ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1990

Seria: INŻYNIERIA ŚRODOWISKA z. 33 Nr kol. 1033

Henryk MELOCH
Piotr KABSCH

Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska
Politechniki Wrocławskiej

PARAMETRY RUCHU KROPEL CIECZY W WYSOKOPRĘDKOŚCIOWEJ PŁUCZCE INIEKCYJNEJ - SYMULACJA KOMPUTEROWA

Streszczenie. Przedstawiono założenia uproszczonego modelu matematycznego, ruchu kropel w iniekcyjnych płuczkach oraz zweryfikowano doświadczalnie jego postać. Zaprezentowano i omówiono wyniki symulacji cyfrowej wybranych parametrów ruchu kropel.

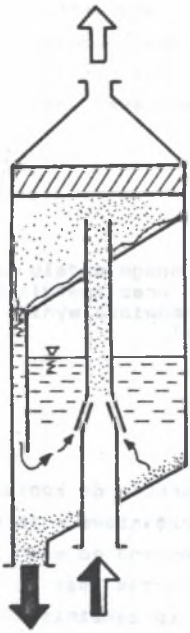
1. WPROWADZENIE

Iniekcyjne płuczki (rys. 1) to szczególny rodzaj aparatów do kontaktowania ciągłej fazy gazowej z fazą ciekłą, występującą częściowo w formie dyspersyjnej (krople), a częściowo w postaci filmu płynącego po wewnętrznych ściankach płuczki. Cechą charakterystyczną tych płuczek jest to, że faza gazowa przemieszcza się ze znacznymi prędkościami (przeważnie 20-50 m/s), a wraz z nią współprądowo porusza się faza ciekła. Stosunkowo ograniczona wiedza na temat skomplikowanych zjawisk i procesów w nich przebiegających jest zasadniczym powodem ograniczeń w projektowaniu. W celu zilustrowania stopnia komplikacji zjawisk i procesów zachodzących w iniekcyjnych płuczkach wymieniono poniżej tylko zagadnienia najistotniejsze i to wyłącznie te, które składają się na charakterystykę dwufazowego przepływu z pominięciem zagadnień dotyczących oczyszczania gazów odlotowych. Są to np.:

- stopień dysperesji kropel cieczy w strumieniu gazu,
- rozkład prawdopodobieństwa kropel o różnych wymiarach,
- wielowymiarowy ruch kropel i jego równania,
- ruch względny i związana z nim koalescencja,
- wzrost wymiarów kropel i ich wtórny rozpad,
- migracja kropel cieczy ze strumienia gazu do filmu,
- ruch filmu, jego prędkość i stopień pofalowania,
- generowanie kropel cieczy z wierzchołków fal filmu,
- proporcje rozdziału objętości cieczy pomiędzy fazą dyspersyjną (kroplami) oraz ciągłą (filmem),

- tzw. zatrzymanie cieczy oraz
- powierzchnia kontaktu faz.

Wszystkie wymienione zagadnienia należy ponadto oddzielnie rozpatrywać w stanie nieustalonym (w odniesieniu do efektu wlotowego) i ustalonym (w stanie równowagi dynamicznej pomiędzy kroplami i filmem cieczy). Stopień komplikacji zadania, jakie stanowi projektowania iniekcyjnych płuczek, skłania do wyboru takiej drogi jego rozwiązania, aby dawała ona szansę uwzględnienia możliwie dużej liczby czynników wpływających na przebieg procesu oczyszczania gazów odlotowych. Sporządzono zatem stosowny model matematyczny pozwalający określać podstawowe parametry przepływu pierścieniowo-dyspersyjnego w dowolnym przekroju gardzieli płuczki. Część elementów modelu sprecyzowano opierając się na szczegółowych studiach literaturowych połączonych z analizą porównawczą pozyskanych tę drogą danych. Pozostałe określono na podstawie rezultatów własnych eksperymentów.



