

ASPECTE GENERALE PRIVIND MIȘCAREA PARTICULELOR SOLIDE ÎN INTERIORUL CICLOANELOR CU ALIMENTARE TANGENTIALĂ, FOLOSITE PENTRU DESPRĂFUIREA USCATĂ A GAZELOR INDUSTRIALE (II)

GENERAL ASPECTS REGARDING THE MOVEMENT OF SOLID PARTICLES INSIDE TANGENTIAL FEED CYCLONES USED FOR DUSTING DRY INDUSTRIAL GASES (II)

Melania CORLECIUC (MITUCĂ)¹, Radu I. IATAN², Ion DURBACA²,
Gheorghe Cosmin CIOCOIU²

¹) Agenția Națională pentru Protecția Mediului – România;
melaniaco171@gmail.com

²) Universitatea POLITEHNICA din București – România;
iatan.radu@gmail.com; ion.durbaca@yahoo.com; cgcocmin@gmail.com

Rezumat: Cicloanele cu alimentare tangențială a gazului impurificat cu particule solide și-au câștigat un binemeritat loc în domeniu. Cercetările efectuate pe parcursul timpului evidențiază acest lucru. Totuși, nu au putut fi precizate relații matematice care să permită proiectarea lor, pentru un caz dat. Pentru mișcarea particulelor în interiorul echipamentului au fost emise mai multe studii, dintre care și în această lucrare vor fi prezentate unele dintre ele. Se evidențiază dificultatea analizei mișcării reale a amestecului de gaze și particule. Configurații aproximative ale cicloanelor trebuie să fie testate pentru cazurile practice, dependente de starea reală. Se impun, în continuare, cercetări științifice care să elucideze unele aspecte intime în fiecare loc de aplicare a cicloanelor cu alimentare tangențială.

Cuvinte cheie: Gaze impurificate cu particule solide, cicloane, alimentare tangențială

Abstract: Cyclones with tangential supply of gas impure with solid particles have earned a well-deserved place in the field. Research carried out over time highlights this. However, mathematical relationships that would allow their design, for a given case, could not be specified. Several studies have been issued for the movement of particles inside the equipment, some of which will be presented in this paper. The difficulty of analyzing the real movement of the mixture of gases and particles is highlighted. Approximate configurations of cyclones should be tested for practical cases, depending on the actual condition. Further, scientific research is required to elucidate some intimate aspects in each place of application of cyclones with tangential feeding.

Keywords: Impure gases with solid particles, cyclones, tangential feeding

INTRODUCERE

Situația practică a cicloanelor cu alimentare tangențială pentru desprăfuirea gazelor uscate, deși cunoscută cu peste o sută de ani în urmă, reprezintă, încă, un interes major.

Dezvoltarea industrială, a scos la iveală condiții noi pentru protejarea mediului exterior, a oamenilor și a tuturor celorlalte viețuitoare, fapt ce impune studii care să răspundă acestor aspecte stringente. În prima parte a lucrării au fost expuse unele rezultate ale cercetărilor efectuate pe parcursul anilor, cu referire la mișcarea particulelor solide în interiorul unui ciclon. În continuare se aduc la cunoștința cititorului interesat alte aspecte obținute, care sperăm să dezvolte noi idei.

ALTE STUDII PENTRU EVALUAREA MIȘCĂRII PARTICULELOR ÎN CICLON

O analiză amplă privind desfășurarea procesului de separare a particulelor solide în interiorul ciclonului este prezentă în lucrarea [1]. În general mișcarea unei particule solide este condiționată de existența forțelor exterioare de gravitație, cele influențate de mișcarea relativă a particulelor și a gazului, precum și forțe de natură electrică sau magnetică. În cadrul lucrării, pentru studiul mișcării particule din gazul impurificat se folosește modelarea numerică. Pentru reducerea costului de calcul, particulele de formă sferică s-au considerat grupate.

Mișcarea unei particule individuale (sau grup) se stabilește folosind echilibrul forțelor exterioare, într-un sistem spațial de referință – ecuația BBO, având în vedere contribuțiile autorilor *Boussinesq J. M.* – 1903, *Basset B. A.* – 1961 și *Oseen W. C.* - 1910, 1913 [1, 2]:

$$m_p \cdot \frac{d\bar{v}_p}{dt} = \bar{F}_W + \bar{F}_M + \bar{F}_S + \bar{F}_G + \bar{F}_{VM} + \bar{F}_P + \bar{F}_B, \quad (1)$$

unde m_p este masa particulei individuale (sau a grupului); \bar{v}_p - viteza spațială a particulei.

