

Michał Głomba

Opory przepływu gazu w poziomej przeciwpłuczkowej płuczce natryskowej

Zagadnienie wpływu zmiennych wielkości fizycznych na opory przepływu fazy gazowej w płuczkach natryskowych, których istota działania polega między innymi na kontakcie kropel rozpylonej cieczy z przepływającym w przewodzie gazem, jest bardziej skomplikowane niż w przypadku przepływu w przewodzie tylko fazy gazowej. Komplikacja ta jest efektem pojawienia się w strumieniu gazu kropel cieczy, które w chwili powstawania tuż za rozpylaczem charakteryzują się znacznymi prędkościami wylotowymi (od kilkunastu do kilkudziesięciu m/s). Wtedy ich oddziaływanie na ośrodek gazowy jest największe i opór przepływu gazu w strefie dużych prędkości kropel jest również największy.

Prędkość początkowa kropel, rozkład średnic kropel w widmie rozpylenia cieczy, efekty koalescencji kropel, wtórny rozpad kropel o większych średnicach, porywanie i unoszenie kropel, zanikanie kropel przy ich kontakcie ze ścianką aparatu – to najistotniejsze czynniki, które uniemożliwiają opisanie dynamiki przepływu, a tym samym i spadku ciśnienia gazu w płuczkach natryskowych, równaniem różniczkowym. Z tego względu informacje zawarte w literaturze krajowej i zagranicznej, dotyczące oporów przepływu gazu w aparatach natryskowych (odpylaczach, absorberach), mają charakter wskaźnikowy i incydentalny. Ich wartość poznawcza jest bez znaczenia, a praktyczna znikoma.

W niniejszej pracy podjęto próbę określenia zależności pomiędzy oporami przepływu fazy gazowej w poziomej przeciwpłuczkowej płuczce natryskowej a zmiennymi wielkościami fizycznymi, które mogą mieć wpływ na wielkość tych oporów.

Opory przepływu gazu w płuczkach natryskowych

Całkowite opory przepływu gazu w płuczkach natryskowych składają się ze spadków ciśnienia na wlocie do płuczki (Δp_{wl}), na wylocie z płuczki (Δp_{wyl}), na żaluzijnym elemencie (stosowanym niekiedy do wyrównywania prędkości gazu w przekroju płuczki) (Δp_k), na odkraplaczu (jeżeli jest wbudowany do wnętrza płuczki) (Δp_{odk}) oraz ze spadku ciśnienia związanego z wewnętrznym tarciem gazu i oddziaływaniem kropel rozpylonej w płuczce cieczy (Δp_m) na gaz. Spadek ciśnienia gazu na wlocie i wylocie oraz na odkraplaczu i na kierownicy wyrównującej prędkość przepływu gazu w przekroju płuczki omówiono w literaturze specjalistycznej [1–3,7]. Spadek ciśnienia gazu, spowodowany tarciem wewnętrznym na odcinku prostym płuczki suchej, scharakteryzowano w wielu podręcznikach [1–5]. Zebrane informacje, dotyczące oporów przepływu w płuczkach natryskowych, przedstawiono w tabeli 1.

Próby określenia oporów przepływu gazu przy pomocy zależności podanych w tabeli 1 wykazały dużą rozbieżność wyników obliczeń. Praktyczne wykorzystanie tych zależności musi być poprzedzone odpowiednimi testami, których przeprowadzenie w warunkach przemysłowych (na płuczkach o rozmiarach rzeczywistych) jest z wielu względów trudne i kosztowne.

