

Witold GUTOWSKI

Instytut Podstaw  
Inżynierii Środowiska  
Polska Akademia Nauk  
Zabrze

WPŁYW PRĘDKOŚCI PRZEPŁYWU ZAPYLONEGO GAZU  
PRZEZ FILTRY PYŁOWE NA SKUTECZNOŚĆ PRZYCZEPNOŚCI CZĄSTEK PYŁU  
DO ELEMENTÓW FILTRACYJNYCH

**Streszczenie.** W publikacji przedstawiono wyniki badań doświadczalnych mających na celu określenie zależności skuteczności przyczepności cząstek pyłu do elementów filtracyjnych od prędkości filtracji zapyłonego gazu. Doświadczenia zaprogramowano na podstawie probabilistycznej teorii filtracji systemów dyspersyjnych, która jako jedyna uwzględnia w sposób analityczny wpływ przyczepności cząstek do elementów filtracyjnych na skuteczność filtracji.

Badania przeprowadzono za pomocą filtra z tkaniny szklanej i pyłu aluminium o wymiarach cząstek  $2,5-3,5 \mu\text{m}$  w zakresie prędkości dopływu zapyłonego powietrza  $0,1-0,35 \text{ m/s}$ .

Wyniki badań wykazały, że elementarna skuteczność przyczepności cząstek do włókien w procesie filtracji zapyłonego powietrza maleje proporcjonalnie do 3 potęgi prędkości powietrza.

## 1. WSTĘP

Filtry pyłowe są to urządzenia odpylające złożone z pewnej liczby, zwykle dostatecznie wielkiej, elementów filtracyjnych, np. włókien lub ziaren. Podczas przepływu zapyłonego gazu przez filtr następuje opływ poszczególnych elementów, zderzenie cząstek pyłu z elementami i osadzenie na ich powierzchni (wytrącanie, filtracja).

Mechanizm zderzeń cząstek z elementami filtracyjnymi charakteryzują siły powodujące wytrącanie cząstek z linii prądu podczas opływu i ruch tych cząstek w kierunku elementów. Są to najczęściej siły bezwładności lub siły pochodzące z prądu dyfuzji, przy czym dla przeważającej większości pyłów z technologii przemysłowych występuje głównie mechanizm bezwładnościowy.

## 2. SKUTECZNOŚĆ PRZYCZEPNOŚCI - TEORIA

Skuteczność filtracji określona jako stosunek liczby cząstek osadzonych do liczby cząstek dopływających do filtru w jednostce czasu zależy od skuteczności elementarnej definiowanej jako skuteczność filtracji na pojedynczym elemencie lub pojedynczej (elementarnej) warstwie elementów filtracyjnych. Aby cząstka została w procesie filtracji wytrącona (osadzona na powierzchni elementu filtracyjnego), musi ona zderzyć się z elementem filtracyjnym i ulec trwałemu przyłączeniu do jego powierzchni. Z kolei zderzenie cząstki z elementem filtracyjnym jest możliwe tylko wtedy, gdy cząstka znajdzie się dostatecznie blisko elementu, ogólnie - gdy znajdzie się podczas przepływu przez filtr w obszarze możliwych zderzeń z elementem filtracyjnym [1]. Elementarna skuteczność filtracji wyraża się zależnością wyprowadzoną [1] na podstawie probabilistycznego potraktowania zagadnienia, mianowicie przy określeniu elementarnych skuteczności poszczególnych zjawisk (położenia cząstki w obszarze możliwych zderzeń z elementem filtracyjnym, zderzenia z nim i przyłączenia do jego powierzchni) jako prawdopodobieństw warunkowych zajęcia tych zjawisk jednocześnie. Zależność ta ma postać:

$$E = E_z E_p E_o, \quad (1)$$

gdzie:

- $E$  - elementarna skuteczność filtracji,
- $E_z$  - elementarna skuteczność zderzeń,
- $E_p$  - elementarna skuteczność przyłączenia,
- $E_o$  - elementarna skuteczność położenia w obszarze możliwych zderzeń.

