

WIKTOR STRZEMBOSZ

**Katedra Fizyki Włókna i Metrologii Włókienniczej
Politechniki Łódzkiej**

MODELOWANIE CHARAKTERYSTYCZNYCH STANÓW GAZOWEJ FILTRACJI PYŁU WE WŁÓKNINACH*

Recenzenci: **prof. dr hab. inż. Stanisław Dolny,**
prof. dr hab. inż. Krzysztof Gniotek,
prof. dr hab. inż. Józef Kubik

Opracowano nową metodę badawczą czystych i zapylnych materiałów włókienniczych, którą zastosowano dla włóknin igłowanych. Podstawą metody jest badanie wartości oporów aerodynamicznych materiału, wzdłuż osi z prostopadłej do powierzchni włókniny przy zmianie wielkości strumienia masy przepływającego powietrza w szerokim zakresie. W oparciu o otrzymane charakterystyki aerodynamiczne opracowano nowy model geometryczny i fizyczny struktury włókninowej.

1. WPROWADZENIE

Filtracja jest to proces oddzielania rozdrobnionej fazy stałej od płynu, tj. gazu (filtracja sucha) lub cieczy (filtracja mokra) na przegrodach porowatych. Zapylny gaz przepływający przez filtr jest sumą strumieni masy kilku składników (np. gazu, wody i pyłu) znajdujących się w trzech fazach, przy czym woda występować może zarówno w postaci ciekłej jak i pary wodnej [1, 17, 18].

* Opracowanie jest streszczeniem rozprawy doktorskiej autora. Promotorem jest dr hab. inż. Włodzimierz Wawszczak.

Filtrowany pył jest zazwyczaj polidispersyjny czyli składa się z frakcji o różnych średnicach.

Zagadnienie przepływu gazu przez przegrodę filtracyjną rozpatrywane jest zazwyczaj jako „przepływ w kanale” lub jako „przepływ wokół ciał zanurzonych w płynie i najczęściej opisywane dla warstw złożonych z elementów jednorodnych i izometrycznych. Oba sposoby są wykorzystywane do tworzenia różnych modeli filtracyjnych [5,19, 21].

Celem pracy było modelowanie przepływu filtracyjnego opartego na modelowaniu zjawisk wymiany pędu i masy oraz rozpoznanie charakterystycznych stanów procesu filtracji gazowej pyłu. Dla określenia podobieństwa geometrycznego, kinematycznego i dynamicznego użyto kryterialne liczby podobieństwa: Eu (Eulera), Re (Reynoldsa) i Darcy’ego oraz stałe parametry fizyczne i geometryczne, charakteryzujące warunki brzegowe i początkowe. Opracowano nowy model geometryczny przegrody włókninowej oraz model fizyczny przepływu przez tę przegrodę.

2. OPRACOWANIE MODELU GEOMETRYCZNEGO I FIZYCZNEGO

2.1. Równania zachowania przepływu

Podstawowe pięć praw, które są wykorzystywane do opisu przepływów filtracyjnych to:

- Równanie zachowania masy dla strumienia przepływającego gazu [2, 3, 9]

$$\dot{m} = \rho c A = \rho \dot{V}, \quad [\dot{m}] = \text{kg/s} \quad (1)$$

- Równanie zachowania energii (zastępcze równanie Bernoulliego) [3, 15, 23]

$$\frac{c_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{c_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + \Delta e_{st} \quad [\Delta e_{st}] = \text{J/kg} \quad (2)$$

gdzie Δe_{st} to energia dyssypacji.

- Równanie zachowania stanu gazu doskonałego (prawo Clapeyrona) [3, 10, 19]

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad [\rho] = \text{kg/m}^3 \quad (3)$$

- Równanie Poiseuille’a-Hagena opisujące przepływy laminarne przez rury o przekroju kołowym d [7, 17, 21]

$$\dot{V} = \frac{\pi d^4 \Delta p}{128 \eta 28} \quad [\dot{V}] = \text{m}^3/\text{s} \quad (4)$$

- Prawo Darcy'ego [4, 22] określa przepuszczalność złoża porowatego w ten sposób, że wiąże opory warstwy porowatej z jej charakterystycznymi właściwościami i wielkością strumienia przepływającego gazu (lub jego prędkością). Oparte jest ono na założeniu, że straty spowodowane są tarciem gazu o wewnętrzne powierzchnie warstwy porowatej przez którą on przepływa [4, 24]

$$\vec{c} = -\frac{K}{\eta} (\text{grad}p + \vec{F}_m) \quad [\vec{c}] = \text{m/s} \quad (5)$$

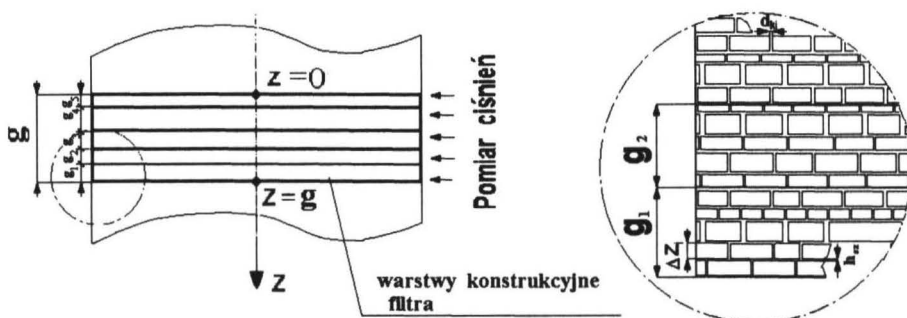
gdzie: F_m - siła masowa.

2.2. Założenia do opracowania modelu geometrycznego

Do opracowania modelu geometrycznego przyjęto następujące założenia :

1. Model dotyczy izotermicznego, osiowosymetrycznego przepływu, prostopadłego do powierzchni filtra.
2. Zewnętrzne wymiary geometryczne modelu są równe wymiarom filtra (średnica D , grubość g).
3. Objętość wolnych przestrzeni wewnątrz modelu jest równa objętości wolnych przestrzeni wewnątrz filtra, którą określa porowatość przegrody.
4. Oś wzdłuż której zachodzi przepływ powietrza oznaczamy jako z i analizę prowadzimy w zakresie od $z = 0$ co odpowiada powierzchni wlotowej do filtra do $z = g$ co odpowiada powierzchni wylotowej z filtra. Opory mierzy się przy $\Delta z_i = 0,5 - 2 \text{ mm}$ oraz $i = 19 - 40$ dla sześciu do ośmiu wielkości strumienia masy powietrza.

Schematycznie zaproponowany model przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Model geometryczno pomiarowy

2.3. Analiza kryterialna przepływów filtracyjnych we włókninach [22, 23, 24, 25]

W oparciu o powyższe prawa fizyczne i założenia została wykonana analiza kryterialna wyników badań, która umożliwiła wyznaczenie parametrów geometrycznych (średnica kanalika d_k , powierzchnia właściwa f i gęstość powierzchniowa \bar{j} kanalików) i wielkości fizyczne charakteryzujące przepływ filtracyjny (liczby kryterialne: Reynoldsa Re_k , Darcy'ego Da_1 , Da_2 i Eulera Eu oraz współczynnik przepuszczalności K)

$$d_k = \sqrt[2]{\frac{128\eta RT\Delta z \dot{m}}{\pi D^2 \varepsilon (p_a + p(z)) \Delta p_i}} \quad [d_k] = m \quad (6)$$

$$\bar{j} = \frac{j}{A} = \frac{1}{32} \frac{(p_a + p(z)) D^2 \varepsilon^2 \Delta p_i}{\eta RT \Delta z \dot{m}} \quad [\bar{j}] = 1/m^2 \quad (7)$$

$$f = \frac{A_w}{V_w} = \frac{4j d_k}{D^2} = \sqrt{\frac{(p_a + p(z)) D^2 \varepsilon^3 \pi \Delta p_i}{8\eta RT \Delta z \dot{m}}} \quad [f] = 1/m \quad (8)$$

$$Re_k = \frac{c d_k \rho_{ki}}{\eta} = \frac{4 \dot{m}}{\pi \eta j d_k} = \sqrt{\frac{2048 RT \Delta z \dot{m}^3}{\pi^3 \eta D^6 \varepsilon^3 (p_a + p(z)) \Delta p_i}} \quad (9)$$

$$Re_o = \frac{c_o D \rho}{\eta} = \frac{4 \dot{m}}{\eta \pi D} \quad (10)$$

$$Eu = \frac{\Delta p_i}{\rho_i c_i^2 / 2} = \frac{\pi^2 D^4}{8} \varepsilon^2 \frac{(p_a + p(z)) \Delta p_i}{RT \dot{m}^2} \quad (11)$$