Modelowanie spadku ciśnienia

Obliczenia spadków ciśnienia gazu w płuczce można sprowadzić do sumowania jego spadków na wlocie i wylocie aparatu:

$$\Delta p_{skr} = \Delta p_{wl} + \Delta p_{wyl} + \Delta p_k + \Delta p_{odk} + \Delta p_m \quad (1)$$

Oprócz Δp_m pozostałe składowe spadku ciśnienia gazu dają się łatwo określić przy pomocy znanych z literatury zależności. Spadek ciśnienia gazu wywołany tarciem wewnętrznym gazu i oddziaływaniem na gaz wypływającej z rozpylacza strugi kropel cieczy można przedstawić w następującej formie:

$$\Delta p_m = \Delta p_t + \Delta p_{st} = \Delta p_{tc} + \Delta p_{ts} + \Delta p_{st} \quad (2)$$

Spadek ciśnienia wywołany tarciem wewnętrznym gazu proponuje się przedstawiać w postaci sumy spadku ciśnienia wywołanego podczas przepływu gazu w płuczce suchej (Δp_{ts}) i spadku ciśnienia wywołanego zwiększonym tarciem wewnętrznym gazu na skutek pojawienia się w strumieniu gazu kropel cieczy (Δp_{tc}).

Straty spowodowane tarciem wewnętrznym podczas przepływu gazu w płuczce suchej (Δp_{ts}) określa znane powszechnie równanie Darcy-Weisbacha:

$$\Delta p_{ts} = \lambda \frac{1}{D} \frac{w_g^2 \rho_g}{2} \quad (3)$$

Podstawiając do równania (3) minimalne i maksymalne wartości poszczególnych wielkości oszacowano zakres wartości Δp_{ts} w płuczkach natryskowych na 0,5–20 Pa. Współczynnik oporu hydraulicznego (λ) dla przepływu jednofazowego w płuczce można wyrazić za pomocą znanego wzoru Colebrooka-Whitea:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{k}{3,72 D} + \frac{2,51}{Re_g \sqrt{\lambda}} \right) \quad (4)$$

Różnica ciśnień statycznych (Δp_{st}) w płuczce powstaje wskutek przyrostu ciśnienia statycznego w strefie natrysku cieczy. Powodowany jest on zamianą energii kinetycznej kropel na energię ciśnienia gazu w płuczce.

Tabela 1. Zestawienie informacji dotyczących oporów przepływu gazu w płuczkach natryskowych

Źródło informacji	Wartości oporów przepływu lub zależność opisująca opory przepływu gazu	Uwagi
[3,6,7]	$\Delta p_m = 1,2 \Psi L/G \Delta p_r$ przy współprądowym przepływie faz $\Psi = -0,22$ przy przeciwproudowym przepływie faz $\Psi = 0,13$ Δp_r wyrażono w MPa	Zależność dotyczy przepływu powietrza przez sferę płuczki wypełnionej kroplami rozpylonej wody Opracowano dla klimatyzacyjnych komór zraszania
[6]	Rozpylanie dwustopniowe: $\Delta p_m = 14,1 G^{1,81}$ Rozpylanie trójstopniowe: $\Delta p_m = 33,7 G^{1,2}$ a także: $\Delta p_m = \zeta \frac{w_g^2 \rho_g}{2}$ dla rozpylania dwustopniowego $\zeta = 26$ dla rozpylania trójstopniowego $\zeta = 35$	Warunki stosowania: $1,5 \leq G \leq 3,0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ $l \leq 3,0 \text{ m}$ $\Delta p_r < 0,25 \text{ MPa}$ $L/G \leq 2,0 \text{ kg/kg}$
[8]	$\Delta p_m = 300+500 \text{ Pa}$	Wartość Δp_m określono dla komory zraszania wraz z kierownicą powietrza i odkraplaczem żaluzijnym $1,5 \leq w_g \leq 2,5 \text{ m/s}$ $4,5 \leq l \leq 7,5 \text{ m}$ $0,2 \leq L/G \leq 1,0 \text{ kg/kg}$
[8]	$\Delta p_m \leq 250 \text{ Pa}$	Wartość Δp_m określono dla płuczki nie wyposażonej w kierownicę przepływu gazu i odkraplacz $0,3 \leq \Delta p_r \leq 0,4 \text{ MPa}$ $0,5 \leq L/G \leq 8,0 \text{ kg/kg}$ $0,6 \leq w_g \leq 1,2 \text{ m/s}$
[9]	$\Delta p_m = \zeta \frac{l}{D} \frac{w_g^2 \rho_g}{2}$ dla $L_c = 30+45 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ $\zeta = 1,65$	Δp_m odniesiono do strefy płuczki wypełnionej kroplami cieczy
[10]	dla $w_g \leq 2,5 \text{ m/s}$ $\Delta p_m = \zeta \frac{w_g^2 \rho_g}{2} + 0,68(0,65 + w_g) l^{0,85} L_c^{0,79} \Delta p$ dla $w_g \geq 2,5 \text{ m/s}$ $\Delta p_m = \zeta \frac{w_g^2 \rho_g}{2} + 0,11 w_g^3 l^{0,85} L_c^{0,79} \Delta p^{0,3}$	Zależność opracowano na podstawie doświadczeń przeprowadzonych w płuczkach przy: $D = 1,0+1,3 \text{ m}$ $w_g = 1,2+4,4 \text{ m/s}$ $L/G = 1,5+16 \text{ kg/kg}$ $L_c = 6+70 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ $\Delta p_r = 0,2+0,45 \text{ MPa}$ $l = 1,5+9 \text{ m}$ $d_k = 10+300 \mu\text{m}$ Współczynnik oporu hydraulicznego płuczki wraz z efektami wlotu i wylotu gazu $\zeta = 10+20$