Skuteczności elementarne można przedstawić jako funkcje fizycznych kryteriów (liczb kryterialnych) opisujących poszczególne zjawiska, mianowicie:

$$E_x = \delta_x G_x^{k_x}, \quad (2)$$

gdzie:

- $G_x$  - odpowiednie kryterium (zderzeń -  $G_z$ , przyłączenia -  $G_p$  lub położenia -  $G_o$ ),
- $\delta_x$  - czynnik normujący,
- $k_x$  - rzeczywisty wykładnik potęgowy

Na skuteczności  $E_x$  nałożono warunek:

$$E_x = \begin{cases} \delta_x G_k^k & \text{gdy } \delta_{x_i} \cdot G_{x_i}^k < 1 \\ 1 & \text{gdy } \delta_{x_i} G_{x_i}^k \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

gdzie  $\delta_x G_x^k$  oznacza wartość kryterium  $\delta_x G_x^k$  gdzie indeks  $x$  oznacza indeks  $z$ ,  $p$  lub  $o$ .

W odniesieniu do skuteczności przyczepności:

$$E_p = \delta_p G_p^k \quad (4)$$

Kryterium  $G_p$  wyprowadzono w pracy [2] w postaci:

$$G_p = 4H^2 \phi_p \frac{\beta_k A}{a_k w^2 \rho_c} \quad (5)$$

gdzie:

$H$  - czynnik hydrodynamiczny zależny od pola prędkości,

$\phi_p$  - stała empiryczna,

$\beta_k$  - porowatość filtru,

$A$  - energia właściwa adhezji cząstki do powierzchni zderzenia,

$a_k$  - geometryczny wymiar cząstki (dla zastępczego kształtu kulistego odpowiada jej średnicy),

$w$  - prędkość dopływu gazu (pływu) do filtru,

$\rho_c$  - gęstość cząstki pyłu.

Metody oznaczania poszczególnych fizycznych wielkości wchodzących w skład kryterium  $G_p$  zostały opracowane w IPIŚ PAN Zabrze i są opisane w PN "Ochrona czystości powietrza", oznaczonych jako normy arkuszowe "Z".

Energia właściwa adhezji  $A$  jest w procesach filtracji praktycznie energią właściwą autohezji, tzn. adhezji cząstek pyłu do tych samych cząstek, które w krótkim czasie pokrywają powierzchnię czynną elementu filtracyjnego. Oznacza się ją mierzac siłę autohezji warstwy pyłu za pomocą autohezmometru pyłowego Andrianowa opracowanego w NIIOGAZ w Moskwie i zmodernizowanego w IPIŚ PAN Zabrze. Zasada jego działania jest inna niż metody pomiaru siły autohezji podanej w PN.

### 3. DOŚWIADCZALNA WERYFIKACJA TEORII

Doświadczalna weryfikacja teorii przedstawionej w pkt. 2 natrafiała na znaczne trudności, należało bowiem stworzyć warunki, w których  $E_z = 1$  i jednocześnie  $E_p < 1$ . Wymagało to przede wszystkim uzyskania odpowiedniego pod względem wymiarów cząstek i gęstości monodispersyjnego pyłu próbnego oraz dobrania odpowiedniego zakresu prędkości dopływu gazu. Dlatego też, pomimo że podana teoria została opublikowana w 1977 r., to jej pierwszą doświadczalną weryfikację przeprowadzono dopiero na przełomie lat 1983/1984, a jej wyniki są po raz pierwszy przedstawione w niniejszym referacie.

Do badań zastosowano pył aluminium uzyskany w niewielkiej ilości ze Stanów Zjednoczonych. Cząstki tego pyłu miały kształt bezpostaciowy, jednak zbliżony do obłego, ponadto charakteryzowały się dobrą monodispersyjnością. Ich wymiary geometryczne wynosiły  $3 \mu\text{m} \pm 3-5\%$ . Pył uległ dobremu rozproszeniu prądem powietrza i jego obraz mikroskopowy wykazywał niewielką liczbę koagulatów.

Zmierzona za pomocą piknometru cieczowego gęstość cząstek wynosiła  $2750 \text{ kg/m}^3$ , a energia właściwa autohezzji  $A = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ J/m}^2$ . Jako filtr badany zastosowano tkaninę szklaną o wymiarach (średnicach) włókien  $18 \mu\text{m}$ , porowatości 0,825 i grubości 2,5 mm.

