

Stanisław Gumuła\*, Małgorzata Piaskowska

## Koncepcja i wyniki badań eksperymentalnych filtru objętościowego wielowarstwowego

### Przedmiot badań

Wyniki badań, przedstawione w pracy [4], wykazują, że filtr powietrza z wkładem papierowym, w miarę eksploatacji, charakteryzuje się znaczną zmianą charakterystyk. Przy zapewnieniu stałego strumienia objętości, dochodzi do wzrostu straty ciśnienia, a tym samym straty energii na filtrze. Natomiast przy zachowaniu stałej różnicy ciśnień wymuszającej przepływ mamy do czynienia ze spadkiem strumienia przepływającego płynu i szybko narastającą stratą ciśnienia, a tym samym stratą energii. Dzieje się tak dlatego, że cienki papier filtracyjny ma bardzo małe możliwości gromadzenia pyłu w swojej objętości. Duże frakcje pozostają na powierzchni, a drobniejsze wnikają głębiej, szybko wypełniając wolną przestrzeń. W efekcie filtr zatyka się coraz bardziej, powodując coraz większe przyrosty strat ciśnienia.

Rozwiązaniem tego problemu może być filtr zbudowany z kilku warstw filtracyjnych o dużo większej objętości (a co za tym idzie chłonności) w porównaniu z wkładem papierowym. Zastosowanie warstw o zróżnicowanej gęstości (współczynnikach filtracji), umożliwi równomierne wychwytywanie cząstek pyłu na całej długości filtru, co oznacza równomierną pracę całej jego objętości.

Badaniom poddano trzy rodzaje filtrów objętościowych. Rozkład gęstości w poszczególnych warstwach tych filtrów został pokazany w tabeli 1. Pierwszy wariant (1):  $\rho = \text{const}$ . Drugi wariant (2):  $\rho = c \cdot x$  (liniowy). Trzeci wariant (3), w którym gęstość materiału filtracyjnego zmieniała się w sposób nieliniowy, został określony przy wykorzystaniu rozważań teoretycznych przedstawionych w części 3. Podstawowym elementem każdego z tych filtrów była warstwa filtracyjna o średnicy 100 mm i wysokości 10 mm, złożona z pianki filtracyjnej PPI20 o określonej gęstości.

\* Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.

Filtr	Warstwa 1	Warstwa 2	Warstwa 3	Warstwa 4	Warstwa 5
	gęstość [g/m <sup>3</sup> ]				
1.	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048
2.	0,048	0,072	0,096	0,120	0,144
3.	0,024	0,048	0,072	0,096	0,144

**Tabela 1.** Rozkład gęstości warstw filtracyjnych w badanych filtrach objętościowych

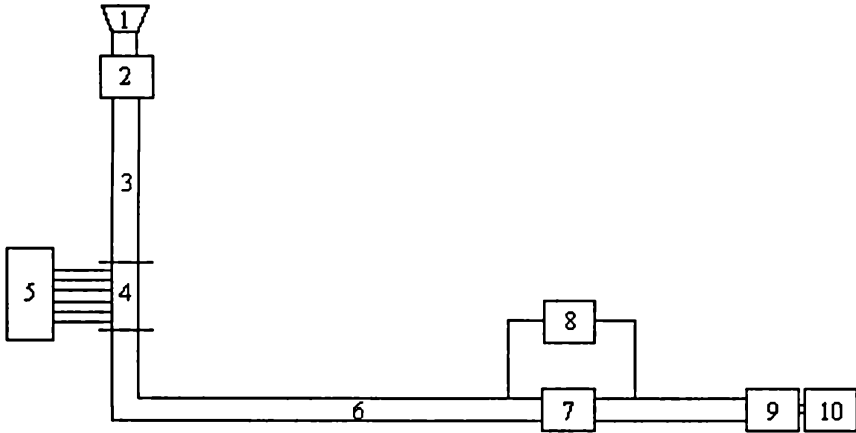
W badaniach filtrów objętościowych wykorzystano pył z elektrofiltrów, pochodzący z Huty im. Tadeusza Sendzimira S.A. w Krakowie. Skład frakcyjny pyłu został przedstawiony w tabeli 2. Miał on gęstość w stanie nie utrzesionym 770 mg/m<sup>3</sup> i nie był aktywny chemicznie.