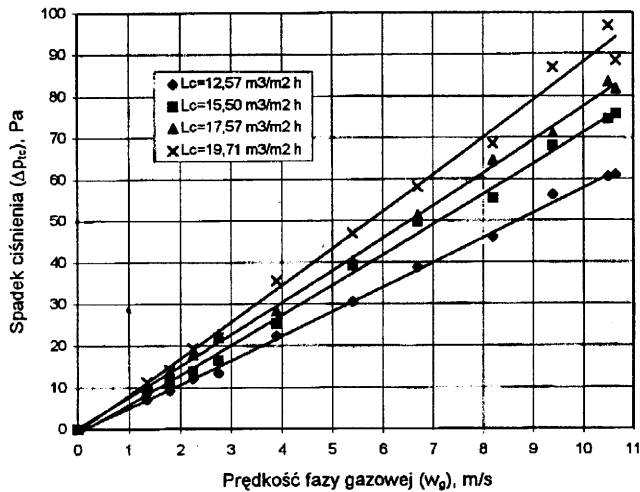
Widmo kropeł pod względem wielkości ich średnic jest bardzo zróżnicowane, przeto niemożliwe staje się jednoznaczne określenie równania, które opisywałoby zależności pomiędzy zmianą energii kinetycznej kropeł a przyrostem ciśnienia statycznego w płuczce. Zagadnienie to próbowano rozwiązać na drodze doświadczalnej. Trudności występują również przy próbie określenia zależności pomiędzy spadkiem ciśnienia gazu w płuczce, wywołanym wzrostem tarcia wewnętrznego w wyniku pojawienia się w ośrodku gazowym kropeł cieczy (Δp_{tc}), a prędkością fazy gazowej (w_g).