Rys. 1. Schemat płuczki iniekcyjnej

Fig. 1. Scheme of injection scrubber

2. ZAŁOŻENIA MODELU

Prezentowany model, jak wszystkie próby matematycznego odwzorowania rzeczywistości, stanowi kompromis pomiędzy stopniem złożoności obliczeń a wymaganą ich dokładnością. Kompromis ten jest rezultatem poczynionych upraszczających założeń. Założono mianowicie, że:

- stopień dyspersji kropel cieczy wynikający z równowagi pomiędzy siłami aerodynamicznymi i napięcia powierzchniowego określa równanie Nukiyamy i Tanasawy [1], [2],
- polidyspersyjny zbiór rzeczywistych kropel jest reprezentowany przez zastępczy zbiór monodyspersyjny, a więc złożony z jednakowych kulistych kropel o tej samej łącznej objętości i powierzchni co zbiór rzeczywisty. A więc średnica zastępcza kropel stanowi średnię średnicę powierzchniowo-objętościową (Sautera) zbioru rzeczywistego,
- zmienność rozpatrywanych parametrów dwufazowego przepływu modelowana jest poprzez ich dyskretyzację, tzn. poprzez wyznaczanie ich wartości nie w sposób ciągły, lecz w wybranych z dowolną gęstością przekrojach aparatu,

- dyskretne wartości parametrów w kolejnych przekrojach stanowią podstawę do określania ich wartości w wyznaczonych tymi przekrojami odcinkach aparatu. Przy dostatecznie gęstym podziale osi czasu ($\Delta t \leq 5$ ms) wartości parametrów w odcinku zawartym pomiędzy przekrojami i oraz i + 1 mogą być przyjmowane jako stałe i równe średniej arytmetycznej wartości w tych przekrojach,
- kuliste krople są jednakowe i równomiernie rozmieszczone wewnętrz przestrzeni aparatu ograniczonej kolejnymi przekrojami,
- zmienność średniej średnicy kropel cieczy jest wynikiem nieustannie zachodzących procesów koalescencji i wtórnego rozpadu, a dyskretna wartość średniej średnicy kropel zależy od położenia punktu równowagi pomiędzy siłami aerodynamicznymi i siłami napięcia powierzchniowego w określonym przekroju kontaktora,
- siła wyporu aerostatycznego działająca na elementy fazy ciekłej jest do pominięcia.

3. MODEL RUCHU KROPEL

Faza dyspersyjna (krople) w trakcie przemieszczania się wzdłuż strefy kontaktu systematycznie przyspiesza (w wyniku współoddziaływania sił oporu ośrodka, bezwładności i grawitacji) osiągając prędkości zbliżone do prędkości gazu.

Jednowymiarowy ruch kropel modelowano na podstawie równania różniczkowego o wyjściowej postaci:

$$m_k \frac{dw_k}{dt} + m_k \cdot g - R = 0 \tag{1}$$

przy czym

$$w_k = w_{og} - w_{wk} \text{ - prędkość bezwzględna...} \tag{2}$$

zaś

$$R = \frac{\pi}{8} \cdot \Psi \cdot \rho_g \cdot w_{wk}^2 \cdot d_k^2 \text{ - siła oporu} \tag{3}$$

Współczynnik oporu ośrodka Ψ określono ogólną zależnością:

$$\Psi = \frac{\alpha}{Re} \tag{4}$$

gdzie:

$$Re = \frac{w_{wk} \cdot d_k \cdot \rho_g}{\eta_g} \tag{5}$$

zaś współczynnik α zdefiniowano jako funkcję podstawowych hydrodynamicznych parametrów pracy płuczki, tj. prędkość gazu w_{og} i natężenie zraszania N_z. Współczynnik α uwzględnia zjawiska koalescencji i wtórnego rozpadu oraz migracji cieczy między filmem i kroplami. Uwzględnia on także wpływ hydrodynamicznych parametrów pracy płuczki na porowatość obszaru kropel (a więc wzajemną komfigurację kropel), od której współczynnik oporu ośrodka jest zależny.