Forța aerodinamică \bar{F}_W are expresia [1, 3]:

$$\bar{F}_W = 0,393 \cdot \rho_g \cdot d_p^2 \cdot c_W \cdot v_{rel} \cdot \bar{v}_{rel}, \quad (2)$$

în care viteza relativă se evaluează cu formula [1, 4]:

$$\bar{v}_{rel} = \bar{v}_g - \bar{v}_p; \quad v_{rel} = |\bar{v}_{rel}| = \sqrt{(u_g - u_p)^2 + (v_g - v_p)^2 + (w_g - w_p)^2}; \quad (3)$$

diametrul d_p al particulei; densitatea gazului ρ_g ; viteza liniară relativă, spațială ($v_{rel} \cdot \bar{v}_{rel}$) dintre particulă și curentul de aer din jurul său; \bar{v}_g - viteza spațială a gazului, cu componentele u_g, v_g, w_g în lungul axelor sistemului de referință; \bar{v}_p - viteza spațială a particulei, cu componentele u_p, v_p, w_p în lungul axelor sistemului de referință; c_W – coeficient adimensional, dependent de forma particulei, starea suprafeței și unghiul de incidență, de numărul lui *Reynolds O.* (n. 1842 – d. 1912) ($Re_p = d_p \cdot v_{rel} / \mu_g$; μ_g - vâscozitatea cinematică a gazului) cercetări interesante au fost efectuate în acest sens de *Clift R., Grace R. J., Weber E. M.* (1978) și *Morsi A. S., Alexander J. A.* (1972) [1];

\bar{F}_M – forța *Magnus G. H.* (n. 1802 – d. 1870; fenomenul a fost investigat în anul 1853 [1, 5, 6]):

Aspecte generale privind mișcarea particulelor solide în interiorul cicloanelor cu alimentare tangentială, folosite pentru desprăfuirea uscată a gazelor industriale (II)

$$\bar{F}_M = 0,393 \cdot \rho_g \cdot d_p^2 \cdot c_M \cdot \frac{v_{rel}}{\omega_{rel}} \cdot (\bar{\omega}_{rel} \cdot \bar{v}_{rel}), \quad (4)$$

unde viteza unghiulară relativă are expresia [1, 4]:

$$\bar{\omega}_{rel} = \bar{\omega}_g - \bar{\omega}_p; \quad \omega_{rel} = |\bar{\omega}_{rel}| = \sqrt{(\omega_{gx} - \omega_{px})^2 + (\omega_{gy} - \omega_{py})^2 + (\omega_{gz} - \omega_{pz})^2}; \quad (5)$$

$\bar{\omega}_{rel}$ - viteza unghiulară relativă spațială; $\bar{\omega}_g$ - viteza unghiulară spațială a gazului din jurul particulei în mișcare de rotire, cu componentele sale, $\omega_{gx}, \omega_{gy}, \omega_{gz}$; $\bar{\omega}_p$ - viteza unghiulară spațială a particulei în mișcare de rotire, cu componentele sale $\omega_{px}, \omega_{py}, \omega_{pz}$; c_M coeficientul forței **Magnus G. H.** calculat cu relațiile (conform **Tsuji Y., Morikawa Y., Mizuno O.** (1985) [1]): $c_M = (0,4 \pm 0,1) \cdot \sigma_M$ pentru $\sigma_M < 1,0$, respectiv $c_M = 0,4 \pm 0,1$ pentru $\sigma_M \geq 1,0$, unde $\sigma_M = 0,5 \cdot d_p \cdot \omega_{rel} / v_{rel}$.

Notă:

a) Se consideră o particulă al cărui centru se află în originea unui sistem spațial de coordonate, rotindu-se cu viteza unghiulară ω_y în sensul acelor de ceasornic în jurul axei Oy . Mișcarea fluxului de gaz se află în lungul axei Ox cu viteza u_x . În acest caz asupra particulei se manifestă o presiune înaltă la $3 \cdot \pi / 2$ și o presiune joasă la $\pi / 2$. Prin urmare, în lungul axei Oz , dinspre presiunea înaltă către presiunea joasă, se manifestă forța:

$$F_M^\bullet = \frac{\pi}{2} \cdot d_p^2 \cdot \rho_g \cdot \left[\left(u_x + \frac{\omega_y}{2} \cdot d_p \right)^2 - \left(u_x - \frac{\omega_y}{2} \cdot d_p \right)^2 \right] = \pi \cdot d_p^3 \cdot \rho_g \cdot u_x \cdot \omega_y. \quad (6)$$

În anul 1672, **Newton I.** (n. 1643 – d. 1727) a remarcat efectul, observând deplasarea mingii la partidele de tenis, iar **Robins B.** (n. 1706 – d.1751), în anul 1742, om de știință și inginer militar englez, a studiat comportarea ghiulelelor și proiectilelor lansate [7]. Este cunoscut faptul că țevile de tun sunt prevăzute cu ghinturi care dau proiectilelor o mișcare de rotație în jurul axelor proprii, pentru a avea stabilitatea traiectoriei.