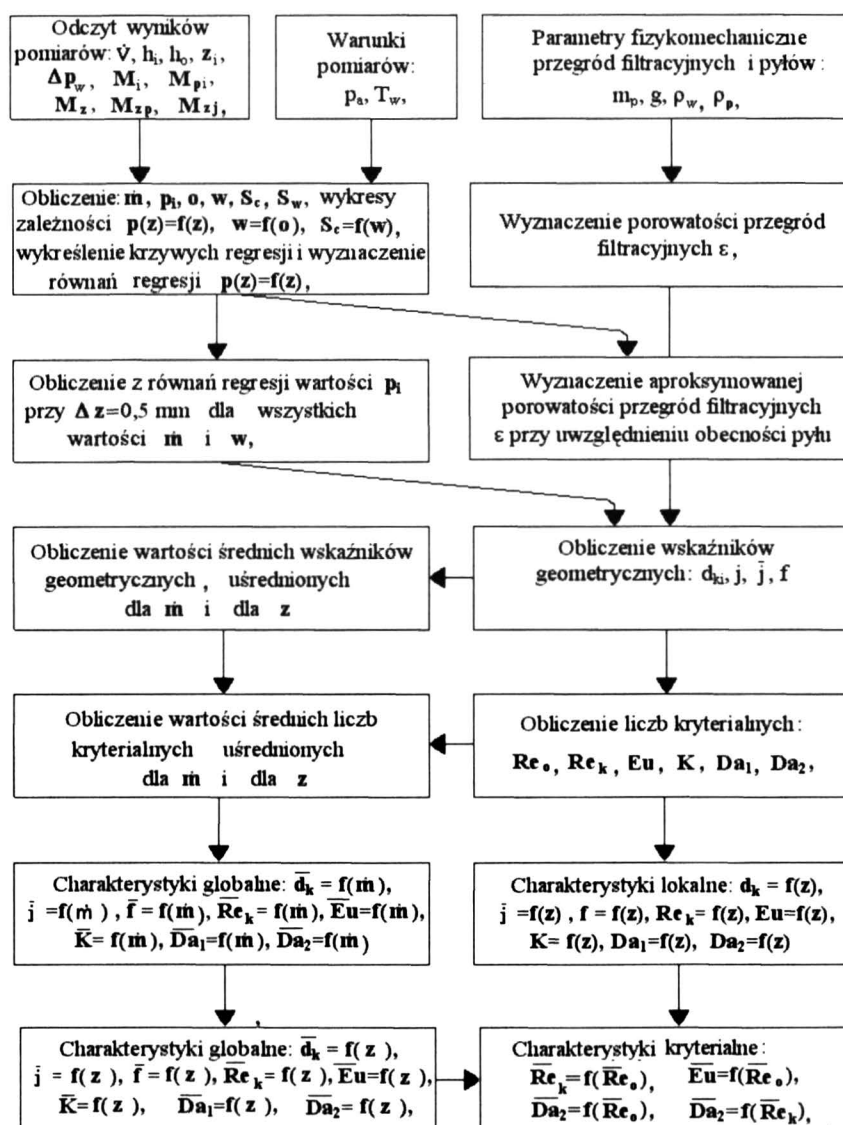
$$K = \frac{\dot{m} \eta \Delta z_i}{A \rho (\Delta p_i + \rho_i g_o \Delta z)} = \frac{4 \dot{m} \eta R^2 T^2 \Delta z_i}{\pi D^2 (p_a + p(z)) (RT \Delta z_i + (p_a + p(z)) g_o \Delta z)} \quad [K] = m^2 \quad (12)$$

$$Da_1 = \frac{K}{d_k^2} = \frac{\varepsilon}{32} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{g_o \Delta z (p_a + p(z))}{RT \Delta z_i}\right)} \quad (13)$$

$$Da_2 = \frac{K}{D d_k} = \sqrt{\frac{\dot{m} \eta \Delta z \varepsilon \Delta p_i R^3 T^3}{8 \pi D^4 (p_a + p(z)) (\Delta p_i RT + (p_a + p(z)) g_o \Delta z)^2}} \quad (14)$$

2.4. Algorytm wyznaczania wskaźników geometrycznych i kryterialnych

Powyższe wskaźniki geometryczne i wielkości fizyczne charakteryzujące przepływ filtracyjny oraz wskaźników filtracji oblicza się zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 2. W przedstawionym algorytmie uwzględniono obecność pyłów. Dla próbek niezapylnych obliczenia upraszczają się w oczywisty sposób.



Rys. 2. Algorytm wyznaczania parametrów geometrycznych i wielkości fizycznych charakteryzujących przepływ filtracyjny oraz wskaźników filtracji

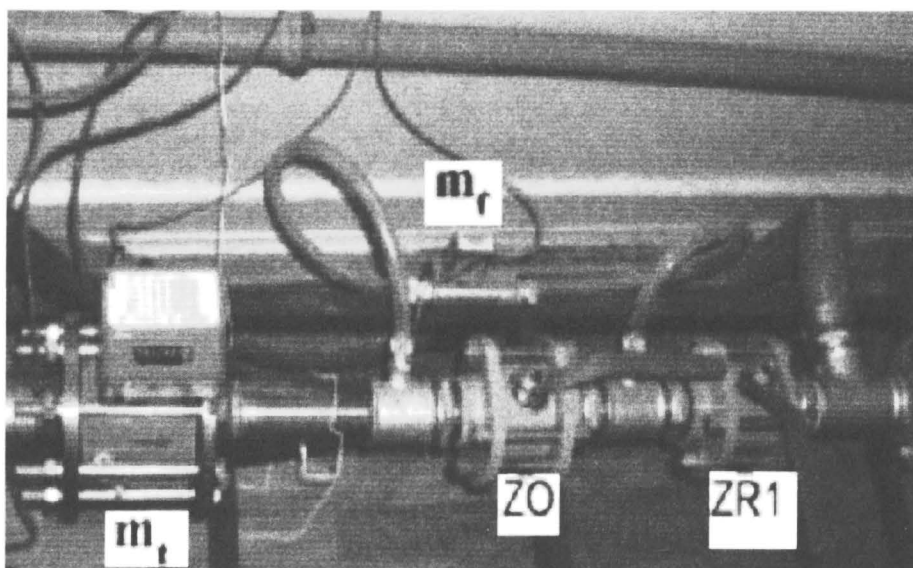
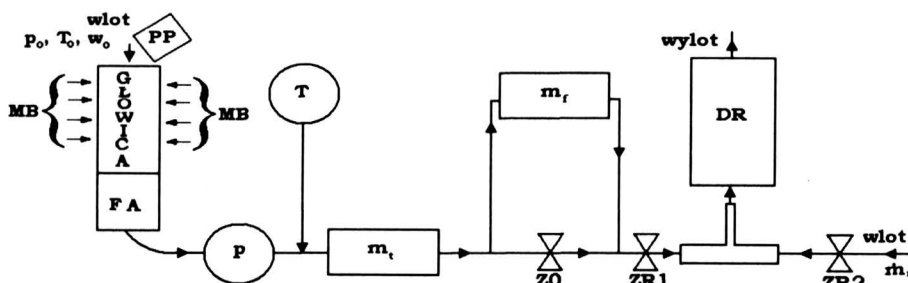
3. WERYFIKACJA MODELU

3.1. Budowa stanowiska

Badania prowadzono na stanowisku pomiarowym przedstawionym na rysunku 3.

