

FILTARTION PARTITION MODEL OF THE AUTOMOTIVE FILTER

Dariusz Wiśniewski

Motor Transport Institute
Jagiellońska Street 80, 03-301 Warsaw, Poland
tel.: +48 22 8110296, fax: +48 22 8110906
e-mail: dariusz.wisniewski@its.waw.pl

Abstract

New BW probability density distribution, developed at the Motor Transport Institute, is one of the best approximations of the flow distribution through the filtration material pours. The distribution has two parameters of unequivocal physical interpretation. BW probability distribution parameters for the real filtration materials can be established using several experimental methods. To estimate distribution parameters, it is possible to use e.g. automatic particulate counters with the possibility to establish number of particulates in the conditions of recognisability of the significant amount of particulates' diameter; computer microscope picture analysers or testing filtration material sample with, so called bubble method.

Using BW distribution in the filters' computer simulation as elements of the fluid systems with changeable characteristics, it is possible in more optimal way to select filter properties for a particular technical solution. Simulation allows also preliminary analysis of the polluting sensitivity of the fluid system, allows to control the pollutants level and system sensitivity.

Estimation of the distribution parameters for the real filtration materials allows to classify materials with respect to their filtration properties, thus their usefulness for various applications.

Keywords: material filtration, filtration efficiency, hydrodynamic density

MODEL PRZEGRODY FILTRACYJNEJ FILTRU MOTORYZACYJNEGO

Streszczenie

Opracowany w Instytucie Transportu Samochodowego nowy rozkład gęstości prawdopodobieństwa BW jest jednym z rozkładów najlepiej aproksymujących rozkład natężeń przepływu przez pory materiału filtracyjnego. Rozkład posiada dwa parametry o jednoznacznej interpretacji fizycznej. Parametry rozkładu prawdopodobieństwa BW dla rzeczywistych materiałów filtracyjnych można wyznaczyć kilkoma metodami na drodze doświadczalnej. Do estymacji parametrów rozkładu można wykorzystać np. automatyczne liczniki cząstek posiadające możliwość wyznaczania liczby cząstek w warunkach rozróżnialności znacznej ilości średnic cząstek, komputerowe analizatory obrazu mikroskopowego lub badanie próbki materiału filtracyjnego tzw. metodą pęcherzykową.

Wykorzystując rozkład BW w symulacji komputerowej filtrów, jako elementów układów płynowych o zmieniającej się charakterystyce można w sposób bardziej optymalny dobierać właściwości filtru dla konkretnego rozwiązania technicznego. Symulacja daje również możliwość wstępnej analizy wrażliwości zanieczyszczeniowej układu płynowego, pozwala na sterowanie poziomem zanieczyszczeń oraz wrażliwością układu.

Estymacja parametrów rozkładu dla rzeczywistych materiałów filtracyjnych pozwala na klasyfikowanie materiałów pod względem ich właściwości filtracyjnych i w ślad za tym ich przydatności w różnych zastosowaniach.

Słowa kluczowe: materiał filtracyjny, efektywność filtracji, gęstość hydrodynamiczna

1. Wstęp

Podstawową właściwością motoryzacyjnego filtru oleju silnikowego, paliwa czy też innego medium, wynikającą z jego funkcji, jest skuteczność oczyszczania. Właściwość ta jest ściśle powiązana z układem, w którym pracuje filtr. Prawidłowy dobór filtru do określonego

zastosowania powinien opierać się na podstawie wyrażonych ilościowo wskaźników lub charakterystyk oceniających efektywność filtrowania w jego stanie początkowym oraz w czasie eksploatacji. Dodatkowym kryterium oceny skuteczności jest również umiejscowienie filtra w układzie oraz fizyczna zasada jego działania. Istnieją dwie zasadnicze odmiany filtrów wynikające z zasady działania: filtry porowate nazywane często filtrami mechanicznymi oraz filtry energetyczne, do których należą urządzenia wykorzystujące siły grawitacji naturalnej i wymuszonej (wirówki, cyklony) oraz filtry magnetyczne i elektryczne.

