

Uticaj promenljivih uslova rada na projektovanje i eksploataciju sistema transporta pneumatskim žlebom u termoelektranama

Dr Predrag Marjanović, dipl. inž., i mr Miroslav Stanojević, dipl. inž.,
 Mašinski fakultet, Beograd, Aleksandar Vlačić, dipl. inž., i Dragan Popović, dipl. inž.,
 TE "Nikola Tesla" B, Obrenovac

Efikasnost sistema transporta pneumatskim žlebom zavisi pre svega od nekoliko osnovnih elemenata usvojenih ili izračunatih pri projektovanju: konstrukcionih parametara žleba, performansi strujne mašine i fizičko-hemijskih karakteristika materijala koji se transportuje. Međutim, u uslovima eksploatacije u termoelektranama dolazi do postepenih ili naglih promena uslova rada, zbog promene udela i sastava pepela kao i zbog promene zaprljanosti porozne pregrade koji mogu da dovedu do smanjenja propusne moći žleba, ili čak do njegovog potpunog začepjenja. Na osnovu obavljenih eksperimenata na laboratorijskom postrojenju (na Mašinskom fakultetu u Beogradu) i merenja na postrojenju (u TE "Nikola Tesla" B), izvršena je analiza uticaja ovih uslova na ponašanje sistema transporta.

1. Osnove o primeni procesa fluidizacije u pneumatskom žlebu

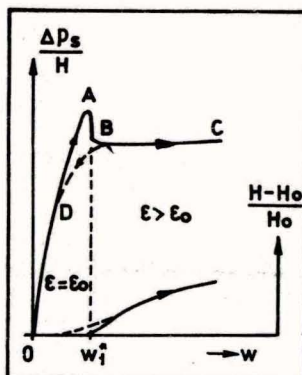
Transport materijala pneumatskim žlebom spada u oblast pneumatskog transporta koji se ostvaruje na bazi fluidizacije. U procesu fluidizacije pri strujanju vazduha kroz materijal formira se fluidizovani sloj čiji se karakteristični parametri menjaju sa promenom brzine strujanja.

Karakteristični dijagram procesa fluidizacije, tj. zavisnost između jediničnog pada pritiska (pada pritiska po jedinici visine sloja materijala) od brzine fluidizacije za dva tipa materijala prikazan je na slikama 1a i 1b.

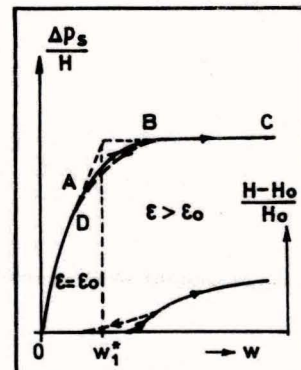
Povećanjem brzine w povećava se i jedinični pad pritiska (krive OA i OA' na dijagramima). Ta zavisnost je linearna ako je režim strujanja kroz prostor između čestica laminaran (za sitnije čestice), a nelinearan za turbulentan režim strujanja (za krupnije materijale). U ovom području, hidrodinamičke sile koje se ostvaruju pri strujanju vazduha nisu dovoljne da izazovu promenu poroznosti ni po veličini ni po "obliku," pa se ono naziva fluidizacijom pri stalnoj poroznosti ($\epsilon = \epsilon_0$), prema [1].

Granična vrednost brzine pri kojoj se ostvaruju hidrodinamičke sile dovoljne da poremete položaj čestica ostvaren u stanju mirovanja predstavlja prvu kritičnu brzinu fluidizacije w_1^* . Tada se čestice postavljaju u položaj u kome pružaju najmanji otpor strujanju vazduha kroz prostor između njih. Na taj način se poroznost promenila po veličini samo naznato, ali je zato promena po "obliku" značajna i utiče na smanjenje jediničnog pada pritiska (kriva AB na slici 1a).