Po nasyceniu filtru olejkiem konimetrycznym można przyjąć, że w początkowej fazie filtracji przychepność jest całkowita ( $E_p = 1$ ), tak więc na skuteczność filtracji wpływa tylko skuteczność zderzeń i skuteczność położenia. Przy prędkościach dopływu powietrza 0,03–0,1 m/s skuteczność filtracji filtru nasyczonego olejkiem rosła ze wzrostem prędkości, co wskazuje na bezwładnościowy mechanizm zderzeń. W zakresie 0,1–0,35 m/s w wytworzonych warunkach filtracji skuteczność ustalała się na poziomie bliskim 1, co oznacza, że wszystkie dopływające cząstki ulegały zderzeniu, a więc  $E_z \approx 1$  oraz  $E_0 \approx 1$ . W tym zakresie prędkości (w filtrze bez zastosowania olejku) skuteczność filtracji powinna być tylko skutecznością przychepności i zgodnie ze wzorem (5) powinna maleć ze wzrostem prędkości dopływu. Istotnie, uzyskano takie zależności z bardzo dobrą powtarzalnością wyników. Analiza uzyskanych przebiegów doprowadziła do ich dostatecznie dokładnego opisu za pomocą pola prędkości Kuwabary, opisanego [3] czynnikiem hydrodynamicznym w postaci:

$$W = -0,5 \ln \beta_k + \beta_k - 0,25 \beta_k^2 - 0,75 \quad (6)$$

Ostateczną zależność dla badanego procesu otrzymano w postaci:

$$\eta = 1 - \exp\left(-48H^2 \frac{\rho_k A}{a_k w^2 \rho_c}\right)^{3/2} \quad (7)$$

gdzie  $\eta$  - zmierzona skuteczność filtru będąca w danych warunkach skutecznością przyczepności.

Elementarna skuteczność filtracji, gdy charakteryzuje ją tylko skuteczność przyczepności, maleje więc proporcjonalnie do  $1/w^3$ . Przyczyną tego jest [2] quasi-sprężyste odbicie cząstek od powierzchni zderzeń, przy czym ze wzrostem prędkości rośnie prawdopodobieństwo odbicia i tym samym liczba cząstek odbitych, które przechodzą z powrotem do przepływu i są unieszone poza filtr. Na niecałkowitą przyczepność cząstek do elementu filtracyjnego mogą też wpływać lokalne wiry generowane na mikronierównościach opływającego elementu, których intensywność rośnie ze wzrostem prędkości.

Skuteczność filtracji w przeprowadzonym doświadczeniu mierzono wagowo, oznaczając masę pyłu doprowadzonego do filtru i pozostałego na filtrze w tym samym czasie.

Porównanie teorii z doświadczeniem wg zależności (7) przedstawia tabela.

Tabela

Teoretyczne i doświadczalne wartości skuteczności przyczepności cząstek w badanych warunkach, w zależności od prędkości dopływu zapyłonego powietrza

Prędkość dopływu $w$ , m/s	Skuteczność przyczepności %	
	teoretyczna wg wzoru (7)	doświadczalna
0,1	99,75	99,3
0,15	93	95,2
0,2	77,7	78
0,25	61,7	60,4
0,3	48,8	50,5
0,35	40	37,5

#### 4. MATEMATYCZNY MODEL SKUTECZNOŚCI FILTRACJI ZAPYLONEGO GAZU W PRZYPADKU BEZWŁADNOŚCIOWEGO MECHANIZMU ZDERZEŃ

W oparciu o uzyskaną analityczną zależność skuteczności przyczepności oraz znane z literatury rozważania teoretyczne i badania doświadczalne dotyczące bezwładnościowego mechanizmu zderzeń, można w celach analitycznych przedstawić zależność skuteczności filtracji zapyłonego gazu od parametrów pyłu, gazu i przepływu, w przypadku gdy każda z elementarnych skuteczności ( $E_z$ ,  $E_p$ ,  $E_o$ ) jest mniejsza od 1, co w praktycznych procesach filtracji prawdopodobnie najczęściej ma miejsce.

W przypadku bezwładnościowego mechanizmu zderzeń oraz gdy kryterialna liczba Stokesa jest znacznie większa od jej wartości krytycznej, przy której (i poniżej) bezwładnościowy mechanizm zderzeń zanika, jako kryterium zderzeń można przyjąć [4]:

$$G_z = \phi_z \left( \frac{wa^2 \rho_c}{\mu \beta_k} \right)^2, \quad (8)$$

gdzie:

$\mu$  - dynamiczna lepkość gazu,

$a$  - dynamiczny (stokesowski) wymiar cząstki odpowiadający średnicy zastępczej nieporowatej kuli,

$D$  - wymiar (średnica) elementu filtracyjnego.

Przyjmując dla uproszczenia cząstki pyłu jako nieporowate kulki, a więc wynikającą stąd równoważność wymiarów  $a_k = a$ , otrzymamy następującą postać elementarnej skuteczności zderzeń:

$$E_z = \phi_1 \left( \frac{wa^2 \rho_c}{\mu D \beta_k} \right)^2, \quad (9)$$

gdzie  $\phi_1 = \delta_z \phi_z$ ,

natomiast inne oznaczenia jak poprzednio.