Niezależnie od zasady działania, ocenę skuteczności działania filtra można dokonać przez określenie stosunku zawartości zanieczyszczeń w cieczy roboczej przed i po przejściu przez filtr. Jednakże ze względu na powszechność stosowania filtrów porowatych rozwinęły się także inne kryteria oceny ich efektywności, związane z budową materiału filtracyjnego.

2. Metody oceny efektywności filtrowania

Do znanych metod oceny efektywności filtrowania cieczy roboczej należą:

- metody oceny oparte o badanie materiału filtracyjnego (określenie największej średnicy poru, rozkładu średnic porów lub tzw. gęstości hydrodynamicznej),
- metody oceny oparte o badanie stopnia zatrzymania zanieczyszczeń testowych wprowadzonych sztucznie do cieczy wzorcowej przepływającej przez filtr jednokrotnie (metoda single-pass) lub przy przepływie wielokrotnym ze stałym dozowaniem zanieczyszczeń testowych (metoda multi-pass),
- metody oceny oparte o zmniejszenie masy wprowadzonych zanieczyszczeń po przejściu przez filtr,
- metody oceny całkowitej pojemności zanieczyszczeniowej filtra wyrażonej w jednostkach masy wzorcowych zanieczyszczeń testowych do uzyskania granicznego wzrostu różnicy ciśnień przed i za filtrem w ściśle określonych warunkach testu, bądź też określenie chłonności odniesionej do jednostkowej powierzchni materiału filtracyjnego i jednostkowego spadku ciśnienia,
- metody oceny oparte o badania funkcjonalności elementów lub układu hydraulicznego z określonym filtrem polegające na określeniu czasu do utraty założonych parametrów elementu lub układu, dopuszczalnych ze względu na prawidłowe wypełnienie jego funkcji,
- metody oparte na badaniu wrażliwości zanieczyszczeniowej elementów lub układu hydraulicznego, w których są określane zmiany parametrów funkcjonalnych w szerokim zakresie zawartości i rozkładu wymiarowego zanieczyszczeń wzorcowych lub przy zastosowaniu filtrów o różnej skuteczności oczyszczania,
- metody oparte o doświadczalno-analityczne wyznaczanie charakterystyk efektywności filtrowania i symulacyjne wyznaczanie zmian w czasie skuteczności działania filtra.

Obecnie szczególnie znaczenia nabiera ostatnia kategoria metod oceny z uwagi na możliwości obliczeniowe związane z wyposażeniem układów hydraulicznych w układy mikroprocesorowe i mikrokomputerowe oraz możliwości wyposażenia układów hydraulicznych w czujniki pojedynczych cząstek zanieczyszczeń, działającymi w trybie on-line.

3. Charakterystyki efektywności filtrów - określenia podstawowe

W nawiązaniu do aktualnie stosowanych metod określania skuteczności filtrowania wykorzystywane są charakterystyki opierające się na porównaniu liczby cząstek zanieczyszczeń w cieczy przed i za filtrem w odniesieniu do wymiarów cząstek zanieczyszczeń. Stosowane są następujące charakterystyki oceny skuteczności filtrowania:

- charakterystyka przepuszczania filtra $e_p(x, t)$ będąca stosunkiem liczby cząstek o średnicach x , $N_d(x, t)$ za filtrem do $N_u(x, t)$ przed filtrem, odniesionych do jednostki objętości cieczy w danej chwili czasowej t :

$$e_p(x, t) = \frac{N_d(x, t)}{N_u(x, t)}, \quad (1)$$

- charakterystyka odfiltrowania $e_f(x, t)$

$$e_f(x, t) = 1 - e_p(x, t), \quad (2)$$

- charakterystyka przepuszczania $E_p(>x, t)$, będąca stosunkiem liczby cząstek o średnicach większych od x (tzw. skumulowana liczba cząstek) w danej chwili czasowej t , $N_d(>x, t)$ za filtrem do $N_u(>x, t)$ przed filtrem, w odniesieniu do jednostkowej objętości cieczy, określonych praktycznie w tej samej chwili czasowej t :

$$E_p(>x, t) = \frac{N_d(>x, t)}{N_u(>x, t)}, \quad (3)$$

- charakterystyka odfiltrowania $E_f(>x, t)$ również dla skumulowanych liczb cząstek, czyli o średnicach większych niż x :

$$E_f(>x, t) = 1 - E_p(>x, t), \quad (4)$$

- charakterystyka „beta iks” $\beta_x(t)$:

$$\beta_x(t) = \frac{N_u(>x, t)}{N_d(>x, t)}. \quad (5)$$

Charakterystyka $\beta_x(t)$ jest jednoznacznie związana z E_f i E_p następującą relacją:

$$\beta_x(t) = \frac{N_u(>x, t)}{N_d(>x, t)} = \frac{1}{E_p(>x, t)} = \frac{1}{1 - E_f(>x, t)}, \quad (6)$$