Međutim, postoje materijali kod kojih se ne pojavljuje ovo karakteristično smanjenje jediničnog pada pritiska, zbog fizičkih svojstava čestica. Takođe je moguće, u zavisnosti od načina formiranja početnog nasutog stanja, da se za jedan materijal dobije i dijagram sa slike 1a i dijagram sa slike 1b. Za dijagram sa slike 1b karakteristično je da se pri brzini u tački A' formira jedan ili više kanala kroz sloj materijala tako da se onda rast jediničnog pada pritiska sa povećanjem brzine usporava, jer veća količina vazduha struji sada kroz kanale. Ovakav režim strujanja narušava se kada brzina dostigne vrednost u tački B', tj. kada se izvrši homogenizacija sloja.



Slika 1a



Slika 1b

Posle tačaka B i B', daljim povećanjem brzine, raste pad pritiska kroz sloj Δp_s , ali i visina H sloja, tj. poroznost ε . Međutim, jedinični pad pritiska $\Delta p_s/H$ ostaje približno konstantan i ovo je područje fluidizacije pri promenljivoj poroznosti ($\varepsilon > \varepsilon_0$). To strujanje ima sve odlike turbulentnog režima sa izraženim fluktuacijama, tako da za stalnu vrednost jediničnog pada pritiska u ovom području treba uzeti njegovu prosečnu vrednost. Fluktuacija visine, pa i jediničnog pada pritiska, se povećavaju sa povećanjem brzine w i mogu da dostignu i $\pm 30\%$.

Smanjenjem brzine od tačke C do B, odnosno B', svi strujni parametri se menjaju identično kao i pri povećanju brzine od B, odnosno B', do C. Međutim, smanjivanjem brzine od B do D (slika 1a) jedinični pad pritiska je znatno manji od onog dobijenog povećanjem brzine, jer struja vazduha ne dozvoljava formiranje čvrste veze između čestica. Tačka D može da bude i na krivoj OA, ali i da se poklopi sa tačkom O.

Za materijal na slici 1b, smanjenjem brzine od B' do D jedinični pad pritiska može da bude manji, ali i veći od onog dobijenog povećanjem brzine od A' do B', što zavisi od kanala koji su tom prilikom stvoreni.

Za materijal na slici 1a, određivanje prve kritične brzine w_1^* je jasno – to je brzina određena tačkama A i B. Međutim za materijal na slici 1b to je nešto komplikovanije. Naime, to očigledno nije brzina u tačkama A' i B', već vrednost između njih. Ona se dobija u preseku produžetaka krivih OA' i B'C. Treba naglasiti da će se režim strujanja, karakterističan za prvu kritičnu brzinu fluidizacije, u ovom slučaju ostvariti samo ako se najpre brzina poveća do B' pa zatim smanji do izračunate vrednosti w_1^* .

U donjem delu dijagrama na slici 1a nalaze se krive promene relativne ekspanzije sloja $(H-H_0)/H_0$. Trend promene ovih krivih u svemu prati fenomene koji su do sada opisani.

Za transport pneumatskim žlebom koristi se područje fluidizacije pri promenljivoj poroznosti. Preporučena vrednost brzine kojom treba da se prostrujava sloj materijala je $w_p = 1,5 w_1^*$. Međutim, ova preporučena vrednost, kao i izložen opis ponašanja materijala pri fluidizaciji, važe za materijal jednolike krupnoće i fizičko-hemijskog sastava. U slučaju fluidizacije materijala nejednolike krupnoće i fizičko-hemijskog sastava, javljaju se i dopunski efekti. Naime, pri prostrujavanju brzinom koja odgovara prvoj kritičnoj brzini fluidizacije za sitnije i/ili lakše čestice, one će "isplivati" na površinu sloja i taj deo sloja će imati sve karakteristike početka fluidizacije pri promenljivoj poroznosti. Donji deo sloja, međutim, ostaje u području fluidizacije pri stalnoj poroznosti koja nije pogodna za transport pneumatskim žlebom. Prema tome, za ovakve materijale, vizuelno, a i grafički, određena prva kritična brzina fluidizacije nije merodavna za određivanje potrebne

brzine wp za transport pneumatskim žlebom. Pri toj brzini će donji sloj da ostane nepokretan (za izuzetno heterogene materijale). Pošto su uzorci pepela iz TE "Nikola Tesla" heterogenog sastava i po krupnoći i po fizičko-hemijskom sastavu, ovim fenomenima je posvećena pažnja u analizi eksperimentalnih rezultata.