Spadek ciśnienia gazu w poziomej przeciwproudowej płuczce natryskowej

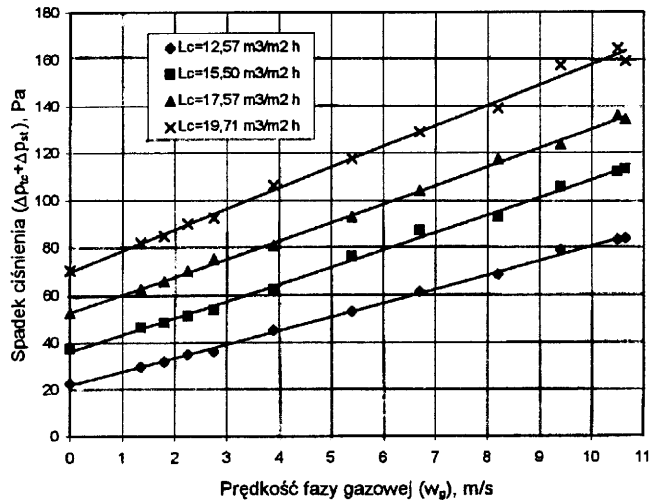
Badania spadku ciśnienia w płuczce przeprowadzono na instalacji wielkolaboratoryjnej, którą charakteryzowały następujące parametry: średnica wewnętrzna płuczki $D=0,3 \text{ m}$, długość strefy natrysku kropeł $l=3,5 \text{ m}$, typ rozpylaczy: strumieniowo-wirowe RSW 5 [11], zakres prędkości gazu $1,0 < w_g < 11 \text{ m/s}$, zakres gęstości zraszania $12,5 < L_c < 37,5 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$, zakres ciśnień rozpylania wody $0,098 \leq p_r < 0,44 \text{ MPa}$. Uzyskane widmo rozpylania wody rozpylaczem scharakteryzowano w pracy [12]. Badania przeprowadzono dla jedno- i dwustopniowego rozpylania wody w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu fazy gazowej.

Celem badań było określenie wartości spadku ciśnienia (Δp_{tc}) wywołanego zwiększonym tarcem wewnętrznym na skutek wprowadzenia do ruchomej fazy gazowej kropeł cieczy oraz spadku ciśnienia (Δp_{st}) powstającego wskutek zamiany energii kinetycznej kropeł na energię ciśnienia gazu w płuczce w strefie rozpylania kropeł w zależności od prędkości fazy gazowej (w_g) i gęstości zraszania (L_c).

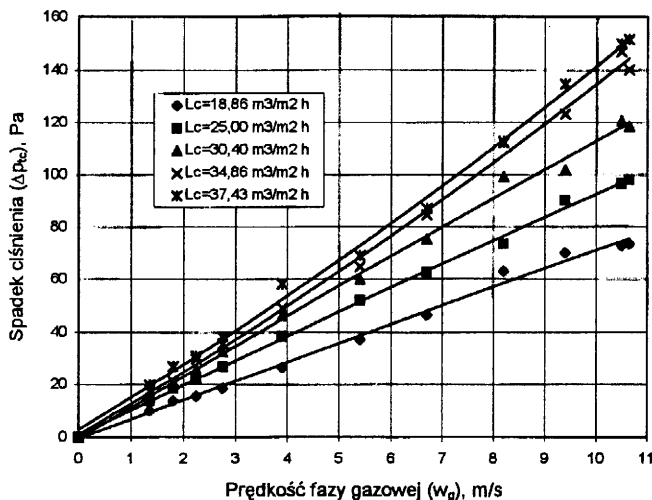
Wyniki badań zależności spadku ciśnienia wywołanego zwiększonym tarcem wewnętrznym, na skutek wprowadzenia do ruchomej fazy gazowej kropeł cieczy, od prędkości gazu dla jedno- i dwustopniowego rozpylania cieczy przedstawiono na rysunku 1, a dla dwustopniowego na rysunku 2. Z badań tych wynika, że spadek ciśnienia Δp_{tc} wzrastał wraz z prędkością gazu w płuczce niemal prostoliniowo (faktycznie była to zależność wielomianowa). Spadek ten wzrastał również wraz ze wzrostem gęstości zraszania, jednakże zależność ta była prostoliniowa (rys.3). Wpływ prędkości fazy gazowej na sumę spadków ciśnienia, wywołanych zwiększonym tarcem wewnętrznym i wzrostem ciśnienia statycznego w płuczce ($\Delta p_{tc} + \Delta p_{st}$) przedstawiono na rysunkach 4 i 5 (odpowiednio jedno- i dwustopniowe rozpylanie cieczy). W obu przypadkach rozpylania cieczy stwierdzono, że suma spadków ciśnienia ($\Delta p_{tc} + \Delta p_{st}$) rosła wraz ze wzrostem prędkości gazu niemal prostoliniowo (faktycznie był to wzrost wielomianowy).



