

Istraživanje efikasnosti ciklona

Mr Dragan Vuković, dipl. inž.,
Mašinski fakultet, 27. marta 80, 11000 Beograd

Stepen odvajanja čestica iz gasne struje (efikasnost) ciklonskog prečištača gasova predstavlja njegovu najvažniju karakteristiku. Ta veličina se može odrediti analitički i eksperimentalno (na modelu ili već izgrađenom objektu). Rezultati dobijeni eksperimentom imaju mali stepen ponovljivosti, jer zavise od mnogo faktora koje nije moguće kontrolisati. Zbog toga ni sam eksperiment ne daje pouzdane rezultate. Analitički izrazi koji su u upotrebi daju rezultate koji znatno odstupaju od realnih, pa ni oni nisu upotrebljivi za proračun efikasnosti. Iako se na Mašinskom fakultetu u Beogradu radi na poboljšanju analitičkih izraza koji bi dali približno realne rezultate i ispitivanje modela učinili nepotrebnim, ovaj rad predstavlja pregled rezultata proračuna ciklona Ø 164 mm, dobijenih postojećim analitičkim izrazima.

Dve najvažnije karakteristike ciklona: pad pritiska (Δp) i efikasnost (E), omogućavaju pravilno određivanje oblasti primene. Poznavanje pada pritiska omogućava da prilikom projektovanja i ugradnje ciklon radi u optimalnom strujnom režimu i tako daje optimalne rezultate, tj. prečišćava gas sa maksimalnom efikasnošću i uz minimalni utrošak energije i investicionih troškova. Poznavanje efikasnosti omogućava primenu ciklona za prečišćavanje gasa od čestica koje mogu da se izdvoje iz gasa.

Naime, iako je ciklonski prečištač jeftin i pouzdan uređaj, čest je slučaj da u praksi ne radi dobro, upravo zbog toga što je ugrađen ciklon koji je prevelikog prečnika, pa su inercijalne sile u njemu male i ne mogu da izdvoje čestice relativno malih dimenzija. Ili, ne zna se stvarni koeficijent otpora, pa su brzine strujanja u ciklonu suviše male ili suviše velike, što opet ima istu posledicu – mali stepen odvajanja prašine iz struje gasa, gubitak materijala, zagađivanje okoline.

Proračun ciklona, dakle mora da obuhvati proračun pada pritiska i proračun efikasnosti. Razvojem eksperimentalnih metoda problem određivanja pada pritiska postaje trivijalan, tako da se teorijske vrednosti pada pritiska zamenjuju rezultatima eksperimentalnih istraživanja. Ovi rezultati su pouzdani i može da ih odredi svaki proizvođač ciklona.

Sa problemom određivanja efikasnosti nije takav slučaj. Da bi se eksperimentalno odredila frakciona i totalna efikasnost, potrebno je pre svega standardizovati eksperimentalnu praši-

nu i režim rada ciklona koji se ispituje, što do sada nije učinjeno. Kada bi se to učinilo, stepen ponovljivosti rezultata ispitivanja je relativno mali, pa rezultati ne bi bili uporedivi ni upotrebljivi, u širem smislu te reči. Sa druge strane, svi proračuni ciklona polaze od pretpostavke da je režim strujanja u ciklonu laminaran (sila otpora se računa po Stoksu), jer se ne zna stvarni koeficijent otpora čestice. Strujanje je po pravilu turbolentno, pa su i rezultati proračuna takoreći neupotrebljivi i pokazuju neslaganje sa eksperimentom i za ceo red veličine.

1. Dosadašnja istraživanja

Skoro svi dosadašnji proračuni efikasnosti ciklona svode se na određivanje dva karakteristična prečnika:

- hipotetički prečnik zrna (prečnik čestice koja se u ciklonu odvaja sa efikasnošću od 50%, u oznaci $d_{50\%}$);
- granični prečnik zrna (prečnik čestice koja se u ciklonu odvaja sa efikasnošću od 100%, u oznaci $d_{100\%}$).

Ove vrednosti prečnika čestica daju dva praktična podatka: koje čestice ciklon sa sigurnošću odvaja iz struje gasa ($d_{100\%}$), i kada je upotreba ciklona besmislena (ukoliko je granulometrijski sastav prašine takav, da je znatan udeo čestica manjih od vrednosti $d_{50\%}$).