2. Parametri za proračun pneumatskog žleba

Osnovni parametri za proračun pneumatskog žleba su ukupni pad pritiska (Δp_k) i potrebna brzina fluidizacije (w_p). Ukupni pad pritiska Δp_k predstavlja zbir pada pritiska kroz sloj pepela (Δp_s) i pada pritiska kroz poroznu pregradu – u ovom slučaju filc (Δp_F).

Ukupni pad pritiska na eksperimentalnoj instalaciji meren je direktno pomoću natpritisaka p_{k1} i p_{k2} (slika 2).

Pad pritiska kroz sloj pepela izračunat je na osnovu izmerenih i prethodno izračunatih parametara:

$$\Delta p_s = \Delta p_k - \Delta p_F = (p_{k1} - p_{k2}) - \zeta_{F0} w \quad (\text{mmH}_2\text{O})$$

gde je ζ_{F0} koeficijent otpora filca (određen eksperimentalno), a w brzina fluidizacije.

Brzina fluidizacije računata je u odnosu na srednju vrednost pritiska u sloju:

$$p_m = \frac{1}{2}(p_1 + p_2) \quad (\text{Pa})$$

gde je $p_1 = p_a + p_{k1} - \Delta p_F$ (Pa) pritisak na dnu sloja, a $p_2 = p_a + p_{k2}$ (Pa) pritisak na vrhu sloja.

Zatim je izračunata gustina vazduha na tom pritisku:

$$\rho_f = \frac{p_m}{RT_f} \quad (\text{kg/m}^3)$$

i, najзад, brzina kojom je obavljena fluidizacija:

$$w = \frac{m_f}{\rho_f A} \quad (\text{m/s}) \text{ ili } (\text{cm/s}).$$

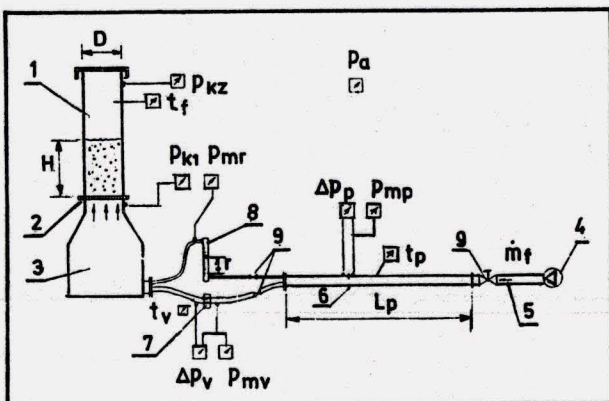
3. Određivanje karakteristika fluidizacije pepela

U TE "Nikola Tesla" obavlja se transport letećeg pepela pneumatskim žlebom od rezervoara elektrofiltra do prihvatnih ejektora za dalji hidraulični transport. Transport pneumatskim žlebom pokazao se kao vrlo efikasan za pepeo dobijen u procesu sagorevanja uglja projektnog kvaliteta. Međutim, sagorevanjem uglja sa visokim procentom peska primećen je najpre usporen transport takvog pepela, a u slučaju dužeg sagorevanja uglja tako lošeg kvaliteta, duž pneumatskog žleba počinje taloženje čestica koje dovodi do potpunog zaustavljanja žleba.

Da bi se sagledala razlika hidrodinamičkih karakteristika fluidizacije različitih uzoraka pepela, obavljeno je ispitivanje na opitnoj instalaciji na Mašinskom fakultetu u Beogradu.