Charakterystyki entropowe filtru, przeznaczone do oceny zmian własności filtracyjnych w czasie. Przykładową entropię charakterystyki przepuszczania $H[e_p(x, t)]$ definiuje się w sposób następujący. Dla funkcji $e_p(x, t)$ opisaną analitycznie:

$$H[e_p(x, t)] = - \int_0^{\infty} [e_p(x, t)] \cdot \ln[e_p(x, t)] dx, \quad (7)$$

a dla wartości dyskretnych

$$H[e_p(x, t)] = - \sum_{x=x_{\min}}^{x=x_{\max}} [e_p(x, t)] \cdot \ln[e_p(x, t)], \quad (8)$$

Charakterystyki entropowe mogą być wyznaczone również dla innych wielkości określających efektywność filtrów tzn. dla e_f , E_p , E_f i β_x .

4. Pojęcie gęstości hydrodynamicznej

Charakterystyka przepuszczania $e_p(x, t)$ lub charakterystyka odfiltrowania $e_f(x, t)$ definiowane są poprzez liczenie liczby cząstek określonej średnicy x , przy czym w rzeczywistości mamy do

czynienia z cząstkami w przedziale obustronnie ograniczonym $x_{max} \geq x \geq x_{min}$ lub $x = x \pm \delta x$, gdzie $\delta x > 0$ czyli w punkcie równym średnicy x z błędem wynikającym z możliwości pomiarowych (np. dla $\delta x = \pm 0,5 \mu m$). Należy pamiętać, że przy podejściu probabilistycznym prawdopodobieństwo pojawienia się cząstki o ściśle określonej średnicy x jest równe zero.

Przy podejściu statystycznym charakterystyka przepuszczania filtru $e_p(x, t)$ będzie w danej chwili czasowej t funkcją określaną przez prawdopodobieństwo wystąpienia cząstki o średnicy x w cieczy przed filtrem w zbiorze cząstek $N_u(>x, t)$ i natrafienia na por w materiale filtracyjnym o średnicy y większej niż wymiar cząstki powodujący powstanie nowego zbioru cząstek za filtrem $N_d(>x, t)$. Zatem charakterystykę przepuszczania możemy zdefiniować następująco:

$$e_p(x, t) = \lim_{\substack{\Delta x \rightarrow 0 \\ \Delta t \rightarrow 0}} \frac{N_d(>x + \Delta x, t + \Delta t) - N_d(>x, t + \Delta t)}{N_u(>x + \Delta x, t) - N_u(>x, t)}, \quad (9)$$

Zakładając, że proces przechodzenia jest natychmiastowy ($\Delta t = 0$) to w danej chwili czasowej t granica powyższa określająca charakterystykę przepuszczania filtru dąży do $N_d(x) / N_u(x)$ gdzie x jest średnicą cząstek praktycznie wyznaczonych z błędem δx lub w przedziale ograniczonym obustronnie.

W praktyce wykorzystuje się częściej charakterystykę odfiltrowania $e_f(x) = 1 - e_p(x)$. Charakterystyka odfiltrowania $e_f(x)$ ma przejrzystą i interesującą interpretację fizyczną. Jest ona równoważna dystrybucie hydrodynamicznej przegrody filtracyjnej określającej rozkład natężeń przepływu cieczy przez poszczególne pory materiału filtracyjnego. Zatem jeśli $f(y)$ będzie funkcją gęstości rozkładu prawdopodobieństwa średnic porów Y przegrody filtracyjnej to:

$$e_f(x) = \frac{1}{C} \int_0^x y^\alpha f(y) dy, \quad (10)$$

gdzie całkowanie odbywa się przy założeniu $x = y$ od wymiaru najmniejszych cząstek występujących w cieczy, α określa stan przepływu cieczy przez pory filtru ($\alpha = 2$ przepływ turbulentny, $\alpha = 4$ przepływ laminarny) natomiast C jest stałą normalizacji całki pozwalającej zachować zmienność od 0 do 1.