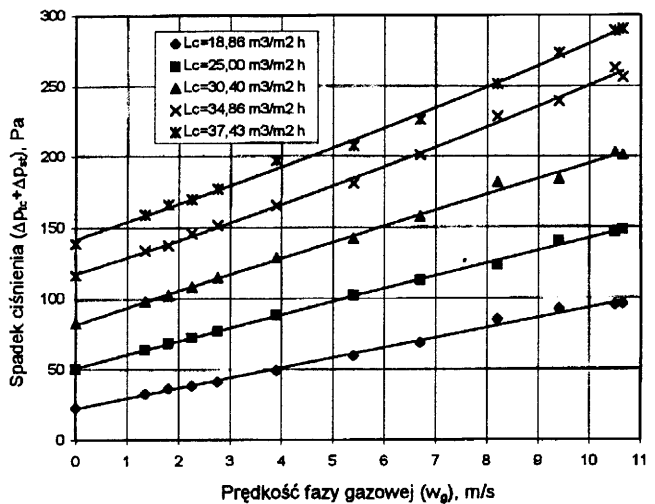
Rys. 1. Zależność spadku ciśnienia (Δp_{t0}) od prędkości fazy gazowej (w_g) (jednostopniowe rozpylanie cieczy)



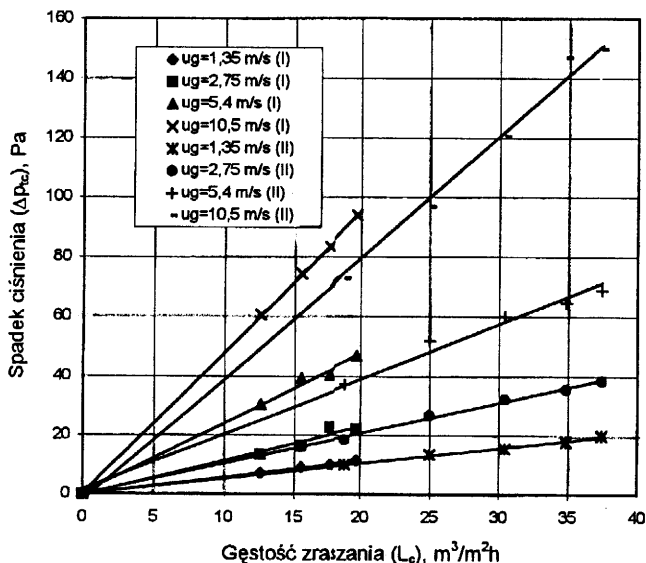
Rys. 4. Zależność sumy spadków ciśnienia ($\Delta p_{t0} + \Delta p_{e0}$) od prędkości fazy gazowej (w_g) (jednostopniowe rozpylanie cieczy)



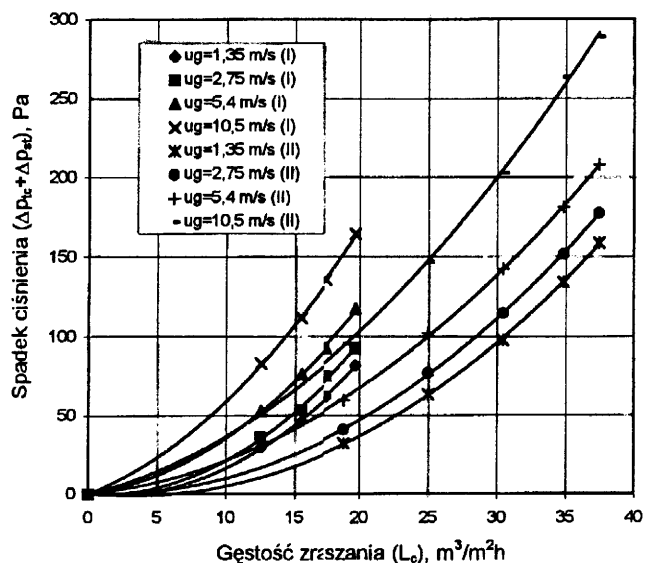
Rys. 2. Zależność spadku ciśnienia (Δp_{t0}) od prędkości fazy gazowej (w_g) (dwustopniowe rozpylanie cieczy)