Opitna instalacija na kojoj su obavljena ispitivanja prikazana je na slici 2. Glavni delovi ove instalacije su: 1 – staklena cev ($D = 150 \text{ mm}$, $H_c = 1000 \text{ mm}$) za fluidizaciju pepela sa filtrom na vrhu; 2 – porozna pregrada od filca koji se koristi u TENT-B; 3 – komora za umirenje struje vazduha; 4 – rotaciona klipna duvaljka; 5 – sistem cevi za dovod vazduha; 6 – prigušnica ($d_p = 11,7 \text{ mm}$) koja je montirana u pravolinijskom delu cevi ($D_p = 52,3 \text{ mm}$, $L_p = 3 \text{ m}$); 7 – Venturijeva mlaznica N° 110 (STROHLEIN); 8 – rotametar N° D-089 (ROGER GILMONT); 9 – ventili za regulaciju protoka vazduha.

Ispitivanjima je obuhvaćeno deset uzoraka pepela dostav-



Slika 2. Šema opitne instalacije

ljenih od strane TE "Nikola Tesla". Uzorak broj 9 izdvojen je u periodu kada je došlo do zastoja u radu pneumatskih žlebova (tj. kada je vršeno sagorevanje uglja vrlo lošeg kvaliteta).

Za sve uzorke prethodno je određena zapreminska (nasipna) gustina. Za uzorak 9 (zbog visokog sadržaja peska) dobijena je zapreminska gustina $\rho_{e0} = 1180 \text{ kg/m}^3$, a kod ostalih uzoraka od 610 do 785 kg/m^3 .

Ispitivanjem na laboratorijskom postrojenju obuhvaćeno je određivanje:

1. Prve kritične brzine fluidizacije i relativne ekspanzije sloja pepela pri promenljivoj poroznosti sloja.
2. Eksperimentalne zavisnosti pada pritiska kroz fluidizovani sloj pepela za različite početne visine nasipanja.

Uzorci od 1 do 8 i uzorak 10 testirani su do maksimalne brzine fluidizacije $w = 8 \text{ cm/s}$, jer se to pokazalo kao brzina veća od brzine w_F koja je potrebna za transport pneumatskim žlebom za ove uzorke. Uzorak 9 testiran je do brzine $w = 20 \text{ cm/s}$, da bi se pouzdano dobila brzina w_F . Ceo proces fluidizacije je vođen u smeru povećanja brzine do maksimalne, a zatim u smeru smanjenja brzine do nule.

Svi uzorci testirani su bar sa dve početne visine nasipanja ($H_{01} = 10 \text{ cm}$ i $H_{02} = 20 \text{ cm}$). Za prve testirane uzorke eksperimenti su obavljani sa još dve visine nasipanja. Međutim, eksperimenti sa dve visine nasipanja su se pokazali kao apsolutno pouzdani za dalji eventualni proračun strujnih parametara za druge visine nasipanja.

Ceo eksperiment je pažljivo praćen i vizuelno, jer se fluidizacija obavljala u staklenoj cevi. Vizuelno su praćeni sledeći fenomeni: formiranje kanala kroz sloj pepela; prva kritična brzina fluidizacije w_1^* (koja je kasnije određena i grafički); raslojavanje čestica u sloju; brzina w_p , koja je procenjena kao minimalno potrebna za transport pneumatskim žlebom; druga kritična brzina w_2^* za najsitnije čestice.

Svi ovi parametri nisu jednoznačno određeni zbog heterogenih uzoraka pepela i po krupnoći i po fizičko-hemijskom sastavu. Svi uzorci imaju tendenciju formiranja kanala pri brzinama oko prve kritične brzine. Zatim, povećanjem brzine nastupa raslojavanje: čestice nasagorelog uglja i najsitnije čestice pepela izbijaju na površinu i sasvim su dobro fluidizovane. Međutim, u donjem delu sloja su krupnije čestice za koje je ta brzina nedovoljna za transport pneumatskim žlebom. Prema tome, minimalna potrebna brzina w_p za siguran transport žlebom treba da bude veća od one pri kojoj je nastalo raslojavanje.