Strumień powietrza \dot{m} uzyskuje się za pomocą dmuchawy Roots'a o regulowanej prędkości obrotowej $n \leq 3000$ 1/min pracującej na ssaniu. Dokładny pomiar strumienia masy powietrza przepływającego przez próbkę umożliwiają mierniki:

- El Flow [38, 41, 43], \dot{m}_f , służący do pomiarów niskich wartości strumienia masy \dot{m} (od $\approx 0,00016$ kg/s do $\approx 0,0075$ kg/s),
- gazomierz turbinowy [7, 41, 43] \dot{m}_t przeznaczony do pomiaru wyższych wartości strumienia masy \dot{m} (od $\approx 0,0067$ kg/s do $\approx 0,05$ kg/s)



Rys. 3. Stanowisko badawcze

Podczas pomiaru małych strumieni masy \dot{m} (za pomocą miernika El Flow) zawór **ZO** jest zamknięty, zaś gdy używany jest gazomierz turbinowy \dot{m}_t otwarty. Zawory regulacyjne **ZR1** i **ZR2** umożliwiają, wraz z regulacją prędkości obrotowej dmuchawy na precyzyjne ustawienie wielkości strumienia powietrza przepływającego przez badaną próbkę. Pomiar strat ciśnienia Δp_i dla każdej z **i**

warstw na które dzielimy zgodnie z zastosowanym modelem badany materiał umożliwia układ manometrów bateryjnych **MB**. Wakuometr **P** pozwala określić całkowity spadek ciśnienia powietrza zaś termometr **T** temperaturę powietrza bezpośrednio przed wlotem do mierników strumienia masy m_t i m_f . Uzyskane z obu przyrządów dane umożliwiają dokładne wyznaczenie rzeczywistej wielkości strumienia masy przepływającego powietrza. Ziarnisty materiał badawczy podawany jest za pomocą podajnika pyłów (**PP**) a pyły nie zatrzymane przez badany filtr osadzają się na filtrze absolutnym (**FA**). Kontrolowane są także parametry powietrza wlotowego (p_0, T_0, w_0 - ciśnienie; temperatura i wilgotność powietrza wlotowego). Stanowisko badawcze pozwala na prowadzenie badań w dużym zakresie podciśnienia ($p_{\max} \approx 0,5$ bar) i strumienia masy ($\dot{m}_{\max} \approx 0,05$ kg/s).

3.2. Wytworzenie próbek filtracyjnych i wyznaczenie ich podstawowych właściwości fizycznych

Do badań wytypowano 5 wariantów przegród filtracyjnych w kształcie walca o średnicy $D = 80$ mm i o wysokości $g \approx 40$ mm:

- Pr.I-a - próbka złożona z 3 takich samych warstw, każda wytworzona z ciętej, karbikowanej żyłki poliamidowej (0,3 mm) przez igłowanie,
- Pr.I-b - próbka jednowarstwowa wytworzona z tej samej żyłki poliamidowej połączona przez klejenie (bez igłowania),
- Pr.II - próbka złożona z 5 takich samych warstw włókniny igłowanej, każda z włókien poliestrowych 6,7 dtex,
- Pr.III-a - próbka złożona z 5 warstw włókniny igłowanej, różniących się masą liniową włókien; masy liniowe włókien w kolejnych warstwach, w kierunku od wlotu powietrza, wynoszą: 15 dtex, 10 dtex, 6,7 dtex, 3,3 dtex, 1,7 dtex,
- Pr.III-b - konstrukcja próbki taka sama jak w wariantcie III-a, z tym, że warstwy zostały ułożone w odwrotnej kolejności.

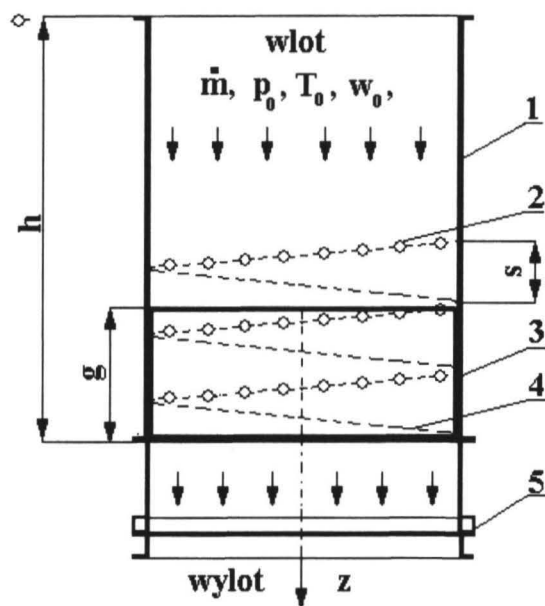
Dla wszystkich włókien próbnych wyznaczano, zgodnie z aktualnymi normami, podstawowe właściwości fizyczne:

- masa powierzchniowa PN-EN-29073-1:1994,
- grubość PN-EN ISO 9073-2:2002,
- gęstość pozorną PN-85/P-04688,
- gęstość włókien PN-84/P-04752.

3.3. Metodyka badań aerodynamicznych i filtracyjnych

Badania aerodynamiczne niezapylnych próbek filtracyjnych polegają na tym, że przez przegrody filtracyjne przedmucha się strumień powietrza zmieniając jego wartości do założonych wartości nominalnych. Dla każdej z wartości

strumienia masy powietrza wyznacza się opory wszystkich warstw przegrody (wzdłuż drogi przepływu $z = g$, przy $\Delta z = 0,5 - 2$ mm, liczbie pomiarów $i = 19 - 40$). Podczas badań filtracyjnych po wprowadzeniu do przegrody każdej z porcji pyłu i wyznaczeniu właściwości filtracyjnych podawano strumień masy czystego powietrza i odczytywano opory przegrody zapyłonej analogicznie jak niezapyłonej.



Rys. 4. Schemat głowicy pomiarowej
 1 - kanał przepływowy,
 2 - otwory do pomiarów ciśnień p_i ,
 3 - próbka tekstylna o grubości g
 złożona z warstw konstrukcyjnych
 o grubościach $g_1 \dots g_5$,
 4 - linia śrubowa (spirała) otworów
 do pomiarów ciśnień,
 5 - filtr absolutny

Filtr o grubości g umieszczony jest w kanale 1 głowicy pomiarowej. Otwory do pomiarów ciśnień 2 umożliwiają pomiar ciśnień p_i w odległości z_i od wlotu do przegrody. Otwory te są umieszczone na linii śrubowej.

3.4. Charakterystyka wymiarowa ziarnistego materiału badawczego

Podstawową charakterystykę wymiarową ziarnistego materiału badawczego stosowanego do różnych przegród przedstawiono w tabeli 1.