Zależność $\alpha = f(w_{og}, N_z)$ określona została doświadczalnie i przedstawiona w pracach [3] i [4]:

$$\alpha = (A_1N_z^2 + B_1N_z + C_1) \cdot w_{og}^2 + (A_2N_z^2 + B_2N_z + C_2) \cdot w_{og} + \\ + (A_3N_z^2 + B_3N_z + C_3) \tag{6}$$

Rzeczywisty zbiór kropel przypływających w strumieniu gazu w iniekcyjnej płuczce reprezentowany jest przez średnią średnicę Sautera d_k określoną z zależności Nukiyamy i Tanasawy [1], [2]:

$$d_k = 10^{-3} \cdot \left[\frac{585\sqrt{\sigma}}{w_{wk}\sqrt{\rho_c}} + 0{,}3556 \left(\frac{\eta_c}{\sigma\rho_c}\right)^{0{,}45} \left(\frac{1000\,\dot{V}_c}{\dot{V}_g}\right)^{1{,}5} \right] \tag{7}$$

Przydatność tej zależności do określania stopnia dysperszji fazy ciekłej w szybko przepływających strumieniach gazu (np. w celu modelowania procesów odpylania i absorpcji zanieczyszczeń gazowych w płuczkach Venturiego) stwierdzili autorzy wielu publikacji [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12].

Problem przydatności formuły (7) został ponadto szczegółowo omówiony w pracach [13] i [14].

Równanie (1) rozwiązano metodą rozdzielenia zmiennych i przy założeniu warunków brzegowych:

$$t = 0,\ w_{wk} = (w_{wk})_o,\ x = 0$$

otrzymano:

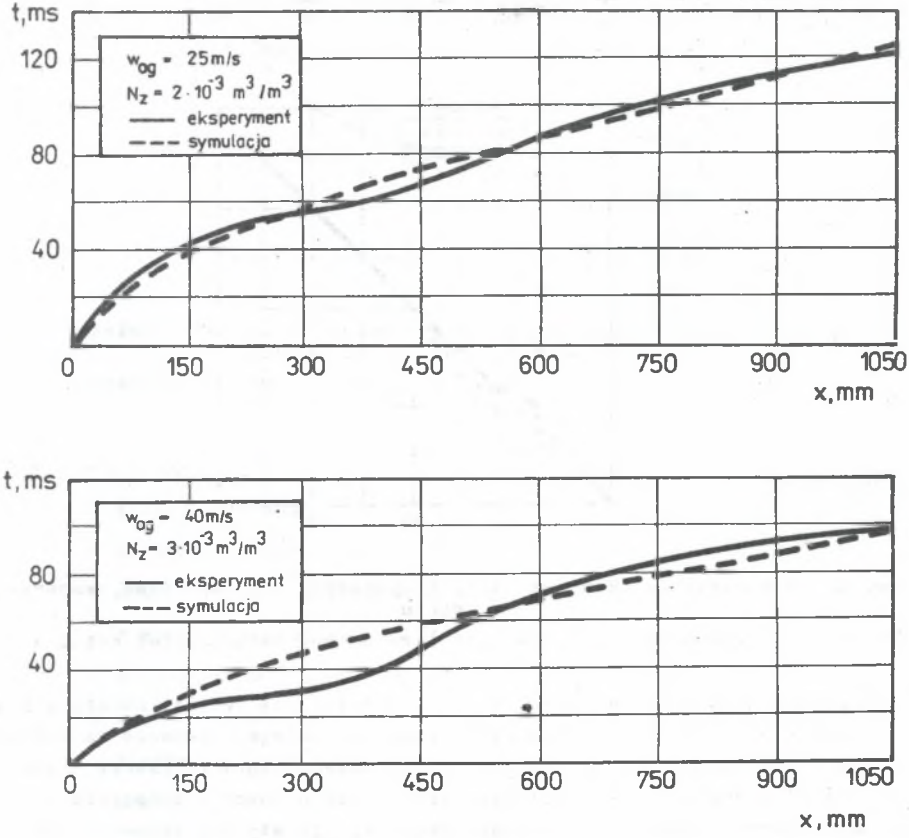
$$w_{wk} = \left[(w_{wk})_o - g \cdot \frac{m_k}{\tau}\right] \cdot e^{-\frac{\tau}{m_k} \cdot t_k} + g \cdot \frac{m_k}{\tau} \tag{8}$$

$$x = \left(w_{og} - g \cdot \frac{m_k}{\tau}\right) \cdot t_k + \frac{m_k}{\tau} \cdot \left[(W_{wk})_o - g \cdot \frac{m_k}{\tau}\right] \cdot \left(e^{-\frac{\tau}{m_k} \cdot t_k} - 1\right) \tag{9}$$

gdzie:

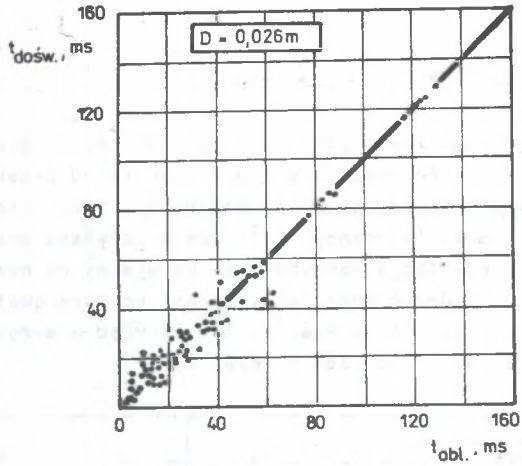
$$\tau = \frac{\pi \alpha}{8} \cdot \eta_g \cdot d_k \tag{10}$$

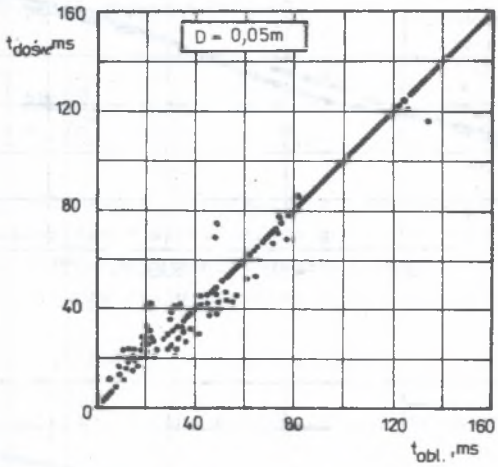
Przykładowe przebiegi zależności czasu przemieszczania się kropel cieczy od odległości rozpatrywanego przekroju aparatu od przekroju iniekcji cieczy ilustrują wykresy przedstawione na rys. 2. Linie ciągłe to ilustracja wyników eksperymentu fizycznego [3], zaś przerywane wykreślono opierając się na wynikach symulacji komputerowej bazującej na wyżej przedstawionych zależnościach. Zgodność wyników symulacji komputerowej z danymi eksperymentalnymi przedstawiono na rys. 3, zaś rozkład prawdopodobieństwa występowania określonych odchyleń na rys. 4.



Rys. 2. Zależność czasu przemieszczania się kropel od odległości od przekroju iniekcji cieczy - przykładowe przebiegi

Fig. 2. Time of displacement of droplets versus the distance from the section of liquid injection - typical characteristics



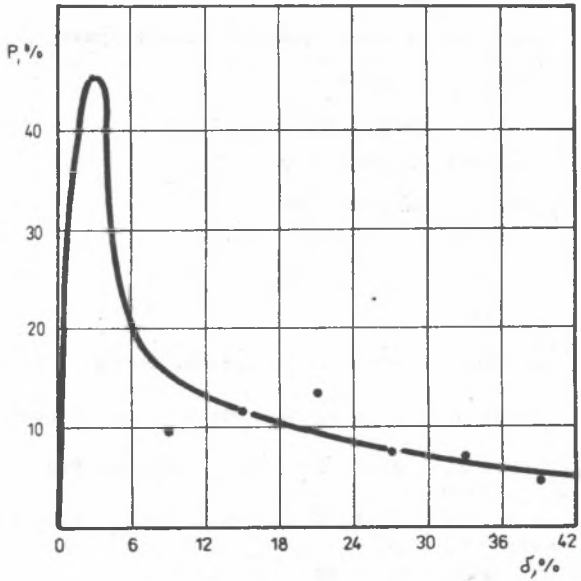


Rys. 3. Porównanie wyników symulacji komputerowej z wynikami eksperymentu

Fig. 3. Comparison of computer simulation and experimental results

Przedstawiony materiał ilustracyjny, a zwłaszcza rys. 2, obnażają pewne niedoskonałości modelu. Niedoskonałości te polegają głównie na pośrednim tylko (współczynnik α) uwzględnieniu wpływu migracji cieczy między fazą rozproszoną i ciągłą. Niemniej jednak już w obecnej uproszczonej postaci zgodność modelu z rzeczywistością wydaje się być zadowalająca i stwarza możliwość wykorzystania go w projektowaniu. Dalsze prace nad doskonaleniem modelu zmierzają w kierunku ujęcia w nim w bezpośredniej formie wpływu parametrów ruchu filmu i migracji cieczy na strukturę i ruch kropel. W tym celu autorzy rozważają możliwość m.in. wprowadzenia

w miejsce jednolitego pod względem struktury i prędkości zastępczego zbioru kropel wielu podzbiorów różniących się pochodzeniem i wszystkimi wynikającymi stąd parametrami, np. lokalna średnia średnica i prędkość.