Jeśli $k(y)$ będzie funkcją gęstości prawdopodobieństwa rozkładu natężeń przepływu przez poszczególne pory o średnicach y materiału filtracyjnego, to dystrybuanta tej zmiennej losowej będzie

$$K(y) = P(Y \leq y) = \int_{-\infty}^y k(y) dy, \quad (11)$$

gdzie:

$P(Y \leq y)$ - prawdopodobieństwo zdarzenia złożonego $Y \leq y$, spełniające warunek $0 \leq P(Y \leq y) \leq 1$.

Ostatecznie możemy zapisać podstawową zależność jako:

$$e_f(x) = K(y) = \int_{-\infty}^y k(y) dy, \quad (12)$$

natomiast funkcję $k(y)$ będziemy nazywali w uproszczeniu gęstością hydrodynamiczną materiału filtracyjnego.

5. Gęstość hydrodynamiczna BW

Konsekwencją twierdzenia o równoważności charakterystyki odfiltrowania z dystrybuantą hydrodynamiczną jest możliwość wyznaczenia drogą symulacji komputerowej efektywności filtrów poprzez analizę właściwości samego materiału filtracyjnego, o ile będzie znana analityczna postać funkcji rozkładu gęstości prawdopodobieństwa $k(y)$. Jednym z najlepiej aproksymujących rozkład natężeń przepływu przez pory materiału filtracyjnego jest opracowany w Instytucie Transportu Samochodowego nowy rozkład gęstości prawdopodobieństwa BW. Rozkład gęstości prawdopodobieństwa BW ma postać:

$$k(y) = \frac{[u(y) - u(y-b)]}{\left[1 - \exp\left(-\frac{b^2}{2a^2}\right)\right]} \cdot \frac{b-y}{a^2} \cdot \exp\left[-\frac{(y-b)^2}{2a^2}\right], \quad (13)$$

gdzie:

a, b - parametry rozkładu takie, że $b > a$ i $a, b \in R^+$,
 $u(y), u(y-b)$ - odpowiednie funkcje skoku jednostkowego.

Ten dwuparametrowy rozkład gęstości prawdopodobieństwa przyjęty jest za model probabilistyczny zmiennej losowej, określającej rozkład przepływu cieczy przez pory o średnicy y przegrody filtracyjnej. Równocześnie przyjmuje się na podstawie doświadczeń, że w modelu tym stosunek parametrów b/a jest większy od 3.

W przypadku gdy zmienna losowa Y ma rozkład gęstości prawdopodobieństwa BW z definicji wynika, że dystrybuanta tej zmiennej losowej ma następującą postać:

$$K(y) = u(y) \cdot \frac{\exp\left(-\frac{(y-b)^2}{2a^2}\right) - \exp\left(-\frac{b^2}{2a^2}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{b^2}{2a^2}\right)} + u(y-b) \cdot \frac{1 - \exp\left(-\frac{(y-b)^2}{2a^2}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{b^2}{2a^2}\right)}, \quad (14)$$

skąd wynika, że:

$$P(Y \leq 0) = 0 \text{ i } P(Y > b) = 0. \quad (15)$$

Można zauważyć, że w funkcji dystrybuanty $K(y)$ o jej zmienności decyduje składnik (16) tak, że przebieg dystrybuanty zmiennej losowej Y jest podobny do uciętej lewostronnie lewej połówki rozkładu normalnego.

$$\exp\left(-\frac{(y-b)^2}{2a^2}\right). \quad (16)$$

Momenty zwykłe

Zgodnie z przyjętą definicją, moment zwykły $m_\alpha(\mathbf{Y})$ α -tego rzędu, $\alpha \in R^+$, rzeczywistej zmiennej losowej Y określa następujący wzór:

$$m_\alpha(\mathbf{Y}) = E(\mathbf{Y}^\alpha) = \int_{-\infty}^{+\infty} y^\alpha k(y) dy, \quad (17)$$

gdzie:

$E(Y^\alpha)$ - wartość oczekiwana zmiennej losowej Y^α ,
 $k(y)$ - funkcja gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej Y .