Dacă viteza de rotire este suficient de mare, forța **Magnus G. H.** poate afecta semnificativ mișcarea particulelor. Un astfel de fenomen poate fi observat în cazul fluxurilor de particule în gazul care curge prin canale sau prin țevi. La contactul particulelor cu peretele ciclonului frecarea este relativ mare.

b) În lucrarea [8], pentru un cilindru de diametru d_c aflat în mișcare de rotire în jurul axei sale, staționare, cu viteza unghiulară $\bar{\omega}_c$, situat într-un flux de gaz caracterizat de viteza uniformă \bar{u}_g , forța **Magnus G. H.** are forma (**Michaelides E.** (2006) [8]):

$$\bar{F}_M = \pi \cdot d_c \cdot \rho_g^2 \cdot (\bar{u}_g \times \bar{\omega}_c). \quad (7)$$

Pentru o sferă staționară de diametru d_p , rotindu-se în jurul centrului său cu viteza unghiulară $\bar{\omega}_p$, forța **Magnus G. H.**, se exprimă prin relația (**Rubinow S., Keller B. J.** - (1961) [8]):

$$\bar{F}_M = 0,393 \cdot d_p^3 \cdot \rho_g \cdot (\bar{u}_g \times \bar{\omega}_p), \quad (8)$$

în timp ce pentru o particulă în mișcare liniară cu deplasarea gazului se folosește formula:

$$\bar{F}_M = 0,393 \cdot d_p^3 \cdot \rho_g \cdot [(\bar{u}_g - \bar{u}_p) \times \bar{\omega}_p]. \quad (9)$$

Forța **Saffman G. P.** (n. 1931 – d. 2008) [9], scrisă sub forma [10]:

$$F_S = 1,615 \cdot \rho_g \cdot \sqrt{\mu_g} \cdot d_p^2 \cdot v_{rel} \cdot \sqrt{\left| \frac{\partial u_g}{\partial y} \right|}, \quad (10)$$

unde $\left| \frac{\partial u_g}{\partial y} \right|$ reprezintă gradientul vitezei fluxului de gaz în lungul axei Oy . Pe direcția normală la sensul curgerii se manifestă o distribuție neuniformă a presiunii care acționează asupra particulei, respectiv forța creată pe suprafața acesteia.

Valabilitatea relației de mai sus este limitată la cazul unui flux de gaz cu forfecare liniară și a unui interval mic de particule, respectiv numerele **Reynolds O.** (n. 1842 – d. 1912):

$$R_{e\omega} = \frac{1}{4} \cdot \frac{d_p^2 \cdot \omega_{rel}}{\mu_g} \ll 1; R_{ep} \ll \sqrt{R_{eS}}; R_{eS} = \frac{d_p^2}{\mu_g} \cdot \left| \frac{\partial u_g}{\partial y} \right|. \quad (11)$$

Pentru caracterizarea unui număr mai larg de particule sunt sugerate informații utile date de **Dandy S. D., Dwyer A. H.** (1990) și **Mei R.** (1992) [1].

Notă: O altă formulă, cu aceeași formă structurală, este prezentată în lucrarea [11].

În cazul raportării la un sistem spațial de referință, forța **Saffman G. P.** are forma [1]:

$$\bar{F}_S = \frac{1}{4} \cdot \rho_g \cdot d_p^2 \cdot \left[\sqrt{v_g} / \sqrt{|\bar{\omega}_g|} \right] \cdot c_S \cdot (\bar{v}_{rel} \cdot \bar{\omega}_g), \quad (12)$$

în care c_S este un coeficient, prezentat în detaliu, în raport cu R_{ep} și R_{eS} , de către **Frank Th.** (2001) [12].

Notă: Cercetările autorilor **Wang Q., Squires D. K., Chen M., McLaughlin B. J.** – (1997), respectiv **Xiaodong L., Jianhua Y., Yuchun C., Mingjiang N., Kefa C.** – (2003) [13], reflectă faptul că forța **Saffman G. P.** are influență importantă pentru particulele mici, în ansamblul global. Este motivul pentru care **Li A.** și **Ahmadi G.** (1992), susțin includerea forței **Saffman G. P.** în echilibrul celorlate forțe care acționează asupra particulelor gazului impurificat pătruns în ciclon [13].