Rys. 4. Rozkład prawdopodobieństwa występowania określonych wartości odchyleń wyników symulacji i eksperymentu

Fig. 4. Probability of distribution of deviations between simulation and experimental results

Stosowane oznaczenia

A, B, C - stałe w równaniu (6)

d_k - średnia średnica kropel, m

g - przyspieszenie ziemskie, m/s^2

N_z - natężenie zraszania, m^3/m^3

m_k - średnia masa kropli, kg

R - siła oporu ośrodka, N

Re - liczba Reynoldsa,

t - czas, s

t_k - czas kontaktu kropel z gazem, s

w_k - prędkość kropel, m/s

w_{og} - prędkość gazu, m/s

w_{wk} - prędkość kropel względem gazu, m/s

$(w_{wk})^o$ - początkowa prędkość kropel względem gazu, m/s

$\dot{V}_c$, $\dot{V}_g$ - strumień objętości cieczy, gazu, m^3/s

α - współczynnik w równaniu (4),

η_c, η_g - dynamiczny współczynnik lepkości cieczy, gazu, kg/ms

Ψ - współczynnik oporu ośrodka,

ρ_c, ρ_g - gęstość cieczy, gazu, kg/m^3

σ - napięcie powierzchniowe, N/m

τ - współczynnik w równaniu (10).

LITERATURA

[1] Nukiyama S., Tanasawa Y.: Trans. Soc. Mech. Engrs (Japan), 4, 15, 137(1938).

[2] Nukiyama S., Tanasawa Y.: Trans. Soc. Mech. Engrs (Japan), 5, 18, 63(1989).

[3] Meloch H., Knop F.: Rap. Inst. Inż. Ochr. Środow. Pol. Wrocł. SPR nr 64/84, Wrocław 1984.

[4] Meloch H., Knop F.: Rap. Inst. Inż. Ochr. Środow. Pol. Wrocł., SPR nr 5/86, Wrocław 1986.

[5] Lewis H.C. i in.: Ind. Eng. Chem., 40, 1, 67(1949).

[6] Shui-Chow-Yung J. i in.: JAPCA, 4, 348(1977).

[7] Ekman F.O., Johnstone H.F.: Ind. Eng. Chem., 43, 6, 1358(1951).

[8] Calvet S. i in.: JAPCA, 22, 7, 529(1972).

[9] Johnstone H.F., Roberts M.H.: Ind. Eng. Chem., 41, 11, 2417(1949).

[10] Boll R.H. i in.: JAPCA, 24, 10, 934(1974).

[11] Kropp L.J., Akbrut A.J.: Tiepłoenergetika, 7, 73(1972).

[12] Jarzębski L.: Rozprawa doktorska, Inst. Podstaw Inż. Środow. PAN, Zabrze 1976.

[13] Kabsch P., Meloch H.: Rap. Inst. Inż. Ochr. Środow. Pol. Wrocł. nr 322/78, Wrocław 1978.

[14] Meloch H.: Rozprawa doktorska, Inst. Inż. Ochr. Środow. Pol. Wrocł., Wrocław 1979.

СИМУЛАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ КАПЕЛЬ В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ИНЖЕКТОРНОМ СКРУББЕРЕ

Р е з ю м е

Представлено основы упрощенного математического моделя движения капель в инжекторных скрубберах. Описано результаты циферной симулации параметров движения капель.

PARAMETERS OF MOVEMENT OF DROPLETS IN HIGH-VELOCITY INJECTION SCRUBBER - COMPUTER SIMULATION

S u m m a r y

The principles of simplified mathematical model of droplet movement in injection scrubbers have been presented. This model has been veryfied experimentally. Results of computer simulation for some droplet movement parameters have been presented and discussed.