Podstawiając w miejsce $k(y)$ rozkład BW i pomocniczą zmienną z z zdefiniowaną zależnością $y = az + b$ otrzymujemy:

$$m_\alpha(\mathbf{Y}) = E(\mathbf{Y}^\alpha) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{u(y) - u(y-b)}{1 - \exp\left(-\frac{b^2}{2a^2}\right)} \cdot y^\alpha \cdot \frac{b-y}{a^2} \cdot \exp\left(-\frac{(y-b)^2}{2a^2}\right) dy = \quad (18)$$

$$= \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{b^2}{2a^2}\right)} \cdot \int_{\frac{-b}{a}}^0 (az+b)^\alpha \cdot (-z) \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz$$

gdź: $dy = adz$.

Dalej całkując przez części, otrzymujemy następujący wzór rekurencyjny:

$$m_\alpha(\mathbf{Y}) = \frac{b \cdot \alpha}{\alpha - 1} \cdot m_{\alpha-1}(\mathbf{Y}) + a^2 \alpha m_{\alpha-2}(\mathbf{Y}) - \frac{b^\alpha}{(\alpha - 1) \left(1 - \exp\left(-\frac{b^2}{2a^2}\right)\right)}. \quad (19)$$

Z powyższego wzoru wynika, że wszystkie momenty, tj. dla $\alpha \in R^+$, zmiennej losowej Y o rozkładzie BW (o parametrach a i b) można, korzystając z powyższej zależności, wyznaczyć znając momenty zwykłe dla $\alpha \in (0, 2)$, przyjmując $m_0(Y) = 1$, co implikuje następująca cecha funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa rzeczywistej zmiennej losowej:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} k(y) dy = 1. \quad (20)$$

W szczególności wszystkie momenty zwykłe $m_n(Y)$ dla $n \in N$ (N -zbiór liczb naturalnych) wyznaczyć można z następującego wzoru rekurencyjnego; wynikającego z formuły (14):

$$m_n(\mathbf{Y}) = E(\mathbf{Y}^n) = \frac{nb}{n-1} \cdot E(\mathbf{Y}^{n-1}) + a^2 n E(\mathbf{Y}^{n-2}) - \frac{b^n}{(n-1) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{b^2}{2a^2}\right)\right)}, \quad (21)$$

dla $n > 1$.

Znając wartość oczekiwaną $E(Y) = m_1(Y)$, którą dla rozkładu BW obliczyć można wg poniższego wzoru:

$$m_1(\mathbf{Y}) = E(\mathbf{Y}) = \int_{-\infty}^{+\infty} yk(y)dy = \int_0^b \frac{y}{1 - \exp\left(-\frac{b^2}{2a^2}\right)} \cdot \frac{b-y}{a^2} \cdot \exp\left(-\frac{(y-b)^2}{2a^2}\right) dy =$$

$$= \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{b^2}{2a^2}\right)} \cdot \left[b - a \int_{\frac{-b}{a}}^0 \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz \right], \quad (22)$$

to dla $n = 2$ otrzymamy:

$$m_2(\mathbf{Y}) = E(\mathbf{Y}^2) = 2bE(\mathbf{Y}) + 2a^2 \cdot \frac{b^2}{1 - \exp\left(-\frac{b^2}{2a^2}\right)}. \quad (23)$$

Momenty centralne

Moment centralny μ_n , n -tego rzędu rzeczywistej zmiennej losowej Y określony jest następująco:

$$\mu_n = m_n[Y - E(Y)] = E\{[Y - E(Y)]^n\} \text{ dla } n \in \mathbb{N}, \quad (24)$$

stąd z własności momentu oraz z zasad całkowania i definicji, mamy co następuje:

$$\mu_n = E\left\{\sum_{k=0}^{k=n} \binom{n}{k} \cdot (-1)^k \cdot [E(Y)]^k \cdot (Y)^{n-k}\right\}, \quad (25)$$

i dalej

$$\mu_n = \sum_{k=0}^{k=n} \binom{n}{k} \cdot (-1)^k \cdot [E(Y)]^k \cdot E(Y^{n-k}), \quad (26)$$

co równoznaczne jest z zapisem

$$\mu_n = \sum_{k=0}^{k=n} \binom{n}{k} \cdot (-1)^k \cdot [m_1(\mathbf{Y})]^k \cdot m_{n-k}(\mathbf{Y}). \quad (27)$$