Forța de greutate a particulei de formă sferică \bar{F}_G se evaluează cu expresia [1, 10]:

$$\bar{F}_G = 0,523 \cdot \rho_p \cdot d_p^3 \cdot \bar{g}, \quad (13)$$

Aspecte generale privind mișcarea particulelor solide în interiorul cicloanelor cu alimentare tangentială, folosite pentru desprăfuirea uscată a gazelor industriale (II)

unde \bar{g} reprezintă vectorul accelerației gravitației. Se remarcă faptul că forța gravitației are influență mai pronunțată asupra particulelor mari și cu densitate mai ridicată, în timp ce pentru particulele mai mici această influență este mai redusă.

Notă: Dacă se are în vedere și densitatea gazului în care se mișcă pe verticală particula sferică, atunci expresia forței gravitației se prezintă sub forma [3, 11]:

$$\bar{F}_G = 0,523 \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot d_p^3 \cdot \bar{g}. \quad (14)$$

Forța masei virtuale se apreciază pe baza accelerațiilor gazului și particulelor în mișcare, având expresia (Lopez de Bertodano M., Morage J. F., Drew A. D., Lahey T. R. (2004) [1]):

$$\bar{F}_{VM} = 0,262 \cdot c_{VM} \cdot \rho_g \cdot d_p^3 \cdot \left(d\bar{v}_p / dt - d\bar{v}_g / dt \right) \quad (15)$$

Au existat numeroase discuții asupra existenței aceste forțe a masei virtuale și a efectului acesteia, respectiv care este valoarea factorului c_{VM} (Drew A. D., Cheng L., Lahey T. R. (1979) și Kazimi S. M., No C. H. (1986) [1]). Modelarea 3D a demonstrat existența forței menționate, iar valoarea $c_{VM} = 1,0$ este acceptată (Magnandet M. J. J., (1997), Domgin F. J., Huilier F. G. D., Karl J. J. Gardin P., Burnage H. (1998), Huilier F. G. D., Launay K. (1999) [1]).

În mișcarea particulei în fluxul de gaz se dezvoltă un gradient de presiune Δp și, ca urmare, o forță corespunzătoare care acționează asupra acesteia [1]:

$$\bar{F}_P = - \left(m_g / \rho_g \right) \cdot \Delta p = -0,523 \cdot d_p^3 \cdot \Delta p. \quad (16)$$

Forța **Basset B. A.**, \bar{F}_B , se stabilește cu formula [1], incluzând comportarea particulei în mișcare pe o durată anume de timp:

$$\bar{F}_B = \frac{18 \cdot \mu_g}{d_p^2 \cdot \rho_p} \cdot \int_0^t K \cdot (t - \tau) \cdot \frac{d(\bar{v}_g - \bar{v}_p)}{d\tau} \cdot dt, \quad (17)$$

unde:

$$K(t - \tau) = \left\{ \left[\frac{4 \cdot \pi \cdot (t - \tau) \cdot v_g}{d_p^2} \right]^{1/4} + \sqrt{\pi \cdot (t - \tau)^2 \cdot \frac{|\bar{v}_g - \bar{v}_p|^3}{d_p \cdot \mu_g \cdot f_H^3}} \right\}^{-2}; \quad (18)$$

$$f_H = 0,75 + 0,105 \cdot Re_{p,\tau}. \quad (19)$$

Notă: Forța **Basset B. A.** a reprezentat subiectul multor cercetări ale autorilor: Liang L., Michaelides E. E. (1992), Manaudet M. J. J. (1997), Kim I., Elghobaski S., Sirignano A. W. (1998), Domgin F. J., Huilier D. G. F., Karl J. J., Gardin P., Burnage H. (1998), Huilier D. G. F., Launay K. (1999) [1]. Particulele au fost considerate nedeformabile și sferice, raportul între densități fiind considerat $\rho_p / \rho_g \approx 10^3$. În lucrarea autorilor Chung N. J., Troutt R. T.

(1988) [1] pentru ordinul $\rho_g / \rho_p \approx 10^{-3}$, forța de masă virtuală și cea a gradientului de presiune sunt neglijate, respectiv pentru ordinul $\sqrt{\rho_g / \rho_p}$ și forța **Basset** $B. A.$