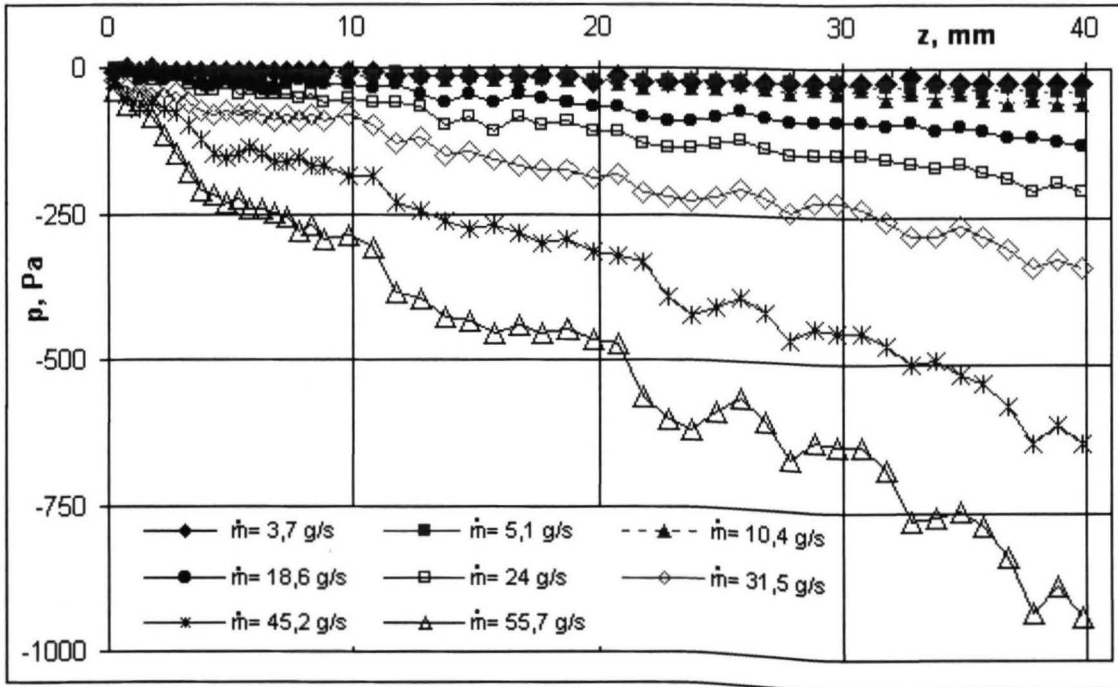
Tabela 1

Charakterystyka wymiarowa ziarnistego materiału badawczego

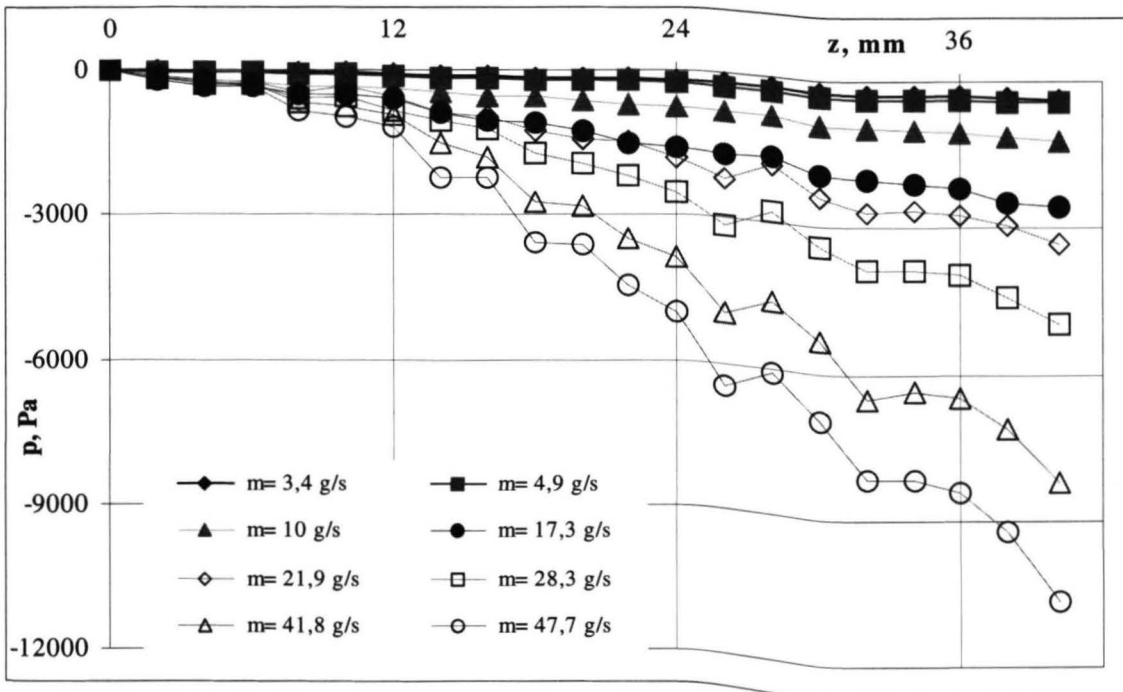
Oznaczenie	Rodzaj	Udział najliczniejszej frakcji ziaren	Badane przegrody
p.1	Elektrokorund zwykły F 046	>45%: 355-425 μm	Pr.I-a, Pr.I-b, Pr.II, Pr.III-a, Pr.III-b
p.2	Elektrokorund zwykły F 220	>45%: 53-75 μm	Pr.II, Pr.III-a, Pr.III_b
p.3	Elektrokorund zwykły F 630	100% < 63 μm	
p.4	Pural NF	>82,4%: < 25 μm	Pr.I-a, Pr.I-b,
p.5	Elektrokorund zwykły F 008	>45%: 2360-2800 μm	
p.6	Elektrokorund zwykły F 030	>45%: 600-710 μm	

3.5. Charakterystyki przepływowe przegród niezapylnych

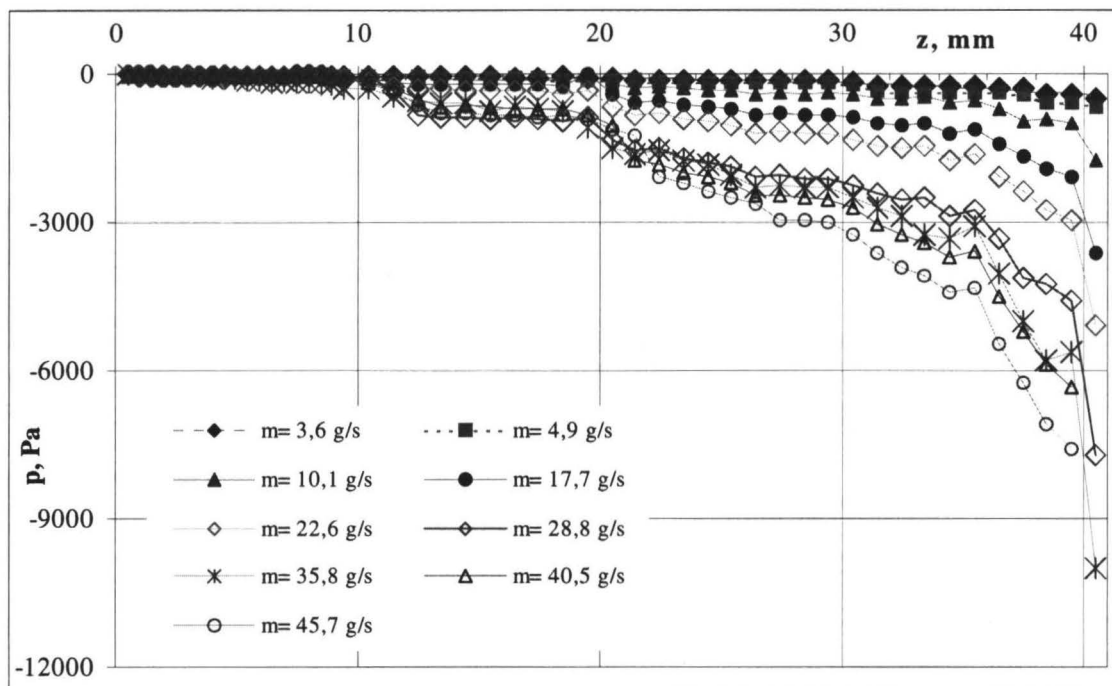
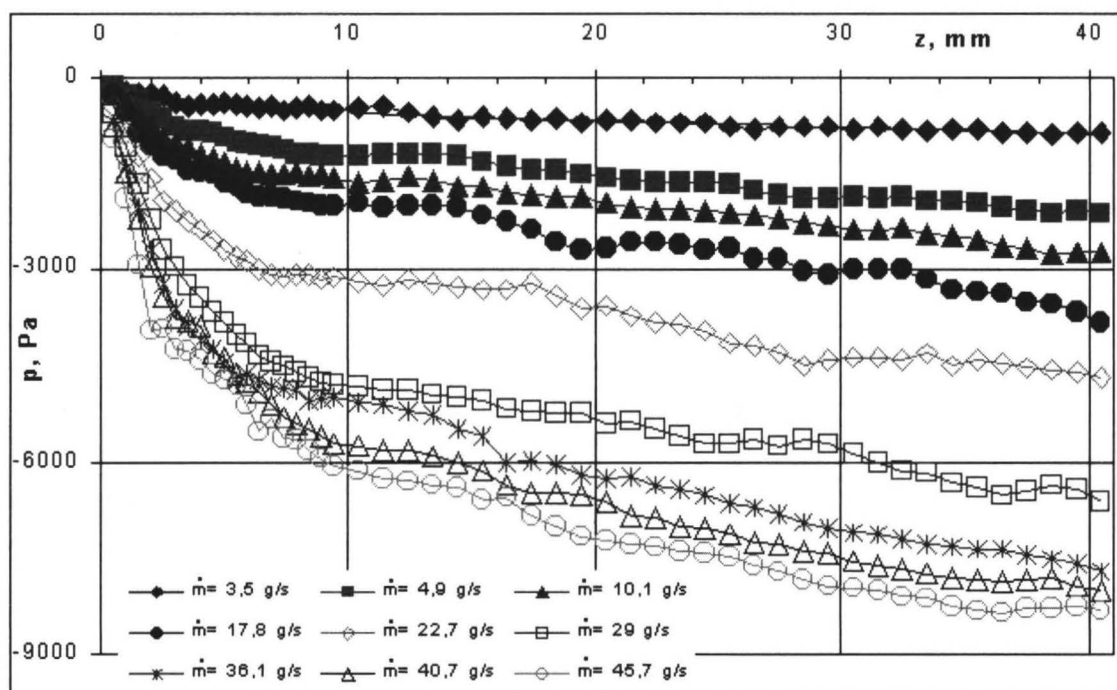
Charakterystyki aerodynamiczne przedstawiają ciśnienie p wewnątrz filtra w funkcji odległości z od wlotu do filtra. Charakterystyki te przedstawiono poniżej dla czterech rodzajów badanych filtrów.