Korzystając z powyższego wzoru można wyznaczyć wszystkie momenty centralne zmiennej losowej Y , znając momenty zwykłe tej zmiennej. W szczególności mamy, co następuje:

$$\mu_1 = E[\mathbf{Y} - E(\mathbf{Y})] = E(\mathbf{Y}) - E[E(\mathbf{Y})] = E(\mathbf{Y}) - E(\mathbf{Y}) = 0. \quad (28)$$

Moment centralny drugiego rzędu nazywa się wariancją. Mamy zatem:

$$\mu_2 = \delta^2 = E\{[Y - E(Y)]^2\} = E(Y^2) - [E(Y)]^2. \quad (29)$$

Wykorzystując odpowiednie zależności otrzymamy moment centralny 2-go rzędu dla rozkładu BW w następującej postaci:

$$\begin{aligned} \mu_2 = \delta^2 = & \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{b^2}{2a^2}\right)} \cdot \left(1 - \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{b^2}{2a^2}\right)}\right) \cdot \left(b - a \int_{\frac{-b}{a}}^0 \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz\right) + \\ & + a^2 \left[2 - \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{b^2}{2a^2}\right)} \cdot \left(\int_{\frac{-b}{a}}^0 \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz\right)^2\right]. \end{aligned} \quad (30)$$

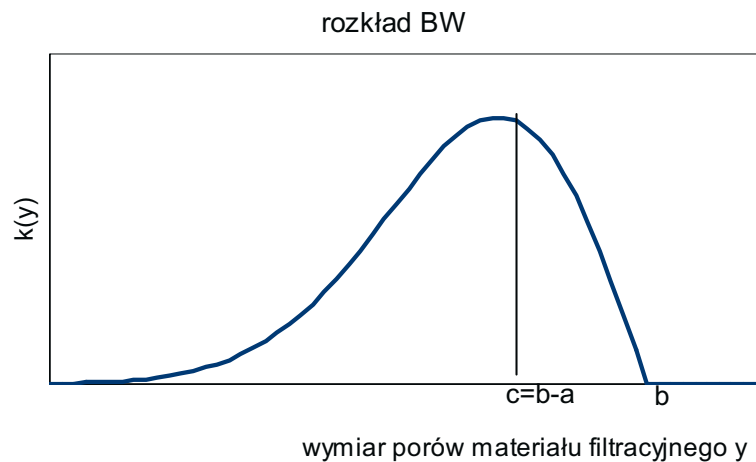
Wyliczone zależności określające momenty zwykłe i momenty centralne rozkładu BW mogą być użyteczne przy ocenach i porównaniach dużej liczności eksperymentów, dla standaryzacji rozkładu BW oraz mogą być wykorzystane przy poszukiwaniu nowych własności związanych z fizycznymi aspektami procesu filtrowania i ocenami efektywności materiału filtracyjnego.

6. Uproszczony rozkład BW

Przy założeniu, że iloraz b/a parametrów rozkładu BW jest większy od 3, rozkład BW można zapisać w przybliżonej, uproszczonej postaci:

$$k(y) = \begin{cases} 0 & \text{dla } y > b \\ -\frac{y-b}{a^2} \cdot \exp\left[-\frac{(y-b)^2}{2a^2}\right] & \end{cases} \quad (31)$$

Z prowadzonych analiz wynika, że praktycznie zdecydowana większość porowatych materiałów filtracyjnych spełnia ten warunek. Przebieg rozkładu BW wraz z interpretacją jego parametrów a i b przedstawiono na Rys. 1. Parametr b odpowiada maksymalnej średnicy poru materiału filtracyjnego, parametr $c=b-a$ średnicy porów, dla których występuje największe natężenie przepływu cieczy przez materiał filtracyjny.