Wielkość frakcji [μm]	Udział %
< 5	37,2
5 ÷ 10	1,4
10 ÷ 20	17,8
20 ÷ 30	10,2
30 ÷ 40	6,6
40 ÷ 50	5,1
50 ÷ 60	6,7
60 ÷ 75	6,8
75 ÷ 80	1,6
80 ÷ 120	4,2
120 ÷ 250	2,0
250 ÷ 500	0,4

**Tabela 2.** Skład frakcyjny pyłu z elektrofiltrów (wg danych Huty im. T. Sendzimira)

## Stanowisko badawcze i metodyka badań

Schemat stanowiska badawczego przedstawiony został na rysunku 1.



**Rys. 1.** Schemat stanowiska badawczego: 1 – podajnik pyłu, 2 – rozpylacz pyłu, 3 – przewód wlotowy, 4 – filtr objętościowy, 5 – manometr bateryjny, 6 – przewód kontrolno-pomiarowy, 7 – kryza ISA, 8 – przetwornik PRC, 9 – wentylator wyciągowy, 10 – układ regulacji prędkości przepływu

Dodatkowo układ pomiarowy wyposażony był w elektroniczną wagę precyzyjną WPS 110/C/2 i suszarkę Chirana TER 4/I.

Przed wykonaniem badań pył mieszano przez 15 minut w szczelnie zamkniętym pojemniku, aby zapewnić stały skład granulometryczny, a następnie suszono do uzyskania stałej masy w temperaturze  $65 \pm 5^\circ\text{C}$ . Z przygotowanego w ten sposób pyłu odważano potrzebną porcję na wadze analitycznej z dokładnością  $10^{-4}$  g i umieszczano w podajniku pyłu.

W celu zapewnienia stałej masy warstw filtracyjnych poddano je piętnastominutowej klimatyzacji w strumieniu objętości powietrza analogicznym jak podczas badań. Warstwy filtracyjne ważono na wadze analitycznej przed klimatyzacją i przynajmniej raz (jeżeli masy były takie same) po klimatyzacji, a następnie umieszczano w filtrze.

Rozpylacz pyłu zapewniał równomierne sypanie się pyłu, a przewód wlotowy dokładne jego wymieszanie z powietrzem. Powstała mieszanina dwufazowa trafiała na filtr. Dwa króćce pomiarowe umieszczone przed i za każdą z warstw filtracyjnych, podłączone do manometru bateryjnego, pozwalały mierzyć stratę ciśnienia (opory przepływu). Sumaryczna wartość strat ciśnienia na wszystkich warstwach odpowiadała stracie ciśnienia na filtrze. Oczyszczone na filtrze powietrze płynęło przez przewód kontrolno-pomiarowy z kryzą ISA do wentylatora wyciągowego, podłączone-

go do układu regulacji prędkości przepływu. Różnica ciśnień na kryzie, odczytana z przetwornika PRC o dokładności 10 Pa, pozwoliła określić strumień objętości.

Po 2400 godzinach pracy filtra określono:

- stratę ciśnienia na poszczególnych warstwach filtracyjnych przy pomocy manometru bateryjnego z dokładnością  $\pm 4$  Pa,
- masę warstw filtracyjnych przy pomocy wagi precyzyjnej WPS 110/C/2 z dokładnością  $10^{-3}$  g.

Podczas badań dostarczano do układu filtrującego taką samą masę pyłu: 4620 mg.

### Podstawowe równania procesu filtracji

Istnieje wiele prac eksperymentalnych i teoretycznych [1, 2, 3, 5] poświęconych zjawisku filtracji w filtrach objętościowych, tzn. filtrach, w których proces filtracji przebiega wzdłuż drogi, której wymiary porównywalne są z wymiarami liniowymi powierzchni filtrującej. Rozróżnia się w nich trzy rodzaje równań opisujących przebieg zjawiska filtracji w filtrze objętościowym:

$$\frac{\partial P(x, t)}{\partial t} = \alpha C(x, t) \quad (1)$$

$$\frac{\partial P(x, t)}{\partial t} = \alpha C(x, t)[A - P(x, t)] \quad (2)$$

$$\frac{\partial P(x, t)}{\partial t} = -\alpha[P(x, t) - \gamma][P(x, t) - \beta]C(x, t) \quad (3)$$