Rys. 5. Zależność sumy spadków ciśnienia ($\Delta p_{t0} + \Delta p_{e0}$) od prędkości fazy gazowej (w_g) (dwustopniowe rozpylanie cieczy)



Rys. 3. Zależność sumy spadków ciśnienia (Δp_{t0}) od gęstości zraszania (L_c) (znak (I) obok prędkości gazu dotyczy wartości uzyskanych podczas jednostopniowego, a znak (II) podczas dwustopniowego rozpylania cieczy)



Rys. 6. Zależność sumy spadków ciśnienia ($\Delta p_{t0} + \Delta p_{e0}$) od gęstości zraszania (L_c) (znak (I) obok prędkości gazu dotyczy wartości uzyskanych podczas jednostopniowego, a znak (II) podczas dwustopniowego rozpylania cieczy)

Δp_r – ciśnienie rozpylania cieczy, Pa

Δp_{st} – różnica ciśnień przed i za płuczką wywołana wzrostem

ciśnienia statycznego fazy gazowej w strefie rozpylania cieczy, Pa

Δp_{tc} – różnica ciśnień przed i za płuczką wywołana wzrostem tarcia wewnętrznego w wyniku wprowadzenia do fazy gazowej kropel cieczy, Pa

Δp_{ts} – spadek ciśnienia gazu w płuczce suchej, Pa

μ_c – lepkość rozpylanej cieczy, Pa·s

μ_g – lepkość gazu, Pa·s

ρ_g – gęstość fazy gazowej, kg/m³

ρ_c – gęstość fazy ciekłej, kg/m³

Eu – liczba kryterialna Eulera

Fr – liczba kryterialna Frouda

Re_g – liczba kryterialna Reynoldsa

ζ – współczynnik oporu hydraulicznego

Ψ – współczynnik uwzględniający kierunek przepływu faz

λ – współczynnik oporów przepływu

LITERATURA

1. M. MALICKI: Wentylacja i klimatyzacja. PWN, Warszawa 1980.

2. Rietschel/Raiß: Ogrzewanie i klimatyzacja. Arkady, Warszawa 1973.

3. J. FERENCOWICZ: Wentylacja i klimatyzacja. Arkady, Warszawa 1964.

4. Z. KEMBLÓWSKI, S. MICHAŁOWSKI, C. STRUMIŁŁO, R. ZARZYCKI: Podstawy teoretyczne inżynierii chemicznej i procesowej. WNT, Warszawa 1985.

5. M. SERWIŃSKI: Zasady inżynierii chemicznej. WNT, Warszawa 1976.

6. S. PRZYDRÓŻNY, J. FERENCOWICZ: Klimatyzacja. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1988.

7. A. BOBIŃSKI, W. KOMSTA, M. LORENS: Wentylacja i klimatyzacja w przemyśle lekkim. WNT, Warszawa 1970.

8. Sprawozdanie po pyłe i żółtawliwaniju. Izd. II. pod red. A.A. Rusanowa. Energoatomizdat, Moskwa 1983.

9. W. M. RAMM: Absorbicja gazow. Izd. II. Chimija, Moskwa 1976.

10. W. I. KRYLENKO, S. M. BIEŁOKON: Chim. i nieft. maszynostrojenije. 3, 23, 1977.

11. M. GŁOMBA: Wzór użytkowy W 85851, 1988.

12. M. GŁOMBA: Mat. I symp. „Ograniczanie emisji zanieczyszczeń do atmosfery – POL-EMIS '92”. PZITS, PWr., Szklarska Poręba 1992.