Rys. 1. Rozkład BW z interpretacją parametrów a , b rozkładu
 Fig. 1. BW distribution with the interpretation of a and b parameters of distribution

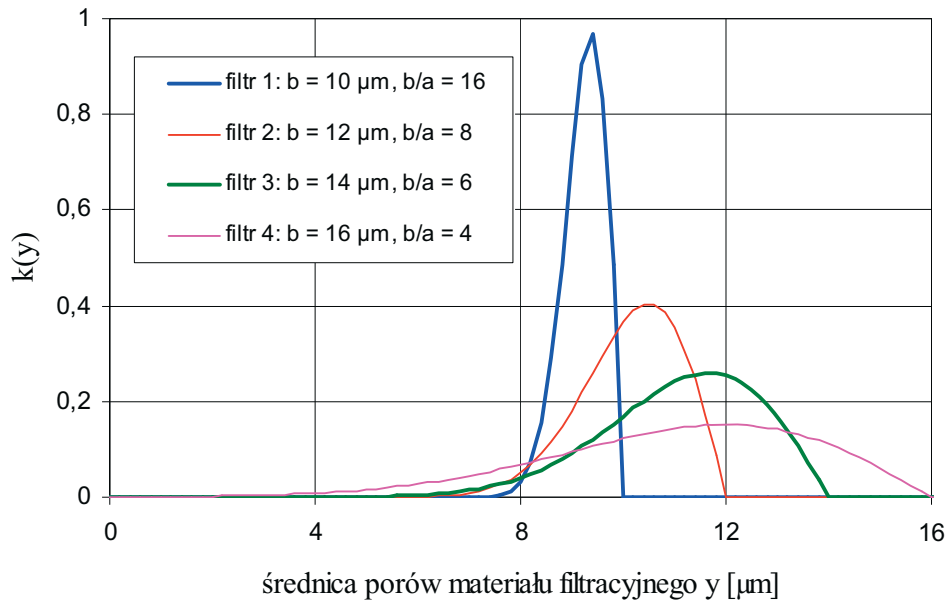
7. Estymacja parametrów rozkładu BW

W celu wykorzystania do celów praktycznych funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa BW wymagana jest znajomość parametrów a i b tego rozkładu. Istnieje kilka sposobów ich wyznaczenia:

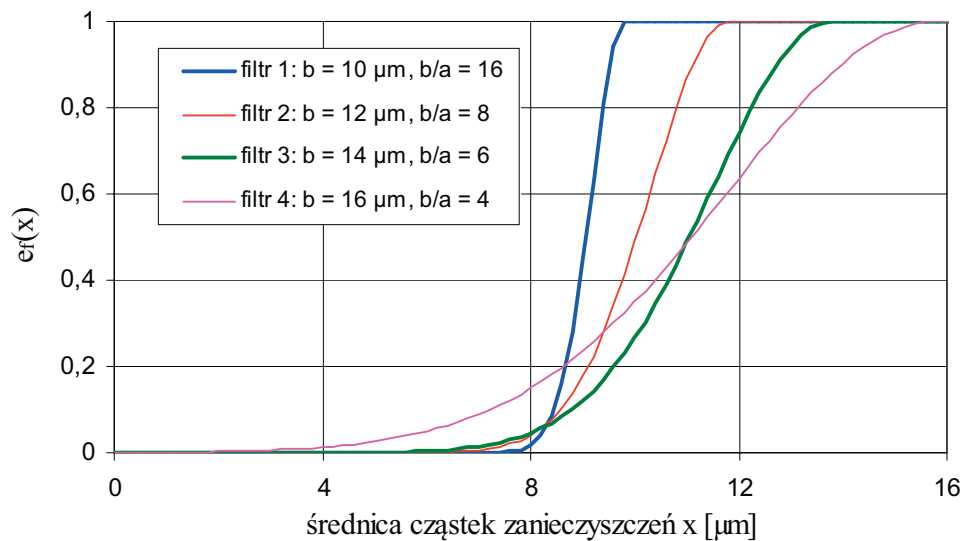
- a) metoda polegająca na wykorzystaniu automatycznych liczników cząstek, posiadających możliwość wyznaczenia średnic cząstek zanieczyszczeń przed i za filtrem w warunkach rozróżnialności znacznej ilości średnic cząstek. Wyznaczając charakterystykę odfiltrowania otrzymamy dla efektywności $e_f(x) = 1$ (największa średnica cząstki przechodząca przez filtr, wartość parametru b , natomiast punkt przegięcia charakterystyki określi średnicę cząstek odpowiadającą $c = b - a$.
- b) metoda polegająca na wykorzystaniu skomputeryzowanych analizatorów obrazu mikroskopowego, które umożliwiają precyzyjne określenie rozkładu cząstek zanieczyszczeń przed i za filtrem, wyznaczenie charakterystyki odfiltrowania i podobnie jak w poprzedniej