Înlocuind expresiile forțelor precizate în cele ce preced, după împărțirea $\bar{F}_{VM} / (m_p + 0,5 \cdot m_g)$, se ajunge la o ecuație diferențială obișnuită. Luând în considerare sistemul spațial de referință, acceptat, se poate scrie [1, 4]:

$$\frac{d}{dt} [x_p, y_p, z_p] = [u_p, v_p, w_p], \quad (20)$$

unde x_p, y_p, z_p reprezintă deplasările particulei în lungul axelor sistemului tri-ortogonal, respectiv:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ w_p \end{bmatrix} &= \frac{3}{4} \cdot \frac{\rho_g}{(\rho_p + 0,5 \cdot c_{VM} \cdot \rho_g)} \cdot v_{rel} \cdot c_w (Re_p) \cdot \begin{bmatrix} u_g - u_p \\ v_g - v_p \\ w_g - z_p \end{bmatrix} + \\ &+ \frac{v_{rel}}{\omega_{rel}} \cdot c_M (\sigma_M) \cdot \begin{bmatrix} (v_g - v_p) \cdot (\omega_{zp} - 0,5 \cdot \omega_{zg}) - (w_g - w_p) \cdot (\omega_{yp} - 0,5 \cdot \omega_{yg}) \\ (w_g - w_p) \cdot (\omega_{xp} - 0,5 \cdot \omega_{xg}) - (u_g - u_p) \cdot (\omega_{zp} - 0,5 \cdot \omega_{zg}) \\ (u_g - u_p) \cdot (\omega_{yp} - 0,5 \cdot \omega_{yg}) - (v_g - v_p) \cdot (\omega_{xp} - 0,5 \cdot \omega_{xg}) \end{bmatrix} + \\ &+ \frac{2 \cdot \sqrt{\mu_g}}{\pi \cdot \sqrt{|\bar{\omega}_g|}} \cdot c_S (Re_p, Re_S) \cdot \begin{bmatrix} (v_g - v_p) \cdot \omega_{zg} - (w_g - w_p) \cdot \omega_{yg} \\ (v_g - w_p) \cdot \omega_{xg} - (u_g - u_p) \cdot \omega_{zg} \\ (u_g - u_p) \cdot \omega_{yg} - (v_g - v_p) \cdot \omega_{xg} \end{bmatrix} - \\ &- \frac{1 + 0,5 \cdot c_{VM}}{\rho_p + 0,5 \cdot c_{VM} \cdot \rho_g} \cdot \begin{bmatrix} \partial p / \partial x \\ \partial p / \partial y \\ \partial p / \partial z \end{bmatrix} + \frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_p + 0,5 \cdot c_{VM} \cdot \rho_g} \cdot \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix}, \quad (21) \end{aligned}$$

în care pentru v_{rel} se folosește egalitatea (3), iar pentru celelalte mărimi:

$$Re_p = \frac{d_p \cdot v_{rel}}{\mu_g}; \quad Re_\omega = \frac{1}{4} \cdot \frac{d_p^2 \cdot \omega_{rel}^\bullet}{\mu_g}; \quad Re_S = \frac{d_p^2}{\mu_g} \cdot |rot \bar{v}_g|; \quad (22)$$

$$\omega_{rel}^\bullet = \sqrt{(0,5 \cdot \omega_{gx} - \omega_{px})^2 + (0,5 \cdot \omega_{gy} - \omega_{py})^2 + (0,5 \cdot \omega_{gz} - \omega_{pz})^2}. \quad (23)$$

Dacă condițiile inițiale ale poziției particulelor și viteza acestora sunt bine cunoscute la t_0 , atunci viteza particulelor la $t_1 = t_0 + \Delta t$ este rezultatul soluției numerice a ecuației (21). Calculele numerice se stabilesc folosind metoda **Runge C. D. T.** (n. 1856 – 1927) – **Kutta W. M.**

Aspecte generale privind mișcarea particulelor solide în interiorul cicloanelor cu alimentare tangentială, folosite pentru desprăfuirea uscată a gazelor industriale (II)

(n. 1867 – d. 1944) de ordinul al patrulea. Rezolvarea ecuației (3. 46) se efectuează ca și ecuația (21).

Notă: Precizările din cele ce preced se referă la mișcarea particulelor până la zona adiacentă cu peretele ciclonului, caz în care analiza respectivă se realizează într-un alt mod adecvat [1].



În lucrările [14, 15] se studiază **cazul curgerii laminare a fluxului de gaz impurificat** la intrarea în gura de alimentare. Se acceptă relația de calcul pentru viteza de intrarea în gura de alimentare a ciclonului $v_{t2} = v_{gi}$ (vezi , în timp ce în incinta părții cilindrice, pe traiectoria de deplasare caracterizată de raza r și unghiul la centru θ , particula se află sub acțiunea vitezei tangențiale v_{θ} , respectiv a celei radiale. Sub acțiunea forței centrifuge la o rază curentă r , expresia acesteia este [15]:

$$u_r = 0,106 \cdot F_c / (\mu_g \cdot d_p). \quad (24)$$

Pentru un unghi la centru θ , măsurat de la planul intrării particulei în ciclon, când $u_{\theta} = v_{\theta}$, expresia de calcul al forței centrifuge, pentru o particulă de formă sferică , are forma [14, 15]:

$$F_c = \frac{\pi}{6} \cdot d_p^3 \cdot \rho_p \cdot \frac{Q_v^2}{b^2 \cdot r^3 \cdot [\ln(r_2/r_1)]^2}, \quad (25)$$

care introdusă în expresia pentru stabilirea valorii vitezei radiale se ajunge la:

$$u_r = \frac{F_c}{3 \cdot \pi \cdot \mu_g \cdot d_p} = \frac{\rho_p \cdot Q_v^2 \cdot d_p^2}{18 \cdot \mu_g \cdot r^3 \cdot b^2 \cdot [\ln(r_2/r_1)]^2}, \quad (26)$$