U tabeli 2. prikazana su 4 dobijena strujna parametra za sve uzorke: brzine w_1^* , w_p i w_2^* i jedinični pad pritiska p_s/H u području fluidizacije pri promenljivoj poroznosti. I dok se vrednost brzine w_1^* može smatrati vrlo precizno određenom (za sitnije i lakše frakcije sloja), brzina w_p je određena vizu-

Tabela 2. Strujni parametri pepela

Uzorak	w_1^* (cm/s)	w_p (cm/s)	w_2^* (cm/s)	$\Delta p_s/H$ (mmH ₂ O/cm)
NT-1	0,60	2,8	5,5	4,34
NT-2	0,55	3,5	7,0	4,55
NT-3	0,45	3,0	7,5	4,23
NT-4	0,60	3,5	7,0	4,80
NT-5	0,65	3,5	6,0	4,33
NT-6	0,38	2,5	6,5	4,78
NT-7	0,55	4,0	6,5	5,30
NT-8	0,45	3,5	6,5	4,96
NT-9	6,50	14,0	—	11,80
NT-10	1,50	7,5	7,5	5,17

elnom procenom kada je došlo do potpunog mešanja svih čestica, a druga kritična brzina w_2^* (kada počinje transport vertikalno naviše), kada je primećen intenzivniji porast pada pritiska kroz filtersko platno na vrhu cevi (prouzrokovan lepljenjem većeg broja čestica za platno).

Na dijagramu (slika 3) prikazana je zavisnost jediničnog pada pritiska $\Delta p_s/H$ (dobijenog svođenjem Δp_s na jedinicu izmerene visine) od brzine fluidizacije w i to za dva uzorka: NT-6 (pepeo standardnih karakteristika) i NT-9 (pepeo sa visokim sadržajem peska).

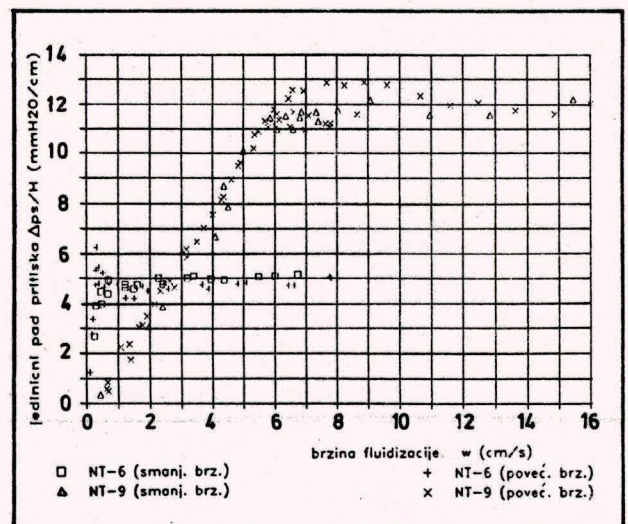
Jedinični pad pritiska $\Delta p_s/H$ u području fluidizacije pri promenljivoj poroznosti dobijen je kao srednja vrednost dobijenih eksperimentalnih tačaka za brzine $w > w_1^*$. Dobijene vrednosti su u skladu sa izmerenim zapreminskim gustinama ρ_{e0} . Naime, uzorci 1, 2, 3 i 5. sa gustinom $\rho_{e0} = (610-700) \text{ kg/m}^3$ imaju $\Delta p_s/H = (4,23-4,55) \text{ mmH}_2\text{O/cm}$, a uzorci 4, 6, 7, 8 i 10. sa gustinom $\rho_{e0} = (715-785) \text{ kg/m}^3$ imaju $\Delta p_s/H = (4,78-5,30) \text{ mmH}_2\text{O/cm}$. Uzorak 9. ima najveću gustinu $\rho_{e0} = 1180 \text{ kg/m}^3$, pa i jedinični pad pritiska $\Delta p_s/H = 11,8 \text{ mmH}_2\text{O/cm}$.

Prva kritična brzina fluidizacije w_1^* za uzorke NT-1 do NT-8 kreće se u relativno uskim granicama od 0,38 do 0,65 cm/s, za uzorak NT-10 (sa primesama peska) iznosi 1,5 cm/s, a za uzorak NT-9 (koji ventilator nije mogao da transportuje žlebom) ona iznosi 6,5 cm/s.