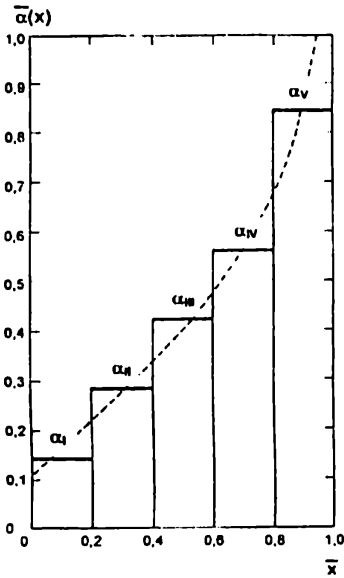
gdzie:  $\alpha$  – współczynnik aktywności filtracji (współczynnik filtracji),  
 $P(x, t)$  – stężenie zatrzymanej w ośrodku porowatym fazy stałej (masy pyłu),  
 $C(x, t)$  – stężenie wpływającej do ośrodka porowatego mieszaniny dwufazowej,  
 $\gamma, \beta$  – stałe,  
 $x$  – współrzędna przestrzenna,  
 $t$  – czas przepływu mieszaniny dwufazowej,  
 $A = P(x, t)_{\max}$

Eksperymenty wykazały, że pracę filtrów objętościowych, przez które przepływa mieszanina dwufazowa powietrze – pył, opisuje równanie (1). Równanie to wraz z równaniem bilansu:

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} + v \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} + \frac{\partial P(x, t)}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

stanowi komplet równań pozwalających określić przebieg zjawiska filtracji, to znaczy funkcję oznaczoną jako  $P(x,t)$ : Ma ona postać:

$$P(x,t) = -C_0 \alpha(x - Vt) e^{-\alpha x} \quad (5)$$



Rys. 2. Kształtowanie się wartości współczynnika  $\alpha$  w zależności od współrzędnej  $x$  (linia przerywana – krzywa teoretyczna, linia schodkowa – realizacja praktyczna)

kształtowanie się współczynników filtracji w zrealizowanym praktycznie filtrze.

Funkcja ta obrazuje kształtowanie się rozkładu masy wyłapanych zanieczyszczeń w odniesieniu do jednostki objętości, czyli stężenie pyłu zatrzymanego w ośrodku filtrującym. Z masą  $m$ , stosowaną przy przedstawieniu wyników w dalszej części artykułu, funkcja  $P$  posiada prosty związek:  $m(x,t) = P(x,t)\Omega$ , gdzie  $\Omega$  jest objętością, w której zgromadzona jest masa  $m$ .

Równania (1), (4) i (5) pozwalają również określić zależność na kształtowanie się współczynnika filtracji  $\alpha$  wzdłuż drogi filtracji, czyli gęstości materiału filtracyjnego, w ten sposób by funkcja  $P(x,t)$  opisująca przebieg zjawiska filtracji wzdłuż drogi filtracji miała wartość stałą. Dla tak sprecyzowanego warunku funkcja  $\alpha$  ma postać:

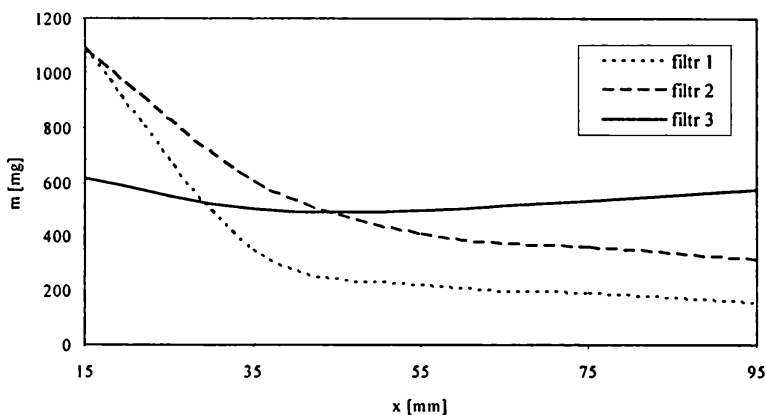
$$\alpha(x) = V \frac{\alpha_0}{V - \alpha_0 \gamma \beta x} \quad (6)$$

Zależność ta dla filtru pięciowarstwowego została przedstawiona linią przerywaną na rysunku 2, natomiast linią schodkową zaznaczono

### Wyniki badań i analiza wyników badań

Na rysunku 3 zestawiono kształtowanie się rozkładu masy wyłapanego pyłu wzdłuż długości filtrów o stałej (1) i wzrastającej liniowo (2) gęstości warstw, przy prędkości przepływu mieszaniny dwufazowej przez przewód wynoszącej 6 m/s. Zaznaczone na osi odciętych odległości odpowiadają środkom warstw tworzących filtr.