$r_1 = D_e/2$; $r_2 = D/2$, b având semnificația lățimii gurii de alimentare cu gaz impurificat în ciclon.

Notă: În relațiile anterioare se apreciază că fluxul de gaz impurificat are curgerea laminară pe suprafața $b \cdot (r_2 - r_1)$, la intrarea în ciclon.

Distanța parcursă de particulă în direcția θ , într-un interval de timp dt , este $v_{\theta} \cdot dt = r \cdot d\theta$. Totodată, distanța parcursă în direcția r , pe durata dt , este $dr = v_r \cdot dt$. Din relațiile anterioare se deduce următoarea egalitate [14, 15]:

$$\frac{r \cdot d\theta}{dr} = \frac{v_{\theta}}{v_r}, \quad (27)$$

cea ce conduce la ecuația diferențială care descrie traiectoria particulei [14, 15]:

$$\frac{d\theta}{dr} = \frac{18 \cdot \mu_g \cdot b \cdot \ln(r_2/r_1)}{\rho_p \cdot Q_v \cdot d_p^2} \cdot r. \quad (28)$$

Notă: Conform [16] expresia (28) este atribuită lui **Benitz J. R.** (1993).

Prin integrarea ecuației diferențiale (28), pentru $r \in [r_2, r_3]$, se ajunge la egalitatea :

$$\theta_f = \frac{9 \cdot \mu_g \cdot b \cdot \ln(r_2/r_1)}{\rho_p \cdot Q_v \cdot d_p^2} \cdot (r_2^2 - r_3^2), \quad (29)$$

r_3 reprezentând raza de intrare a particulei în secțiunea de alimentare cu gaz impurificat.

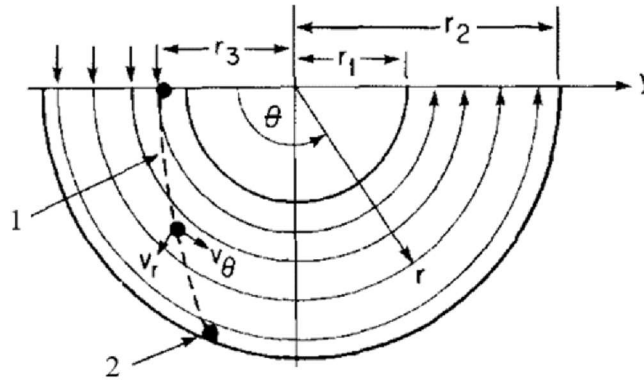


Fig. 1. La curgerea laminară a fluxului de gaz impurificat [14]

1 – intrarea particulei în interiorul ciclului; 2 – atingerea interiorului ciclului de către particular

În condiția existenței egalității (29), eficacitatea ciclului se poate exprima sub forma [16]:

$$\eta(d_p) = \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{\rho_p \cdot Q_v \cdot d_p^2 \cdot \theta_f}{9 \cdot \mu_g \cdot b \cdot r_2^2 \cdot \ln(r_2/r_1)}} \right\} / (1 - r_1/r_2). \quad (30)$$

Din egalitatea (3. 55) se poate deduce raza r_3 careia îi corespunde unghiul θ_f :

$$r_3 = \sqrt{r_2^2 - \frac{\rho_p \cdot Q_v \cdot d_p^2 \cdot \theta_f}{9 \cdot \mu_g \cdot b \cdot \ln(r_2/r_1)}}. \quad (31)$$

Aspecte generale privind mișcarea particulelor solide în interiorul cicloanelor cu alimentare tangentială, folosite pentru desprăfuirea uscată a gazelor industriale (II)

Toate particulele care intră în ciclon la $r \geq r_3$ lovesc peretele pentru $0 \leq \theta \leq \theta_f$. Dacă se acceptă că $r_3 = r_1$:

$$\theta_f = \frac{9 \cdot \mu_g \cdot b \cdot \ln(r_2/r_1)}{\rho_p \cdot Q_v \cdot d_p^2} \cdot (r_2^2 - r_1^2). \quad (32)$$

Dacă alături de expresia forței centrifuge (25) se ia în considerare și relația pentru forța de greutate a particulei sferice de diametru d_p , $F_g = (\pi/6) \cdot \rho_p \cdot d_p^3 \cdot g$, se poate scrie:

$$\frac{F_c}{F_g} = \frac{Q_v^2}{g \cdot r^3 \cdot W^2 \cdot [\ln(r_2/r_1)]^2}, \quad (33)$$

ceea ce confirmă faptul că $F_c/F_g \gg 1,0$ [14].