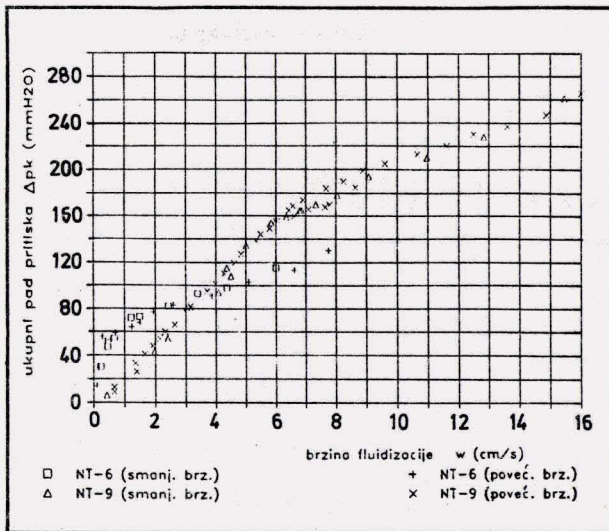
Na dijagramu (slika 4) je prikazana zavisnost ukupnog pada pritiska Δp_k od brzine fluidizacije w (za uzorke NT-6 i NT-9 za istu visinu nasipanja od 10 cm). Pri poređenju ukupnog pada pritiska, pri odgovarajućoj brzini fluidizacije w_p , za uzorak NT-6 dobija se $\Delta p_k = 82 \text{ mmH}_2\text{O}$, a za uzorak NT-9 dobija se $\Delta p_k = 240 \text{ mmH}_2\text{O}$, tj. tri puta veća vrednost.

Prilikom korišćenja ovih podataka treba voditi računa da su eksperimenti rađeni sa poroznom pregradom od čistog filca. Pad pritiska Δp_k da bi se povećao u radu sa zaprljanim filcom.

Treba pomenuti i uticaj temperature na brzinu fluidizacije. Naime, eksperimenti koji su obavljani na Mašinskom fakultetu rađeni su na sobnoj temperaturi ($t = 19-20 \text{ }^\circ\text{C}$). Međutim, u TE "Nikola Tesla" ventilatori transportuju zagrejan vazduh ($t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$) do pneumatskih žlebova u koje dolazi pepeo temperature oko $120-130 \text{ }^\circ\text{C}$. Prema tome, vazduh se pri fluidizaciji greje, njegova gustina se smanjuje, pa se brzina strujanja povećava idući ka vrhu sloja. Na temperature od $t_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ na dnu sloja do $t_2 = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ na vrhu sloja, dobija se brzina na vrhu sloja $w_2 = 4,51 \text{ cm/s}$.



Slika 3. Zavisnost jediničnog pada pritiska od brzine fluidizacije



Slika 4. Zavisnost ukupnog pada pritiska od brzine fluidizacije

4. Određivanje karakteristika porozne pregrade – filca

Kako na performanse transporta pneumatskim žlebom utiču i karakteristike filca koji se koristi za poroznu pregradu, obavljeno je i ispitivanje njegovih karakteristika. U toku neprekidnog rada termoelektrane, pa i pneumatskog žleba, menja ju se karakteristika filca. Zato je vršeno ispitivanje novog filca i filceva posle određenog perioda upotrebe.

Podaci o karakteristikama porozne pregrade (potrebni za projektovanje i eksploataciju pneumatskog žleba) obuhvataju sledeće:

- zavisnost pada pritiska pri strujanju vazduha kroz filc (Δp_F) od brzine strujanja (w),
- koeficijent otpora filca.