metodzie wyznaczenie parametrów rozkładu a i b . W przypadku wykorzystania analizy mikroskopowej zanieczyszczeń pojawia się trudność w wyborze zastępczej średnicy analizowanej cząstki, bowiem badaniu podlegają rzuty cząstek, których średnica zastępcza jest zależna od kierunku skaningu. Efektywną metodą znalezienia zastępczej średnicy jest wybór tzw. średnicy Fereta określonej dla różnych kątów i przyjęciu jednej średnicy wybranej na podstawie wartości standardowego odchylenia bądź też na podstawie uśrednionej średnicy Fereta. Powyższych trudności można uniknąć stosując do badań zanieczyszczenia testowe w postaci kulistego lateksu polidispersyjnego.

- c) metoda oparta na badaniu próbki materiału filtracyjnego, w której technika pomiarowa jest zbliżona do znanego i często praktykowanego sposobu wyznaczania średnicy maksymalnego poru. Istota metody polega na wyznaczeniu charakterystyk natężenia przepływu powietrza lub innego gazu dla próbki suchej oraz dla próbki nasączonej cieczą testową (woda, alkohol etylowy, olej).



Rys. 2. Przebieg gęstości hydrodynamicznej $k(y)$ dla czterech przykładów filtrów, określony na podstawie rozkładu BW
 Fig. 2. The course of the $k(y)$ hydrokinetic thickness for four examples of filters defined on the ground of BW distribution



Rys. 3. Charakterystyka odfiltrowania $e_f(x)$ dla czterech przykładowych filtrów wyznaczona na podstawie gęstości hydrodynamicznej $k(y)$, w oparciu o rozkład BW
 Fig. 3. The course of the $k(y)$ hydrokinetic thickness for four examples of filters, defined on the ground the BW distribution

8. Wyznaczenie charakterystyki odfiltrowania

W celu zilustrowania wykorzystania postaci analitycznej rozkładu BW na Rys. 2-3 przedstawiono wykresy funkcji rozkładu hydrodynamicznego BW oraz przebiegi odpowiadającym im charakterystyk odfiltrowania, dla czterech filtrów o niżej wymienionych parametrach:

- filtr 1: $b = 10 \mu\text{m}$, $b/a = 16$,
- filtr 2: $b = 12 \mu\text{m}$, $b/a = 8$,
- filtr 3: $b = 14 \mu\text{m}$, $b/a = 6$,
- filtr 3: $b = 16 \mu\text{m}$, $b/a = 4$.

9. Wnioski

- Jedną z metod oceny efektywności filtrowania odnoszącą się do porowatych materiałów filtracyjnych jest charakterystyka odfiltrowania uzyskana na podstawie funkcji gęstości prawdopodobieństwa rozkładu hydrodynamicznego przegrody filtracyjnej,
- jedną z dróg prowadzących do określenia charakterystyki odfiltrowania jest wykorzystanie zaprezentowanego, nowego rozkładu hydrodynamicznego BW wyrażonego w postaci analitycznej,
- istnieje możliwość analitycznego opisu efektywności filtrowania dla filtru nowego i zmian skuteczności w czasie eksploatacji.

Literatura

- [1] *Badania komplementarnych charakterystyk czystości i efektywności filtrowania oleju silnikowego w transporcie samochodowym na podstawie rozszerzonych cech morfologicznych stałych cząstek zanieczyszczeń*, Projekt badawczy Nr 9T12C 05615, Warszawa 2001.
- [2] Stecki, J., *Total Contamination Control* – Publ. By Fluid Power Net Pty Ltd, Australia 1998.
- [3] Borowik, S., *Filtry płynów roboczych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1974.