U svim dosadašnjim proračunima se uglavnom uzima da na česticu materijala koja se nalazi na spiralnoj putanji u ciklonu za vreme njenog kretanja deluju: inercijalna (centrifugalna) sila, sila otpora i sila Zemljine teže. Izrazi za ove sile su obično date u obliku:

$$F_c = \rho \frac{\pi d^3}{6} \frac{v_t^2}{r}, \quad \text{centrifugalna sila} \quad (1)$$

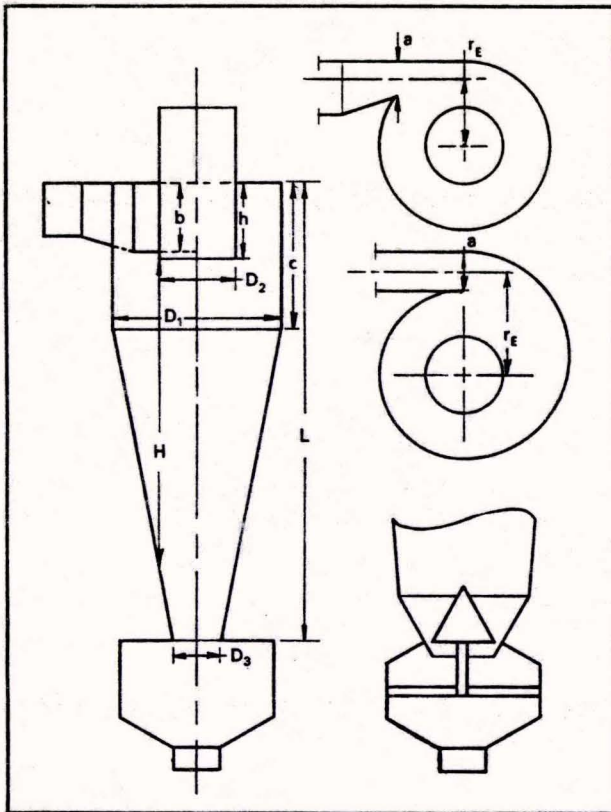
$$F_g = \rho \frac{\pi d^3}{6} g, \quad \text{sila Zemljine teže} \quad (2)$$

$$F_w = 3\pi d \mu v_t, \quad \text{sila otpora po Stoksu} \quad (3)$$

U ovim izrazima je:

- ρ – gustina čestice,
- d – prečnik čestice,
- v_t – tangencijalna komponenta brzine čestice na ulazu u ciklon,
- v_r – radijalna komponenta brzine čestice u ciklonu,
- μ – dinamička viskoznost gasa,
- g – ubrzanje Zemljine teže.

U nastavku će se dati izrazi za hipotetički i granični prečnik zrna, izvedeni ovako na osnovu uzetih sila koje deluju na česticu u ciklonu. Biće dati i izrazi koje su razni autori koristili u ovoj problematici. Oznake u formulama date su prema skici na slici 1.



Slika 1. Osnovne dimenzije ciklona - slika uz proračun

1.1. Hipotetički prečnik zrna, $d_{50\%}$

Kao što je rečeno, hipotetički prečnik zrna predstavlja onu vrednost prečnika čestice, koja se u ciklonu odvaja sa efikasnošću od 50%. Ukoliko se čestica materijala po spiralnoj putanji u ciklonu kreće pod dejstvom centrifugalne sile i sile otpora sredine, da bi se ona nataložila i pala u sabirni bunker, mora da dodirne zid omotača ciklona. Da bi se to desilo, centrifugalna sila mora da bude veća od sile otpora sredine, tj:

$$\rho \frac{\pi d^3 v_r^2}{6 r} > 3 \pi d \mu v_r \quad (4)$$

Odatle se posle prostih transformacija dobija:

$$d_{50\%} = \left(\frac{9V\mu r_2}{2\pi(L-h)\rho\Phi v_u^2 r_0^2} \right)^{0.5} \quad (5)$$

Izraz (5) predstavlja najčešći izraz za izračunavanje hipotetičkog prečnika zrna (čestice).