Rys. 5. Lokalne charakterystyki aerodynamiczne Pr. I-a; $p = f(z)$



Rys. 6. Lokalne charakterystyki aerodynamiczne Pr. II; $p = f(z)$

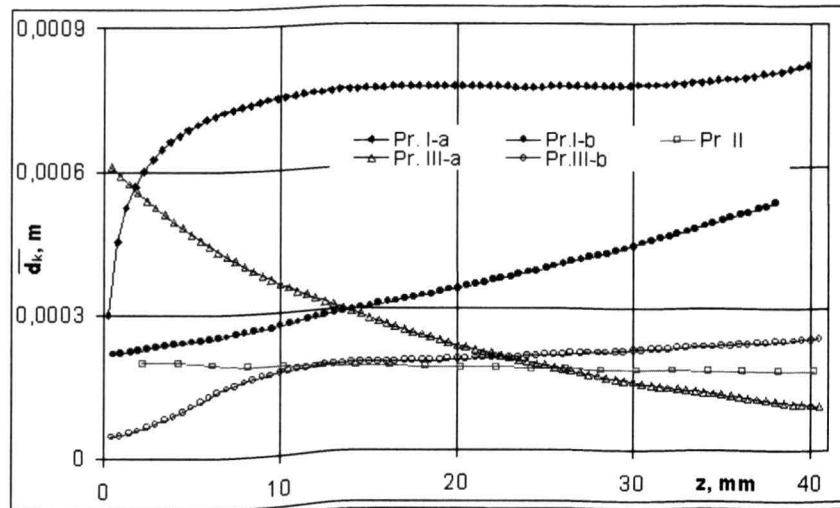
Rys. 7. Lokalne charakterystyki aerodynamiczne Pr. III-a; $p = f(z)$ Rys. 8. Lokalne charakterystyki aerodynamiczne Pr. III-b; $p = f(z)$

3.6. Charakterystyki parametrów geometrycznych przegród niezapylnych

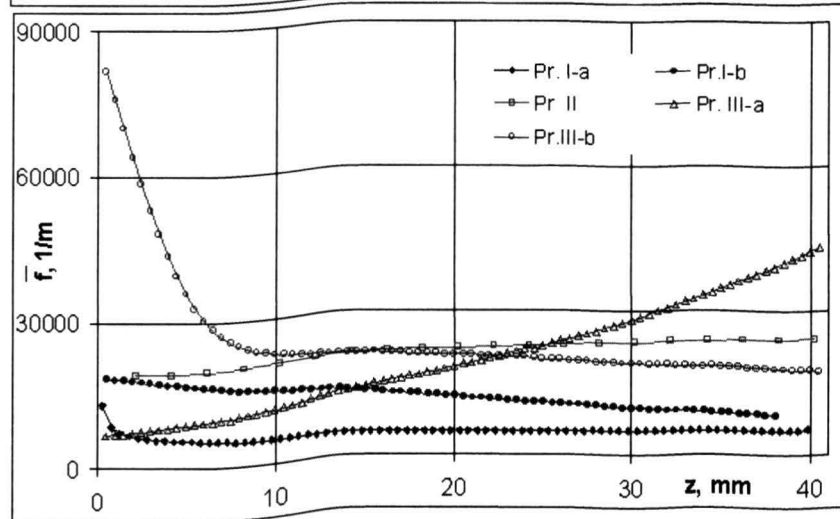
Dla wszystkich przegród obliczono wartości wskaźników geometrycznych, współczynnika przepuszczalności K oraz liczb kryterialnych dla drogi przepływu z i różnych wielkości strumienia masy przepływającego powietrza \dot{m} . Następnie opracowano charakterystyki lokalne $d_k = f(z)$; $\bar{j} = f(z)$, $f = f(z)$, $Re_k = f(z)$; $Eu = f(z)$; $K = f(z)$; $Da_1 = f(z)$; $Da_2 = f(z)$.