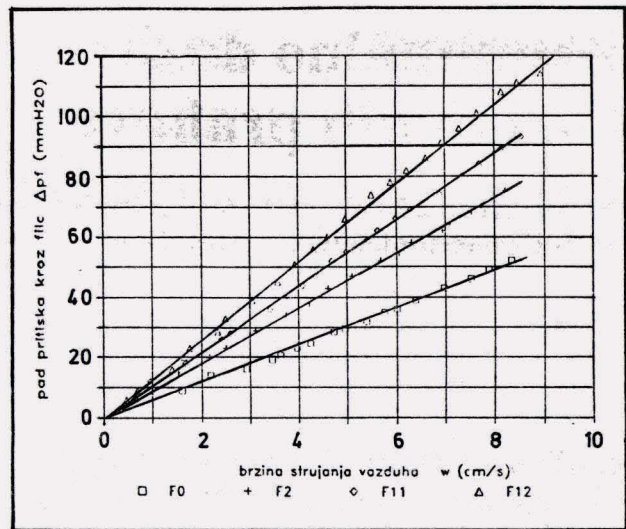
S obzirom da se karakteristike filca u toku eksploatacije menjaju, ispitivanjima su obuhvaćeni različiti uzorci i to: F0 – novi filc (debljine 30 mm), F2 – filc korišćen oko 8 meseci (debljine 30 mm), F11 – filc korišćen oko 2 godine (debljine 25 mm) i F12 – korišćen oko 2 godine (debljine 30 mm).

Izmerene vrednosti (prikazane na slici 5) potvrdile su linearnu zavisnost $\Delta p_F = f(w)$, što omogućava određivanje koeficijenta otpora ζ_F uzoraka filca. Dobijene vrednosti su prikazane u tabeli 1.

Za filceve iste debljine (F0 i F12), upoređenjem koeficijenta otpora zaključeno je da se otpor više nego udvostručio za dve godine neprekidne upotrebe.

Tabela 1. Koeficijent otpora ζ_F filca

Uzorak	$\zeta_F \left(\frac{\text{mmH}_2\text{O}}{\text{m/s}} \right)$	$\zeta_F \left(\frac{\text{mmH}_2\text{O}}{\text{cm/s}} \right)$
F0	5 955	6,07
F2	8 917	9,09
F11	10 720	10,93
F12	12 920	13,17



Slika 5. Zavisnost pada pritiska kroz filc od brzine vazduha

S druge strane, upoređenje filceva različitih debljina a korišćenih isto vreme (F11 i F12), daje međusobni odnos koeficijenta otpora 1,205, što apsolutno odgovara međusobnom odnosu debljina (1, 2). To upućuje na zaključak da se prodiranje čestica u filc vrši ravnomerno po celoj debljini filca. Kada bi se prljanje vršilo samo po površini filca, odnos njihovog koeficijenta otpora bio bi blizak jedinici.

Zaključak

Dobijeni rezultati za promenu otpora filca ukazuju na promenu stepena zaprljanosti u toku eksploatacije. Za određivanje preciznije zavisnosti promene koeficijenta otpora od vremena rada pneumatskog žleba, potrebno je ispitati više uzoraka sa različitim vremenom korišćenja.

Dobijene vrednosti strujnih parametara, pre svega prve kritične brzine fluidizacije za grupu uzoraka 1 do 8 ($w_1^* = 0,5 \pm 0,15 \text{ cm/s}$) i za uzorak 9 ($w_1^* = 6,5 \text{ cm/s}$) drastično se razlikuju. Prema tome, potrebna količina vazduha za uzorak 9 je više od 10 puta veća od one za grupu uzoraka 1–8. Potrebni pad pritiska $\Delta p_s / H$ je takođe veći, ali nešto više od dva puta, dok je ukupni pad pritiska Δp_k merodavan za proračun ventilatora približno tri puta veći.

Za ocenu ispravnosti rada postrojenja u TE "Nikola Tesla" potrebno je utvrditi protoke vazduha u pneumatskim žlebovima. S obzirom na činjenicu da ventilator nije mogao da transportuje uzorak 9, brzina fluidizacije sigurno je bila manja od 8 cm/s.

Za pogonsko dinamičko praćenje karakteristika fluidizacije, kao i strujnih parametara procesa transporta u celini, potrebno je uvođenje odgovarajućeg merno-regulacionog sistema.

Literatura

- [1] ŠAŠIĆ, M.: *Transport fluida i čvrstih materijala cevima*, Naučna knjiga, Beograd, 1990.
- [2] Grupa autora: *Ispitivanje karakteristika fluidizacije pepela iz TE "Nikola Tesla"*, Mašinski fakultet, Beograd, 1990.