Vrlo sličnu jednačinu dao je Stairmand [1]:

$$d_{50\%} = \left(\frac{9V\mu}{\pi\rho(L-h)u_m^2} \right)^{0.5} \quad (6)$$

U upotrebi je i nešto komplikovanija jednačina Stairmanda [10], koja daje približno iste rezultate:

$$d_{50\%} = \frac{3}{u_1\Phi} \left(\frac{V\mu D_2/2}{\pi(L-h)(\rho-\rho_f)D_1} \right)^{0.5} \quad (7)$$

U literaturi se susreće i izraz za hipotetički prečnik zrna po Barthu, čija je jednostavnija forma [1]:

$$d_{50\%} = \left(\frac{9V\mu}{\pi\rho v_u^2 L} \right)^{0.5} \quad (8)$$

Složenija forma Barthovog izraza glasi [10]:

$$d_{50\%} = \frac{3}{u_1} \left(\frac{V\mu D_2}{\pi(L-h)(\rho-\rho_f)D_1} \right)^{0.5} \quad (9)$$

Poznati istraživač u oblasti rada ciklona, Ter Linden, predlaže nešto izmenjen izraz [10]:

$$d_{50\%} = \frac{3}{u_1} \left(\frac{V\mu^2 D_2}{\pi(L-h)(\rho-\rho_f)D_1} \right)^{0.5} \quad (10)$$

Svi ovi izrazi mogu da se smatraju prihvatljivim, jer daju približno iste vrednosti koje dobro odgovaraju rezultatima eksperimenata.

1.2. Granični prečnik zrna, $d_{100\%}$

Odgovor na najvažnije pitanje pri upotrebi ciklona: koju česticu ciklon sa sigurnošću može da izdvoji iz gasa, teorijski daje izraz za granični prečnik zrna. Kada se čestica kreće po spiralnoj putanji u ciklonu, za slučaj ravnoteže centrifugalne sile i sile otpora, može da se napiše (slika 1.1):

$$v_r = \frac{\rho d^2 v_t^2}{18\mu r} \quad (11)$$

ili:

$$\frac{dr}{d\tau} = \frac{\rho d^2 v_t^2}{18\mu r} \quad (12)$$

Uvođenjem vremena koje čestica provede u spirali ciklona, dobija se:

$$d_{100\%} = \left[\frac{9V(1-a/D_1)\mu}{\pi\rho L v_u^2} \right]^{0.5} \quad (13)$$

Izraz (13) daje vrednost graničnog prečnika zrna d u obliku u kojem se najčešće koristi.

Od jednačina koje su u upotrebi, navodi se izraz za poluprečnik Smuchnina i Kouzova [12]:

$$r_{100\%} = 1,532 \left(\frac{\mu}{\pi n_s \rho \omega} \ln \frac{R_1}{R_1 - X} \right)^{0.5} \quad (14)$$

Slične su jednačine dali Rosin, Rammler, Intelmann:

$$r_{100\%} = 1,5 \left[\frac{\mu}{\pi n_s \rho v_u} X \left(1 - \frac{X}{2R_1} \right) \frac{R_1}{R_r} \right]^{0.5} \quad (15)$$

Shepherd, Lapple:

$$r_{100\%} = 3 \left(\frac{0,3\mu R_1}{\pi n_s \rho v_u} \ln \frac{R_1}{R_2} \right)^{0.5} \quad (16)$$

Davies:

$$r_{100\%} = 1,06 \left[\frac{\mu R_1^2}{\rho v_u L} (1 - R_2/R_1)^4 \right]^{0.5} \quad (17)$$

Šašić:

$$d_{100\%} = \frac{1}{2} D_1 \left(\frac{18\mu \operatorname{tg} \alpha}{\rho C} \right)^{0.5} \quad (18)$$

Veselov:

$$d_{100\%} = \left(\frac{9V\mu}{\pi c \rho v_c^2} \right)^{0,5} \quad (19)$$

Svi ovi izrazi kojima se računa granični prečnik zrna $d_{100\%}$ daju približno iste rezultate, koji se, nažalost, ne poklapaju sa rezultatima eksperimentalnih istraživanja. Između izračunatih i izmerenih prečnika postoji značajna razlika.