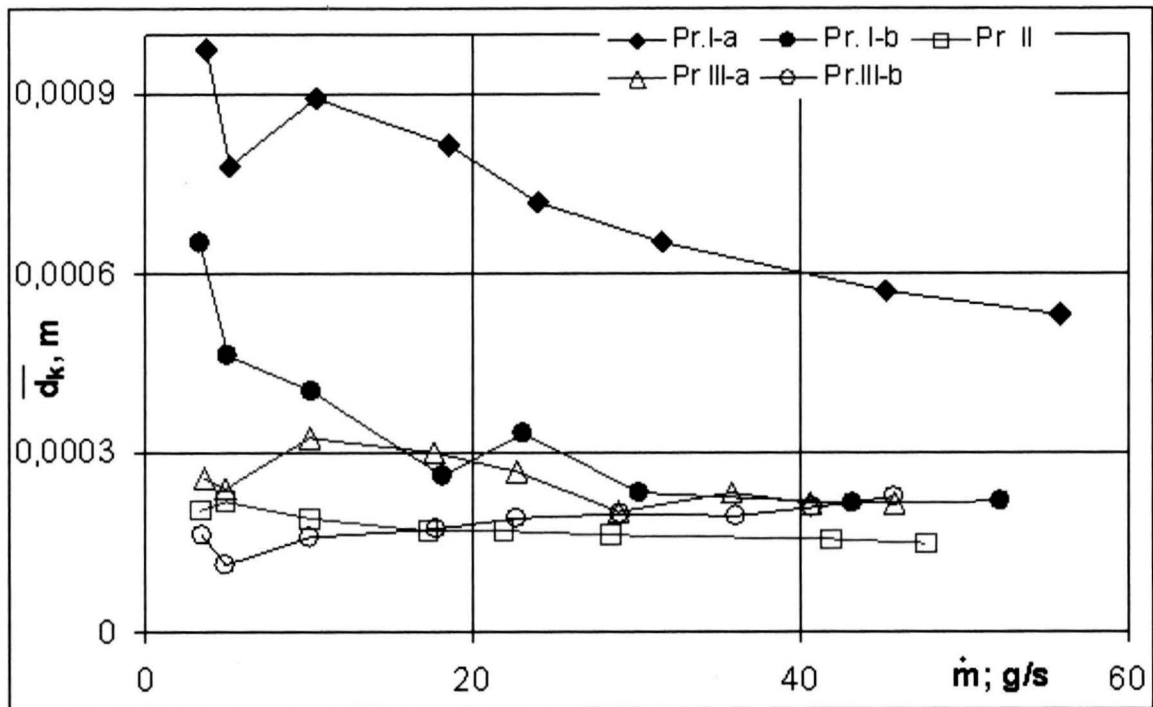
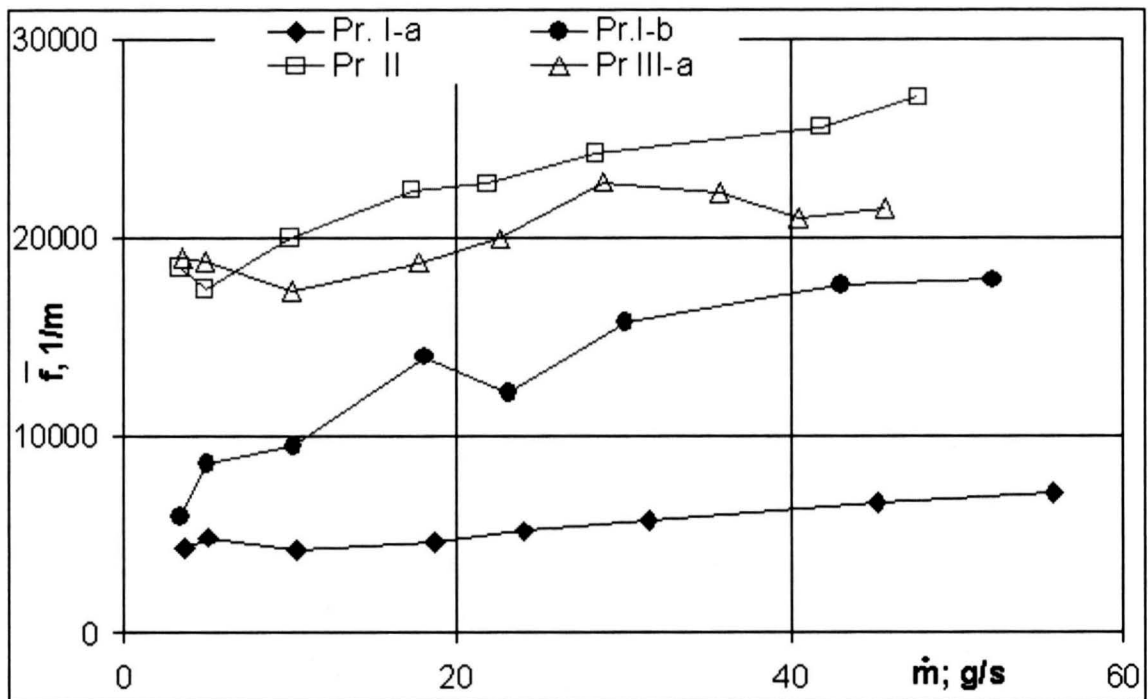
W celu ułatwienia analizy zjawisk występujących w opracowanym modelu obliczono wartości globalne ww. wskaźników. Poniżej zestawiono wybrane, zbiorcze wykresy zależności globalnych dla strumienia masy przepływającego powietrza i dla drogi przepływu wszystkich przegród.

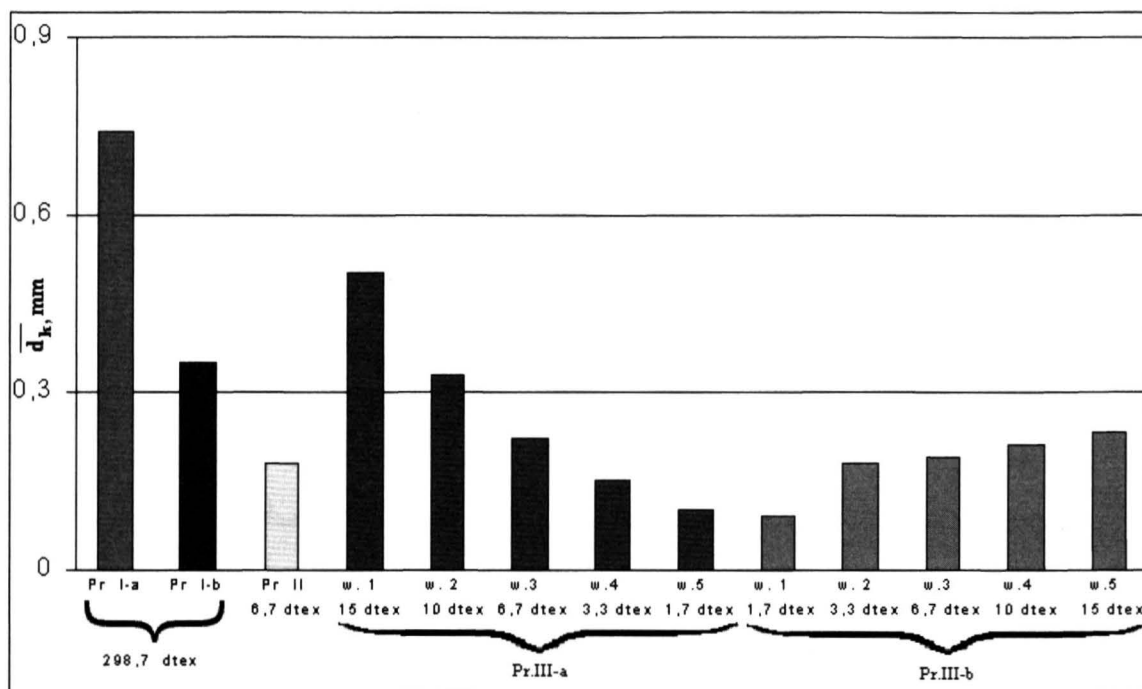
Rys. 9. Charakterystyki globalne $\bar{d}_k = f(z)$



Rys. 10. Charakterystyki globalne $\bar{f} = f(z)$



Rys. 11. Charakterystyki globalne; $\bar{d}_k = f(\dot{m})$ Rys. 12. Charakterystyki globalne; $\bar{d}_k = f(\dot{m})$

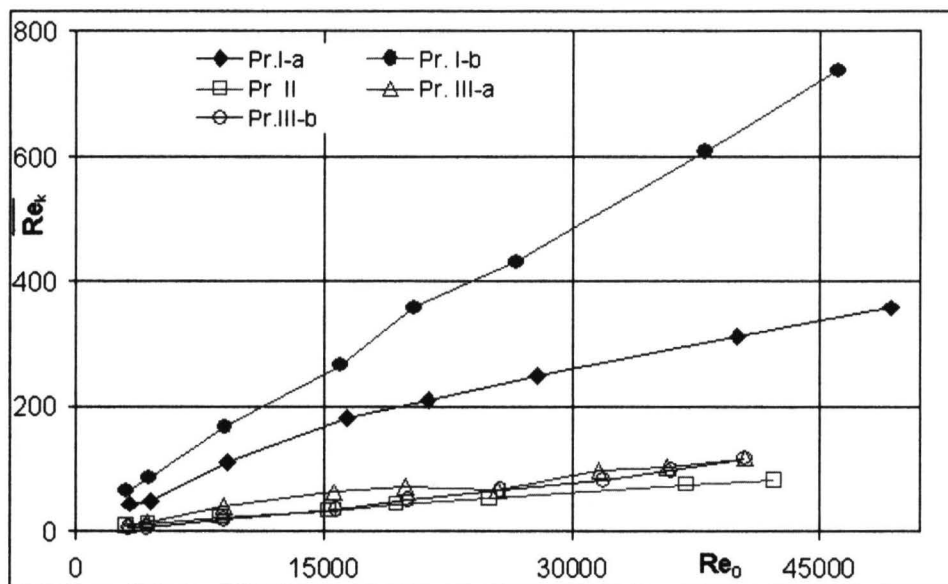


Rys. 13. Zestawienie średnic kanalików modeli filtrów z włókien o różnych średnicach