Notă: Modelarea mișcării turbulente a gazului impurificat în ciclon este foarte dificilă [17].

a) În cadrul aceleiași lucrări [14], analizându-se **circulația turbulentă a amestecului de gaze și particule**, numărul particulelor colectate $N(\theta)$ pentru un unghi oarecare θ și numărul particulelor la intrarea în ciclon N_0 are relația:

$$N_p(\theta) = N_{p0} \cdot \exp\left(-\frac{v_{r2}}{v_{\theta 2}} \cdot \frac{2 \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \theta\right). \quad (34)$$

Eficiența colectării pentru unghiul θ_f este de forma:

$$\eta(d_p) = 1 - \frac{N_p(\theta_f)}{N_{p0}} = 1 - \exp\left[-\frac{2 \cdot v_{r2} \cdot r_2^2 \cdot \theta_f}{v_{\theta 2} \cdot (r_2^2 - r_1^2)}\right], \quad (35)$$

în care se remarcă expresiile vitezelor implicate:

$$v_{\theta 2} = \frac{Q}{b \cdot r_2 \cdot \ln(r_2/r_1)}; \quad v_{r2} = \frac{\rho_p \cdot Q^2 \cdot d_p^2}{18 \cdot \mu_g \cdot r_2^3 \cdot b^2 \cdot [\ln(r_2/r_1)]^2}, \quad (36)$$

astfel încât relația pentru evaluarea eficienței ciclonului devine:

$$\eta(d_p) = 1 - \exp\left[-\frac{\rho_p \cdot Q^2 \cdot d_p^2 \cdot \theta_f}{9 \cdot \mu_g \cdot b \cdot (r_2^2 - r_1^2) \cdot \ln(r_2/r_1)}\right]. \quad (37)$$

Din egalitatea anterioară, prin impunerea unei anumite valori pentru eficiență, se determină valoarea unghiului θ_f .

b) În lucrarea [15] pentru analiza dinamicii particulei în cazul unui **regim turbulent al gazelor în ciclon**, spațiul radial parcurs în durata dt are forma:

$$dr = v_{r2} \cdot dt = \left(v_{r2} \cdot r_2 / v_{\theta 2} \right) \cdot d\theta, \quad (38)$$

în care v_{r2} este viteza radială la nivelul razei r_2 .

Diminuarea fracției granulometrice N_p în deschiderea $d\theta$ se evaluează folosind egalitatea:

$$-\frac{dN_p}{N_p} = \frac{dr}{r_2 - r_1} = \frac{v_{r2}}{v_{\theta 2}} \cdot \frac{r_2}{r_2 - r_1} \cdot d\theta, \quad (39)$$

care, după integrare între $\theta=0$ și o valoare curentă θ a unghiului, se ajunge la:

$$N_p = N_{p0} \cdot \exp \left(\frac{v_{r2}}{v_{\theta 2}} \cdot \frac{r_2}{r_2 - r_1} \cdot \theta \right), \quad (40)$$

N_{p0} reprezentând numărul inițial de particule, la $\theta=0$.

Eficiența ciclonului poate fi estimată cu relația:

$$\eta(d_p) = 1 - \frac{N_p(\theta_f)}{N_{p0}} = 1 - \exp \left[- \frac{v_{r2} \cdot r_2 \cdot \theta_f}{v_{\theta 2} \cdot (r_2 - r_1)} \right]. \quad (41)$$

După înlocuirea expresiilor (36) în egalitatea anterioară se stabilește aceeași relație (37) pentru eficiența ciclonului.



Proiectarea cicloanelor ține seama de geometria lor, debitul de gaz impurificat și numărul de ture/rotații în mișcarea descendentă. Teoria dezvoltată de **Leith D.** și **Licht W.** (1972) [18] s-a dovedit utilă în proiectarea practică a cicloanelor. În cadrul acestei teorii se ține seama de faptul că profilul de viteză într-un ciclon nu aderă strict la forma ideală, uniformă. În acest sens forma profilului de viteză este $v_{\theta} \cdot r^n = ct$. Experimental s-a constatat că $n = 0,5 \dots 0,9$, în funcție de dimensiunile particulelor și temperatură [14].