2. Proračuni $d_{50\%}$ i $d_{100\%}$ primenjeni na laboratorijski ciklon \varnothing 164 mm

Dosadašnja teorijska i praktična istraživanja proračuna ciklona primenjena su na laboratorijski ciklon prečnika 164 mm. Napominje se da je reč samo o proračunu hipotetičkog i graničnog prečnika zrna, jer je problem određivanja otpora razvojem laboratorijskih merenja uspešno rešen, dok je problem efikasnosti izdvajanja čestica iz gasa praktično pod velikim znakom pitanja.

Svi proračuni vršili su se za kvarcnu prašinu gustine $\rho = 2550 \text{ kg/m}^3$, radni fluid je bio vazduh gustine $\rho_f = 1,2 \text{ kg/m}^3$ i koeficijenta dinamičke viskoznosti $\mu = 17,7 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, srednja brzina na ulazu u ciklon $v_u = V/axb = 10 \text{ m/s}$ (ili zapreminski protok $V = 0,0168 \text{ m}^3/\text{s}$).

$$d_{ar50\%} = 1,53 \quad d_{ar100\%} = 4,44$$

Osnovne dimenzije ciklona su: $L = 0,59$, $c = 0,131$, $h = 0,082$, $D_1 = 0,164$, $D_2 = 0,062$, $a = b = 0,041 \text{ m}$.

Ovaj proračun je urađen prema svim izrazima izloženim u poglavljima 1.1 i 1.2, tj. prema preporukama navedenih autora. Rezultati su radi preglednosti dati u tabeli 1.

3. Odstupanje proračuna od realnih rezultata

Analizirajući rezultate dobijene proračunom koji se odnosi na ciklon prečnika 164 m, može se zaključiti sledeće:

1. Vrednost hipotetičkog prečnika zrna kreće se u dosta uzanom intervalu za sve načine proračuna, sa srednjom vrednošću $d_{50\%} = 1,53 \text{ }\mu\text{m}$.

Tabela 1. Pregled rezultata proračuna $d_{50\%}$ i $d_{100\%}$ ciklon \varnothing 164 mm

Autor	Jednačina	$d_{50\%}$ μm	$d_{100\%}$ μm
—	(5)	1,28	—
Stairmand	(6)	1,28	—
Stairmand	(7)	1,29	—
Barth	(8)	2,43	—
Barth	(9)	1,61	—
Ter Linden	(10)	1,32	—
—	(13)	—	2,6
Smuchin, Kouzov	(14)	—	3,2
Rosin, Rammler, Intelman	(15)	—	3,6
Shepherd, Lapple	(16)	—	7,06
Davies	(17)	—	2,36
Šašić	(18)	—	5,85
Veselov	(19)	—	6,45

2. Vrednost graničnog prečnika zrna kreće se u nešto širem intervalu vrednosti, sa srednjom vrednošću $d_{100\%} = 4,44 \text{ }\mu\text{m}$. Ova vrednost odstupa od realnih mogućnosti prečišćavanja gasa ciklonom, jer je poznata stvar da se u sistemima za otprašivanje za tako sitne čestice koriste filterski uređaji sa filterskim pregradama (materijalima, tkaninama), koji su po svom mehanizmu izdvajanja čestica daleko efikasniji.

S druge strane, poznato je (Fuks, 1955, [3]) da je granica veličine čestice na koju vrši jednak uticaj sila teže sa jedne, i difuzioforetička sila sa druge strane, negde oko $d = 2 \text{ }\mu\text{m}$. Naime, manje čestice, zbog svojih malih dimenzija i mase, primaju mali broj udara molekula gasa, koji zbog toga ne mogu de se uravnoteže, pa je rezultat toga Braunovo haotično kretanje čestica. Kod većih čestica dolazi do izražaja uravnoteženje broja udara molekula gasa sa svih strana, masa je već dovoljno velika i sila teže i inercijalne sile mogu da deluju. Prema rezultatima Fuksa, srednje kvadratno pomeranje čestice prečnika $2 \text{ }\mu\text{m}$, koja se nalazi u vazduhu na pritisku oko 1000 hPa , pod dejstvom sile teže iznosi $128 \text{ }\mu\text{m/s}$, dok je pod dejstvom toplotne difuzije to pomeranje $5,03 \text{ }\mu\text{m/s}$. Naglašava se da ova, na oko velika razlika u pomeranju u korist dejstva sile teže, ustvari pokazuje jako malu dominaciju sile teže. Ovo je prvi red veličine čestica koje su prestale da se kreću braunovski i počele da se kreću pravolinijski u laminarnoj struji vazduha.