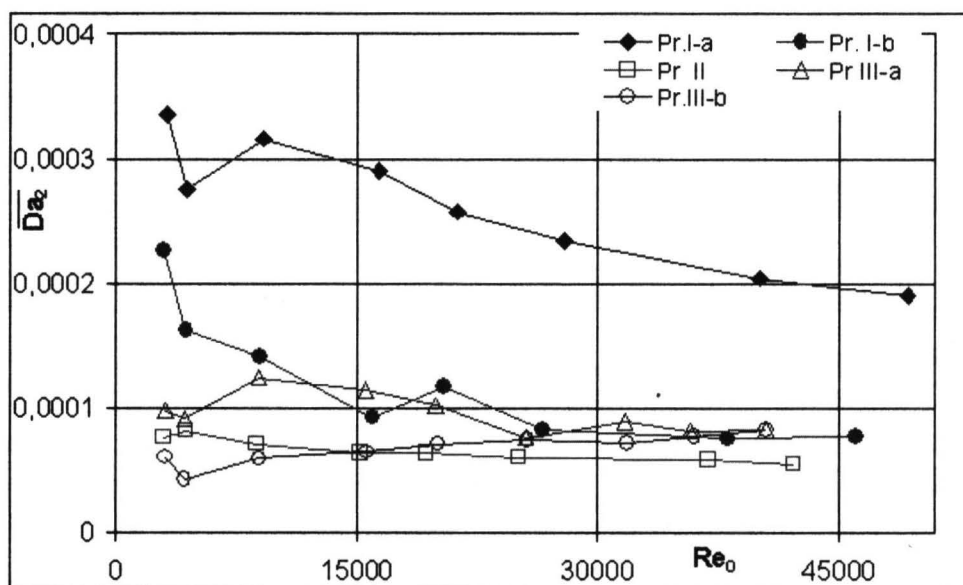
Wartości średnicy kanalika \bar{d}_k (uśrednione dla wszystkich \bar{m}), którą można traktować jako wskaźnik wielkości wolnych przestrzeni wewnątrz włókniny, odpowiednik takiego wskaźnika znanego z literatury, jak średnica pora wskrośnego [21, 22, 25] w wyraźny sposób zależą od budowy przegrody. Rysunki 9 i 10 dowodzą, że dla próbek z włókien o masach liniowych do 15 dtex (Pr.II, Pr.III-a i Pr.III-b) na poziom wskaźników geometrycznych \bar{d}_k i \bar{f} wpływa przede wszystkim średnia średnica włókien w przegrodzie, a nie zmiana charakteru przepływu wynikająca ze zmiany wielkości strumienia przepływającego powietrza. Dla próbek z żyłki (Pr.I-a i Pr.I-b) wartość \bar{d}_k jest wyraźnie większa a \bar{f} mniejsza niż dla przegród z cienkich włókien; zmiana wielkości strumienia przepływającego powietrza oddziałuje jednak w tym przypadku na charakter przepływu dużo silniej. Na rysunku 13 widzimy, że dla warstw filtra Pr.III-a i Pr.III-b wytworzonych z włókien o masie liniowej 1,7 dtex uzyskano, niezależnie od tego czy warstwa była warstwą wlotową (Pr.III-a) czy wylotową (Pr.III-b), zbliżone średnice kanalików \bar{d}_k . Równocześnie ze wzrostem masy liniowej włókien zwiększa się wpływ miejsca warstwy na osi z oraz średnic włókien w warstwach ją poprzedzających. Dla warstwy z włókien o masie liniowej 6,7 dtex znajdującej się w obu filtrach w przybliżeniu w tej samej odległości od wlotu co od wylotu dla Pr.III-a, uzyskano wyraźnie wyższe \bar{d}_k niż dla Pr.III-b. Gdy dla Pr.III-a warstwa z włókien o masie liniowej 15 dtex była warstwą wlotową \bar{d}_k osiągnęło wartość już około dwukrotnie większą w stosunku do Pr.III-b, w której była warstwą wylotową.

3.7. Charakterystyki kryterialne przegród niezapylonych

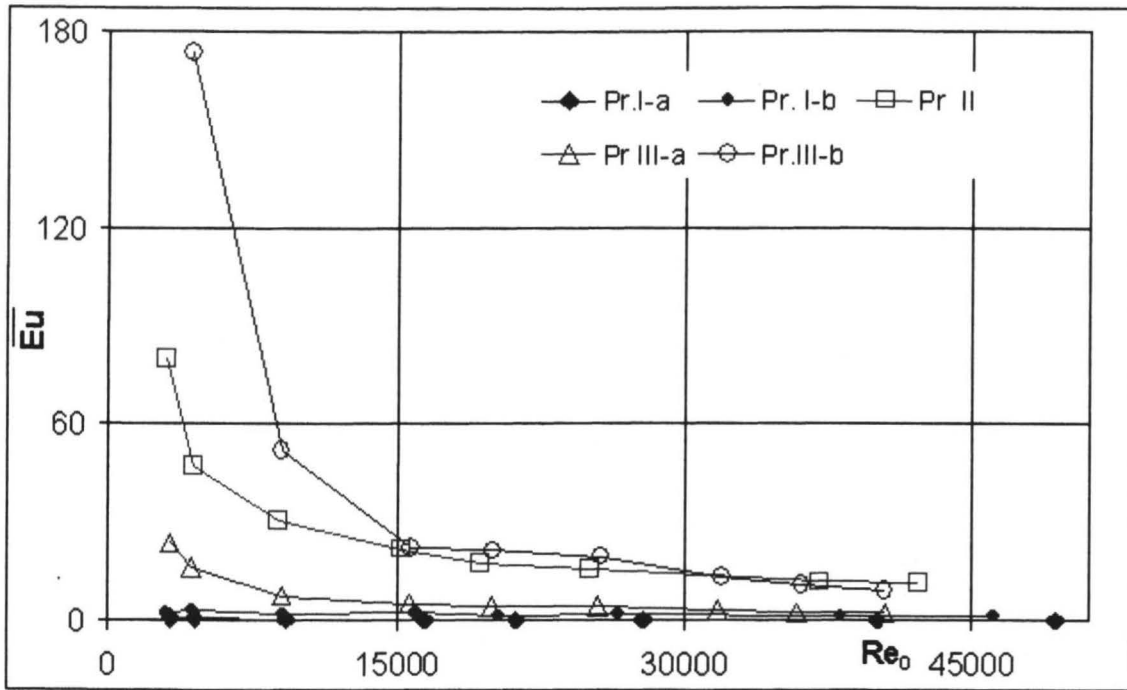
Charakterystyki kryterialne przedstawiają liczby kryterialne Eu , Da_2 i Re_k w funkcji liczby kryterialnej Re_0 oraz liczbę kryterialną Da_2 w funkcji liczby kryterialnej Re_k .