CONCLUZII

În cele de mai sus se dezvoltă analiza mișcării particulelor solide în ciclonul cu alimentare tangențială. Se au în vedere, de această dată, șapte forțe care acționează asupra unei particule. Mișcarea se studiază într-un sistem spațial de referință. Pe baza ipotezei de curgere laminară a amestecului de gaz și particule în gura de alimentare a ciclonului, se oferă și o relație pentru evaluarea eficienței desprăfuirii. Acceptând curgerea turbulentă se prezintă o altă formulă de calcul al eficienței separării particulelor solide.

Datele oferite în cadrul articolului pot fi comparate și dezvoltate atât din punct de vedere teoretic, cât și prin experimentări adecvate unor cazuri particulare.

BIBLIOGRAFIE

1. **Shalaby H. H.**, *On the potential of large eddy simulation to simulate cyclone separators*, Dissertation, Chemnitz University of Technology, Germany, 2007.
2. **Bernd G.**, *Grobstruktursimulation turbulenter mehrphasenströmungen mit und ohne phasenübergang*, Dissertation, Universität Darmstadt, Germany, 2004.
3. **Braudauer J. K. M.**, *Experimentelle untersuchungen zur separation von korngemischen in einen stabmagnetfilter*, Dissertation, Universität Stuttgart, Germany, Oct. 2017.
4. **Shalaby H., Wozniak K., Wozniak G.**, *Numerical calculation of particle-laden cyclone separator flow using LES*, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2, nr. 4, 2008, p. 382 – 392.
5. x x x https://math.fandom.com/ro/wiki/Efectul_Magnus;
https://en.wikipedia.org/wiki/Magnus_effect.
6. **Ristea M.**, *Contribuții la studiul procesului de separare aerodinamică a amestecurilor solide cu aplicații în industria alimentară*, Teză de doctorat, Universitatea “Vasile Alecsandri” din Bacău, 2014.
7. x x x <https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Robins/>
8. **Zhang J., Yan Sh., Yuan D., Alici G., Nguyen T. N.**, *Fundamentals and applications of inertial microfluidics: A review*, University of Wollongong, Research Online, Faculty of Engineering of Information Sciences – Paper, Part A, Australia, 2016, p. 1 – 38 - <http://ro.uow.edu.au/eispapers/4850>
9. **Crowdy D., Tanveer S.**, *Philip Geoffrey Saffman*, Published by the Royal Society, 2014, p. 377 – 395 - <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rsbm.2014.0021>
10. **Sun Ch., Guo Y., Li Q., Shen Zh., Zheng T., Wang H., Ren W., Lei Z., Zhong Y.**, *Numerical simulation of Saffman force controlled inclusions removal during the ESR process*, Metals, 10, 2020, p. 1 – 14.
11. **Zou Y.X., Cheng H., Zhang L. Ch., Zhao Z. Y.**, *Effects of the Magnus and Saffman forces on the saltation trajectories of sand grain*, Geomorphology, 90, 2007, p. 11 – 22.
12. **Frank Th.**, *Parallele algorithmen für die numerische simulation dreidimensionaler, disperser mehrphasenströmungen und deren anwendung in der verfahrenstechnik*, Dissertation, Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Germany, Oct. 2001.
13. **Shukla K. S., Shukla P., Ghosh P.**, *The effect of modeling of velocity fluctuations on prediction of collections efficiency of cyclone separators*, Applied Mathematical Modelling, 2013, nr.37, p. 5774 – 5789.
14. x x x *Removal of particles from gas streams*, ch. 7, p. 391 – 478 (<https://authors.library.caltech.edu/25069/9/AirPollution88-Ch7.pdf>).
15. x x x *Cyclonic devices*, cap. 8, p. 333 – 369 (<http://calliope.dem.uniud.it/CLASS/IMP-CHIM/Benitez-cap8.PDF>).

16. **Ibhadode O. O., Ogedengbe B. O. E., Rosen A. M.,** *Performance characterization of gas – solid cyclone for separation of particle from syngas produced from food waste gasifier plant*, European Journal of Sustainable Development Research, 1:2, 13, 2017, p. 1 – 14 (ISSN: 25 – 4742).
17. **Cortés Cr., Gil A.,** *Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators*, Progress in Energy and Combustion Science, 33, 2007, p. 409 – 452.
18. **Leith D., Licht W.,** *Collection efficiency of cyclone type particle collectors, a new theoretical approach*, AIChE Symp., Series, vol.68, 1972, p. 196 (citare în [19]).
19. **Behrouzi P.,** *Performance of multicell axial – centry cyclones for industrial gas cleaning*, Thesis, Department of Mechanical Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine, 1988, London, U.K.