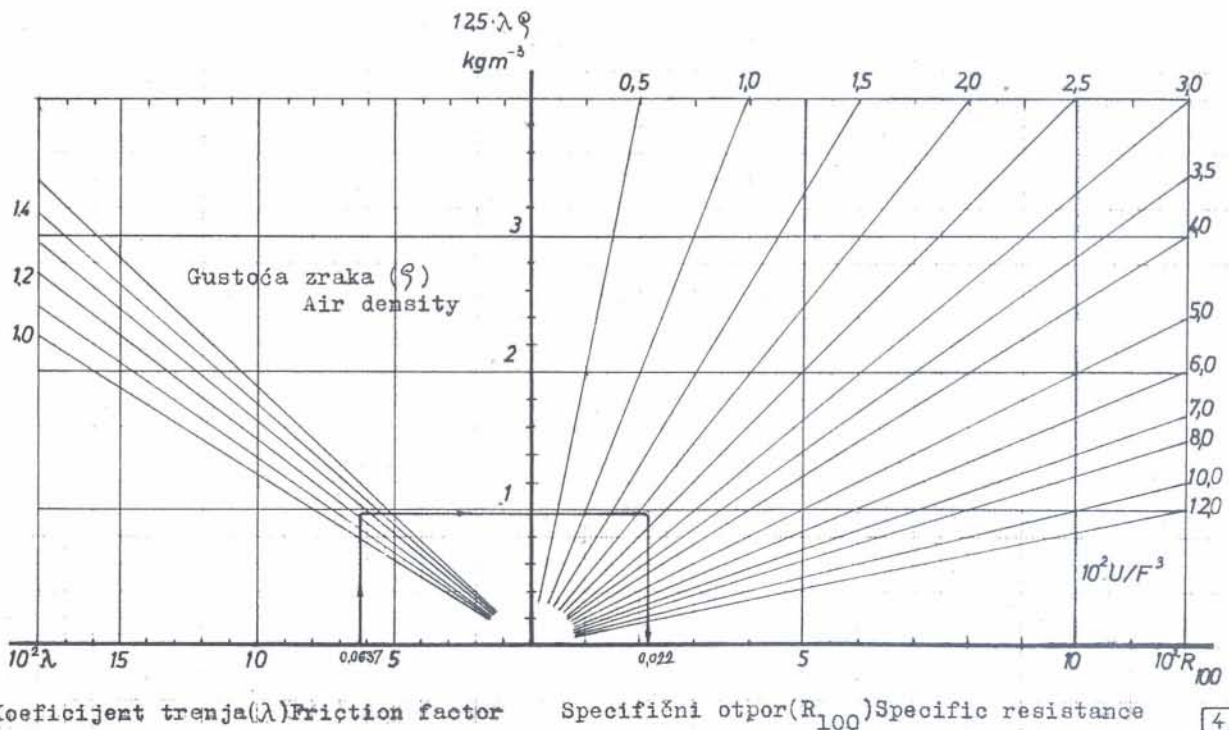
Zaključak

Određivanje otpora vjetrenoj struji u jamskom provodniku zahvatilo je područje mjerenja od $Re > 4 \cdot 10^5$ do $Re = 8,5 \cdot 10^5$.

Specifični otpor R_{100} dionice kod standardnih uvjeta mijenjao se u granicama od 0,0175 do 0,0284 kg/m^7 , a koeficijent trenja od $\lambda_{\min} = 0,0496$ do $\lambda_{\max} = 0,0795$.

Srednja vrijednost koeficijenta trenja za objekt vjetrenog uskopa iznosi $\lambda = 0,0637$.

Aproksimacijska krivulja pokazuje porast koeficijenta trenja s povećanjem Re-broja do točke mak-



Sl. 4 Nomogram za određivanje specifičnog otpora (R_{100}) jamske prostorije

Fig. 4 Nomogram for determination of specific resistance (R_{100}) in an underground opening

simuma kod $Re = 540743,7614$ i $\lambda_{maks} = 0,0667$, nakon čega krivulja blago pada.

Dijagram $R_{100} - Q$ direktno pokazuje veličinu specifičnog otpora R_{100} pa za točku maksimuma ona iznosi $R_{100} = 0,022968 \text{ kg/m}^7$ s količinom strujanja $Q = 21,1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Kod ovog dijagrama mora biti naznačena srednja viskoznost (ν) tlak (p) i temperatura (t), za koje vrijednosti približno vrijede očitani podaci.

Primljeno: 29. I. 1993.

Prihvaćeno: 27. V. 1993.

LITERATURA

- Rendulić, V. (1991): Utjecaj hrapavosti stijenki jamskog vjetrenog provodnika na veličinu hidrauličkog koeficijenta trenja. *Rud.-geol.-naft. zb.* 3, 45–49, Zagreb
- Rendulić, v. (1992): Unapređenje određivanja prosječnog profila jamske prostorije. *Rud.-geol.-naft. zb.* 4, 105–109, Zagreb
- Skotschinski, A. A., Komarow, W. B. (1956): Grubenbewetterung. VEB Verlag Technik, 544 pp, Berlin
- Teplý, E. (1980): Priprema ulaznih podataka za proračun vjetrenja na digitalnom računskom stroju. »Tehnika« – Rudarstvo, geologija i metalurgija 6, 903–909, Beograd
- Teplý, E. (1990): Rudnička ventilacija. Sveučilište u Zagrebu, 356 pp, Zagreb

Air Flow Resistance per 100 m of an Underground Opening

V. Rendulić

The resistance to air flow in underground airways in mines is the basic value that ensures proper and safe technical control of ventilation currents in mines' every day operation as well as in the regime of an accident.

The resistance values can be determined either by equations based on hydrodynamics principles or empirically derived equations resulting from a great number of statistical data when air flow is measured in situ. To systemize resistance, it is often the case that linear resistance at length of 100 meters is applied. This specific resistance (R_{100}) is not a constant value since it is

linear proportional to the variable friction factor (λ) which depends on Reynold's number and relative roughness (k/D). The resistance R_{100} also depends on relations of geometric parameters of a cross-section.

Determination of friction factor (λ) and specific resistance R_{100} is possible by approximative curves of the function $\lambda = f(Re)$ and $R_{100} = f(Q)$ derived by the method of minimum squares after a serial of measurements in situ.

For approximative determination of specific resistance R_{100} there is a nomogram in Fig. 4 of the paper.