Na osnovu toga, teorijski može da se zaključi da efikasnost izdvajanja čestica prečnika $d = 4,4 \text{ }\mu\text{m}$ u ciklonu \varnothing 164 mm neće ni približno biti $E = 100\%$. Ovu vrednost efikasnosti najverovatnije treba tražiti u sledećem redu veličine čestice – oko $d = 40 \text{ }\mu\text{m}$, jer je za česticu prečnika $20 \text{ }\mu\text{m}$ srednje kvadratno pomeranje pod dejstvom sile teže u istim, već navedenim uslovima $12 \text{ } 100 \text{ }\mu\text{m/s}$, dok je pomeranje pod dejstvom toplotne difuzije $1,66 \text{ }\mu\text{m/s}$, što predstavlja dovoljnu dominaciju dejstva sile teže (dovoljno velika masa).

Ovu teorijsku analizu potvrđuju ispitivanja proizviđača ciklona, na osnovu kojih su urađeni dijagrami frakcione efikasnosti [1].

U ovom trenutku se vrše teorijsko-eksperimentalna istraživanja na Mašinskom fakultetu u Beogradu, čiji je cilj da se nađe pogodan matematički model koji bi dao realnije rezultate vrednosti graničnog prečnika zrna i na taj način omogućio da se odredi efikasnost ciklona bez eksperimentalnog istraživanja na modelu.

4. Literatura

- [1] DORMAN, R. G.: *Dust Control and Air Cleaning*, Pergamon Press, Oxford, 1974.
- [2] VESELOV, S. A.: *Proektirovanie ventilacionih ustanovok predpriatij po hraneniju i pererabotke zerna*, Kolos, Moskva, 1981.
- [3] PIRUMOV, A. I.: *Obespilivanie vozduha*, Strojizdat, Moskva, 1981.
- [4] BOGNER, M., Vuković D.: *Problemi iz mehaničkih i hidromehaničkih operacija*, Mašinski fakultet, Beograd, 1991.
- [5] ŠAŠIĆ, M.: *Transport fluida i čvrstih materija cevima*, Naučna knjiga, Beograd, 1990.
- [6] BRAUER, H., Y. B. G. Varma: *Air Pollution Control Equipment*, Springer-Verlag, Berlin, Heildeberg, New York, 1981.
- [7] BOYSAN, F., W. H. Ayers, J. Swithenbank: *A Fundamental Mathematical Modelling Approach to Cyclone Design*, Trans. I Chem. E, Vol. 60, 1982.

- [8] CHAN, T., M. Lippmann: *Particle Collection Efficiencies of Air Sampling Cyclones: An Empirical Theory*, Environmental Science & Technology, Volume 11, Number 4, April 1977.
- [9] LINDEN, A. J. ter: *Investigations into Cyclone Dust Collectors*, Proc. I. Mech. E., Vol.60, 1949.
- [10] WIJSMAN, J. C., R. van Tol: *Cyclone calculation*, April 1982.
- [11] STRAUSS, W.: *Industrial Gas Cleaning*, Pergamon Press, New York, 1975.
- [12] PANTIĆ, V.: *Odvajачi čvrstih čestica*, Unioninvest, Sarajevo, 1981.
- [13] IJEVLJEV, N. A.: *Eksploatacija sistem pnevmotransporta na derevoobrativajušćih predprijetijih*, Lesnaja promišljenost, 1982.
- [14] SUK-HO, Kang: *Discussion On The Separation Efficiency of Some Fine Powders Suspended In The Air Cyclone*, World Congress III of Chemical Engineering, Tokyo, 1986.
- [15] DRAŠKIĆ, M.: *Ispitivanje laboratorijskog ciklona prečnika 160 mm*, diplomski rad, Beograd, 1991.
- [16] LINDEN, A. J. ter: *Cyclon Dust Collectors for Boilers*, Transactions of the ASME, April 1953.
- [17] CHRIST, A.: *Sinkgeschwindigkeit von Partikeln – Übersichts – Nomogramm*, Escher Wyss Mitteilungen, Jahrgang 47, Nr. 1, Seite 31, 1974.