Jak widać, warstwa I obydwu filtrów wyłapuje zdecydowanie największe masy pyłu. Jest to zjawisko niekorzystne, gdyż prowadzi do skrócenia czasu prawidłowej pracy filtru. W takim przypadku bowiem zużywanie się warstw filtracyjnych będzie nierównomierne.



Rys. 3. Rozkład masy pyłu wzdłuż długości filtrów objętościowych

Obserwując rozkład masy pyłu w kolejnych warstwach (II, III, IV, V) obydwu filtrów, można powiedzieć, że wyłapują one coraz mniej. Jednak zastosowany w filtrze (2) liniowy wzrost gęstości pozwala wychwycić zdecydowanie większe ilości pyłu, co oznacza, że jest on skuteczniejszy od filtru (1).

Filtr (3) na rysunku 3 pokazuje, w jakim stopniu udało się osiągnąć planowane zależności  $P(x, t_0) = \text{const.}$ , czyli  $m(x, t_0) = \text{const.}$  (tj. równą pracę wszystkich warstw filtracyjnych), dzięki zastosowaniu filtru odpowiadającego krzywej teoretycznej, określonej wzorem (6) i jej realizacji praktycznej, krzywą schodkową przedstawioną na rysunku 2. Taki układ warstw gwarantuje żywotność filtru zbliżoną do maksymalnej. Ideałem byłoby osiągnięcie prostej równoległej do osi  $x$ , jednakże ze względów technicznych jest to trudne do uzyskania.

Na koniec warto zaznaczyć, że wspomniany problem dużych przyrostów strat ciśnienia towarzyszących eksploatacji filtrów z wkładem papierowym, filtry objętościowe mogą rozwiązać znakomicie. Wyjściowe straty ciśnienia w funkcji strumienia objętości dla obydwu typów filtrów (płaskich oraz objętościowych) są zbliżone do siebie. Jednak w miarę eksploatacji okazuje się, że coraz większym przyrostom strat ciśnienia na filtrach z wkładem papierowym prawie nie towarzyszą przyrosty strat ciśnienia w filtrach objętościowych ( $\Delta p \approx \text{const.}$ ).

## Podsumowanie

Istnieją w literaturze modele teoretyczne pozwalające z dobrym przybliżeniem opisać proces filtracji w filtrach objętościowych. Na ich podstawie można zbudować filtr objętościowy o takim rozkładzie gęstości wzdłuż drogi filtrowania, że rozkład wyłapanej masy pyłu będzie wzdłuż tej drogi stały.

Spełnienie warunku stałej ilości masy wyłapanego pyłu na jednostkę długości filtru zapewni jego optymalną eksploatację, polegającą na równomiernej pracy całej objętości filtrującej i co za tym idzie równomierne i minimalne straty energii w całym filtrze.

## Bibliografia

- [1] Bodziony J., Litwiniszyn J., *Mathematical Approach to the Phenomenon of Colmatage of an n-fractional Suspension of Particles*. Bull. Acad. Polon. Sci., Ser. sci. tech. Vol. 10, 1962, Nr 1
- [2] Litwiniszyn J., *Colmatage Considered as a Certain Stochastic Proces*. Bull. Acad. Polon. Sci., Ser. sci. tech., Vol. 11, 1963, Nr 3
- [3] Litwiniszyn J., *The Phenomenon of Colmatage*. Archiwum Mechaniki Stosowanej, 1966, nr 4 (18)
- [4] Piaskowska M., „Zjawisko filtracji w suchych materiałach porowatych”. Praca doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2005
- [5] Trzaska A., *Experimental Research on the Phenomenon of Colmatage*. Bull. Acad. Polon. Sci., Ser. sci. tech., Vol. 13, 1965, Nr 9

## A multilayer depth filter: principles of operation and experiment results

### Abstract

Experimental research shows that dry air filters based on filter paper are marked by a considerable change of characteristics, progressing with time of operation. With a stable air-stream flowing through the filter, there is an increase in pressure loss, which means energy loss on the filter, whereas with a stable difference of pressures, which forces the air flow, the stream flowing through the filter diminishes.

A solution to this problem may be a filter which retains pollution throughout its interior, consisting of a number of filtrating layers, whose density varies along the way of the dusted air-stream flow. On the basis of filtration theory, it is possible to select the density of particular layers in such a way that the amount of contaminants stopped by each layer is the same.

The article describes the results of experimental tests conducted on filters consisting of five filtering layers. It presents the distribution of the retained pollution mass along the way of the air-stream through the filter, in relation to the density of particular filtering layers.

Key words: filtration process, multilayer depth air filter