Gas Flow Resistance in a Horizontal, Countercurrent Spray Scrubber

The experiments were run on a large laboratory scale. Making use of dimensional analysis, dimensionless equations were derived to relate gas pressure drop to two major parameters – the rise in internal friction and the increment of static pressure in the spraying zone. On analyzing the results obtained it was found that (1) pressure drop due to spraying was much higher than

the one produced by internal friction under conditions of single-phase flow, and (2) the values of pressure drop produced by the increase of internal friction (as a result of droplet entrainment into the moving gas phase) were comparable (at the same gas velocities) with the values of pressure drop accounted for by the increment in the static pressure of the gas in the spraying zone.

Zależność sumy spadków ciśnień w płuczce ($\Delta p_{tc} + \Delta p_{st}$) od gęstości zraszania (L_c) jest wielomianowa. Suma tych spadków wzrasta wraz ze wzrostem gęstości zraszania (rys.6).

Spadek ciśnienia spowodowany wzrostem tarcia wewnętrznego

Można założyć, że spadek ciśnienia gazu w płuczce natryskowej, spowodowany wzrostem tarcia wewnętrznego w wyniku wprowadzenia do fazy gazowej kropli cieczy, zależy od następujących parametrów:

$$\Delta p_{tc} = f(w_g, L_c, \mu_g, \mu_c, \rho_g, \rho_c, l, D, \Delta p_r, d_k, g) \quad (5)$$

W praktyce średnica płuczki i jej długość lub wysokość w strefie kontaktu dwufazowego są zwykle dużo większe od średnicy kropli, a zatem stają się nieistotne. Można wtedy równanie (5) zapisać w postaci:

$$\Delta p_{tc} = f(w_g, L_c, \eta_g, \eta_c, \rho_g, \rho_c, \Delta p_r, d_k, g) \quad (6)$$

Przy tak dużej liczbie zmiennych wyznaczanie współczynników regresji przy poszczególnych zmiennych jest kłopotliwe i bezcelowe. Liczbę szukanych współczynników regresji można zmniejszyć przez wprowadzenie bezwymiarowych kryteriów podobieństwa. Posługując się analizą wymiarową uzyskano równanie kryterialne w postaci:

$$\frac{\Delta p_{tc}}{w_g^2 \rho_g} = f \left[\left(\frac{L_c}{w_g} \right) \left(\frac{\rho_c}{\rho_g} \right) \left(\frac{\eta_g}{d_{kr} w_g \rho_g} \right) \left(\frac{\eta_c}{d_{kr} w_g \rho_g} \right) \left(\frac{\Delta p_r}{w_g^2 \rho_g} \right) \left(\frac{d_{kr} g}{w_g^2} \right) \right] \quad (7)$$

Ze względów praktycznych celowe jest dalsze uproszczenie otrzymanej zależności (7) przez odpowiednie uporządkowanie kryteriów podobieństwa. Założono, że przy stosunkach prędkości i gęstości płynów istnieje będzie równość współczynników regresji, a kryterium $[\eta / (d_{kr} w_g \rho_g)]$ – z uwagi na stałą w przybliżeniu lepkość cieczy – będzie nieistotne, więc można go pominąć. Pozwala to otrzymać zależność bardziej uproszczoną:

$$\frac{\Delta p_{tc}}{w_g^2 \rho_g} = f \left[\left(\frac{L_c \rho_c}{w_g \rho_g} \right) \left(\frac{\eta_g}{d_{kr} w_g \rho_g} \right) \left(\frac{\Delta p_r}{w_g^2 \rho_g} \right) \left(\frac{d_{kr} g}{w_g^2} \right) \right] \quad (8)$$

którą można wyrazić przy pomocy znanych kryterialnych liczb podobieństwa:

$$Eu = f \left[\left(\frac{L}{G} \right) (Re_g^{-1}) \left(\frac{\Delta p_r}{w_g^2 \rho_g} \right) (Fr^{-1}) \right] \quad (9)$$