Kryterium położenia jest niezależne od prędkości i wyraża się [1] wzorem:

$$G_0 = \phi_0 \frac{h}{D} \frac{1 - \beta_k}{\beta_k}, \quad (10)$$

czyli przechodząc do elementarnej skuteczności położenia cząstki w obszarze możliwych zderzeń

$$E_0 = \phi_2 \frac{h}{D} \frac{1 - \beta_k}{\beta_k}, \quad (11)$$

gdzie:

$\phi_2 = \delta_0 \phi_0$ ,

$h$  - grubość filtra.

Oznaczając iloczyn stałych  $\delta_0 \phi_2 = C$  otrzymamy wg zależności [1], w której wykładnik eksponencjalny oznacza  $E_p$  oraz po podstawieniu za-

leżności (9) i (11) do związku (1) następującą postać elementarnej skuteczności filtracji:

$$E = CH^2 \frac{a_k^{5/2} \rho^{1/2} A^{3/2}}{\mu^2 w} \frac{h}{D^3} \frac{1 - \beta_k}{\beta_k^{3/2}} \quad (12)$$

Jak widać z zależności (12), skuteczność filtracji w przypadku niepełnych (mniejszych od 1) skuteczności zderzeń, przyczepności i położenia, rośnie ze wzrostem wymiarów cząstek i maleje ze wzrostem prędkości gazu pomimo działania bezwładnościowego mechanizmu zderzeń, przy którym skuteczność samych zderzeń rośnie ze wzrostem prędkości gazu. Tego typu przebiegi uzyskuje się, jak wiadomo z literatury, w przeważającej większości procesów filtracji zapyłonych gazów przez media porowate. Z przeprowadzonych tu rozważań i doświadczeń wynika niewątpliwie, że przyczyną tego jest zjawisko niepełnej przyczepności cząstek do elementów filtracyjnych po zderzeniu.

#### LITERATURA

- [1] Gutowski W.: Statystyczna teoria rozdziału faz układu dyspersyjnego. Inżynieria Chemiczna, VII, 1, 51-72 (1977).
- [2] Gutowski W.: Kryterium przyczepności cząstek fazy rozproszonej układu dyspersyjnego do powierzchni zderzeń w przypadku quasi-sprężystego oduku oraz toczenia. Inżynieria Chemiczna, VII, 2, 341-354 (1977).
- [3] Davies C.N.: Air Filtration, Academic Press, London-New York 1973.
- [4] Fuks N.A.: Mechanika aerozolej, AN ZSRR, Moskwa 1955.

#### ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОГО ГАЗА ЧЕРЕЗ ПЫЛЕВЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИЛИПАЕМОСТИ ЧАСТИЦ ПЫЛИ К ФИЛЬТРУЮЩИМ ЭЛЕМЕНТАМ

#### Резюме

В работе приведены результаты экспериментальных исследований, ставящих своей целью определение зависимости эффективности прилипаемости частиц пыли к фильтрующим элементам от скорости фильтрации зпылённого газа. Опыты были запрограммированы на основе вероятностной теории дисперсионных систем. Только эта теория учитывает аналитическим образом влияние прилипаемости частиц к фильтрующим элементам на эффективность фильтрации.

Исследования проводили при помощи фильтра из стеклянной ткани и алюминиевой пыли с размерами частиц 2,5-3,5 мкм, в пределах скорости притока зпылённого воздуха 0,1-0,35 м/с.

Результаты исследований показали, что элементарная эффективность прилипаемости частиц к волокнам в процессе фильтрации зпылённого воздуха уменьшается пропорционально к третьей степени скорости воздуха.

AN INFLUENCE OF DUSTY GAS FLOW VELOCITY IN A FILTER ON THE ATTACHMENT  
EFFICIENCY OF DUST PARTICLES TO FILTRATION ELEMENTS

S u m m a r y

In the paper results of experimental investigations aimed at determining the relationship between attachment efficiency of dust particles and the flow velocity of gas have been presented.

The plan of experiments was based on probabilistic filtration theory, the unique one which considers the influence of particles attachment to filtration element on collection efficiency in an analytical way. Investigation have been performed using a filter with fibre glass material and aluminium powder of diameter in the range of 2,5 to 3,5  $\mu$ m, and air velocity of 0,1 to 0,35 m/s.

It has been showed that single fibre attachment efficiency of particles decreases proportionally to the third power of air velocity.