Ostatecznie równanie (9) można zapisać w postaci:

$$Eu = C \left(\frac{L}{G} \right)^m (Re_g)^n (Fr)^p \left(\frac{\Delta p_r}{w_g^2 \rho_g} \right) \quad (10)$$

Wyprowadzone równanie kryterialne (10) może stanowić podstawę do uogólnienia opisu matematycznego spadku ciśnienia gazu spowodowanego wzrostem tarcia wewnętrznego na skutek zaburzenia przepływu jednofazowego kroplami cieczy. Uzyskane podczas badań wyniki aproksymowano uproszczonym równaniem kryterialnym. Dla jednostopniowego rozpylania cieczy w płuczce otrzymano:

$$Eu = 210 Re_g^{-1,322} Fr^{0,185} \quad (11)$$

natomiast dla rozpylania dwustopniowego:

$$Eu = 413 Re_g^{-1,232} Fr^{0,112} \quad (12)$$

Spadek ciśnienia spowodowany przyrostem ciśnienia statycznego w strefie natrysku cieczy

Spadek ciśnienia przepływającego gazu, na skutek przyrostu ciśnienia statycznego w strefie natrysku cieczy w płuczce, zależy może od następujących parametrów:

$$\Delta p_{st} = f(L_c, \eta_g, \eta_c, \rho_g, \rho_c, g, \Delta p_r, d_k) \quad (13)$$

Posługując się zasadami analizy wymiarowej powyższą zależność wyrażono równaniem kryterialnym w postaci:

$$\frac{\Delta p_{st}}{L_c^2 \rho_c} = C Re_c^m Fr^n Eu^p \quad (14)$$

Stałą C i wykładniki potęgowe oraz istotność poszczególnych kryteriów podobieństwa będzie można określić po zebraniu odpowiednio dużej liczby wyników badań. Na podstawie dotychczasowych wyników badań określono zależność spadku ciśnienia od ciśnienia rozpylania cieczy (Δp_r), średniej średnicy kropli (d_k) i gęstości zraszania (L_c). Dla jednostopniowego natrysku cieczy otrzymano zależność:

$$\Delta p_{st} = 40 \Delta p_r^{2,522} d_k^{4,121} L_c^{0,061} \quad (15)$$

Dla dwustopniowego natrysku cieczy wartości Δp_{st} były dwukrotnie większe niż dla natrysku jednostopniowego.

Wnioski

♦ Wartości spadków ciśnienia gazu spowodowanych rozpylaniem cieczy w płuczce są znacznie większe od spadku ciśnienia wywołanego tarcie wewnętrzne podczas przepływu jednofazowego.

♦ Wartości spadków ciśnienia wywołanych wzrostem tarcia wewnętrznego w wyniku wprowadzenia do ruchomej fazy gazowej kropli cieczy są porównywalne przy tych samych prędkościach gazu z wartościami spadków ciśnienia spowodowanych przyrostem ciśnienia statycznego gazu w strefie natrysku cieczy.

♦ Do opisu równaniami kryterialnymi zależności spadków ciśnienia, wywołanych wzrostem tarcia wewnętrznego i przyrostem ciśnienia statycznego gazu w strefie rozpylania cieczy, należy przeprowadzić odpowiednie badania, które pozwolą na określenie wartości stałej C oraz wykładników potęgowych występujących w równaniach (10) i (14).

OZNACZENIA

C – stała

d_k – średnia objętościowo-powierzchniowa (Sautera) średnica kropli, m

D – średnica płuczki, m

g – przyspieszenie ziemskie, m/s^2

G – strumień masy gazu, kg/m^2s

l – długość strefy roboczej płuczki, m

L – strumień masy cieczy zraszającej, kg/m^2s

L_c – gęstość zraszania (pozorna prędkość cieczy), m^3/m^2s

Δp_k – spadek ciśnienia na kierownicy wyrównującej prędkość gazu w przekroju płuczki, Pa

Δp_m – spadek ciśnienia gazu w płuczce podczas przepływu dwufazowego, Pa