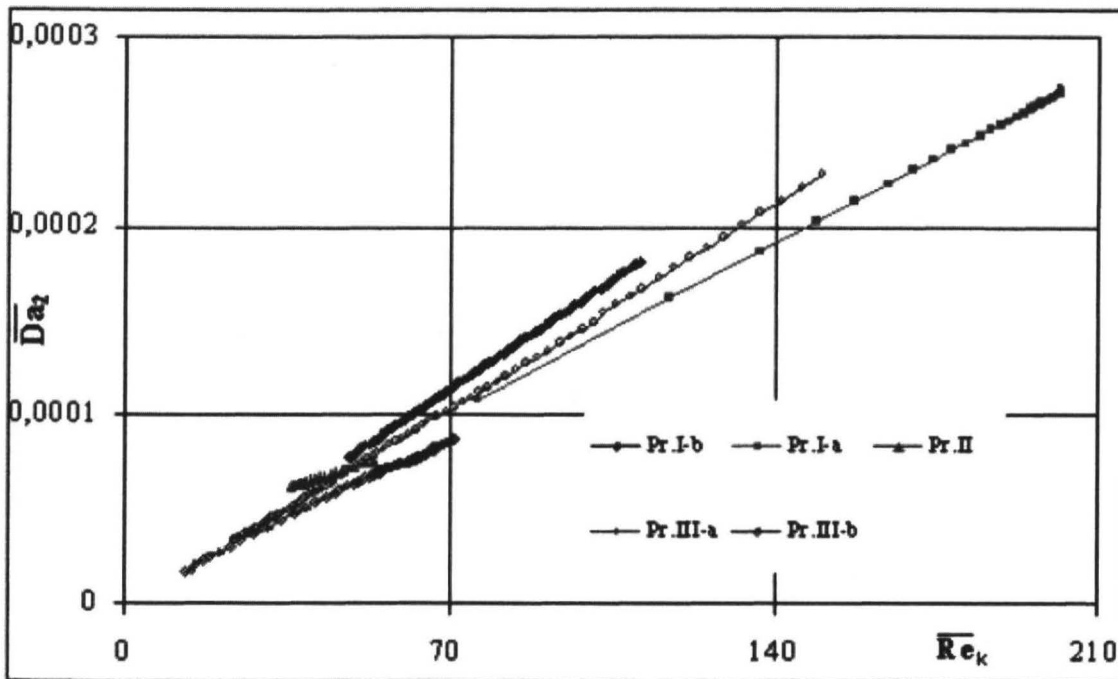
Rys. 14. Charakterystyki kryterialne $\overline{Re}_k = f(Re_0)$



Rys. 15. Charakterystyki kryterialne $\overline{Da}_2 = f(Re_0)$



Rys. 16. Charakterystyki kryterialne $\overline{Eu} = f(\overline{Re}_0)$



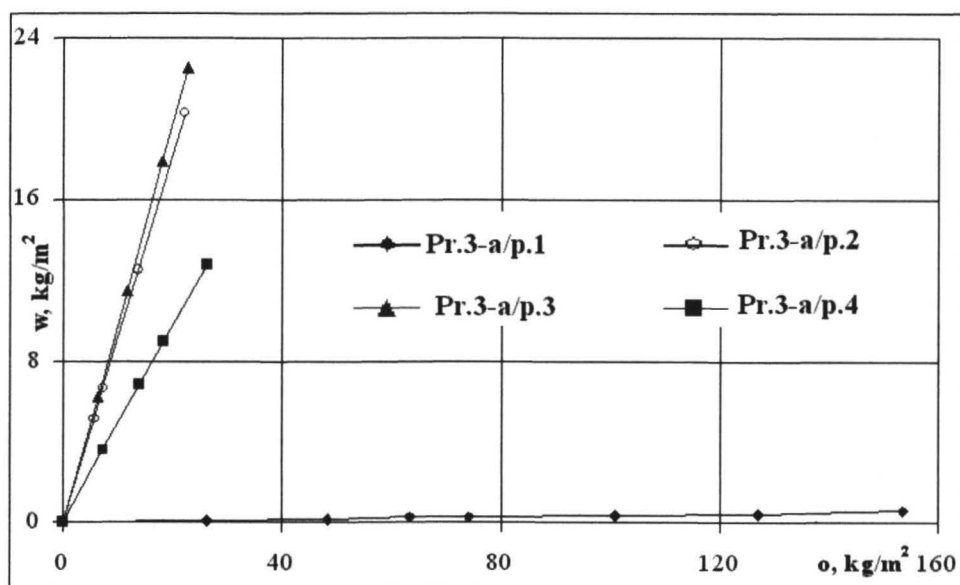
Rys. 17. Charakterystyki kryterialne $\overline{Da}_2 = f(\overline{Re}_k)$

Charakterystyki kryterialne $\overline{Re}_k = f(\overline{Re}_0)$ są w przybliżeniu liniowe i różnią się pomiędzy sobą wyraźnie ze względu na masę liniową włókien z których wytworzono przegrody.

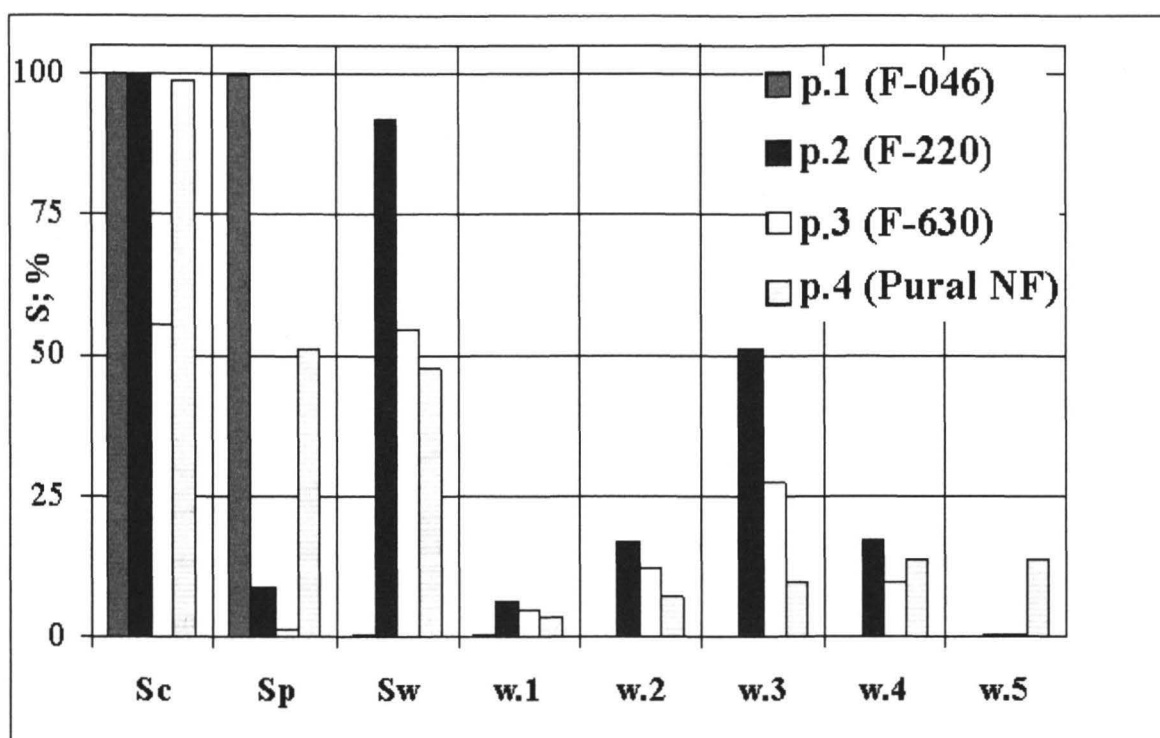
3.8. Właściwości filtracyjne – przykładowe zależności dla próbki Pr. III-a

W ramach badań eksperymentalnych z pyłami wyznaczono ich wskaźniki filtracji, tj. całkowitą, wewnętrzną i powierzchniową skuteczność filtracji i wypełnienie pyłami. Po podaniu każdej porcji pyłu wykonano charakterystyki przepływowe zapylnych przegród i obliczono wartości wskaźników geometrycznych, współczynnika przepuszczalności K oraz liczb kryterialnych dla drogi przepływu z i różnych wielkości obciążenia włóknin pyłami o (po kolejnych cyklach napyłania) oraz opracowano charakterystyki lokalne $d_k = f(z)$; $\bar{j} = f(z)$, $f = f(z)$, $Re_k = f(z)$; $Eu = f(z)$; $K = f(z)$; $Da_1 = f(z)$; $Da_2 = f(z)$.

Poniżej, przykładowo dla próbki Pr. III-a, zaprezentowano charakterystyki $w = f(o)$ przedstawiające zależność pomiędzy wypełnieniem, czyli ilością pyłu znajdującego się wewnątrz przegrody i obciążeniem, czyli całkowitą ilością pyłu zatrzymanego przez filtr (rys. 15) oraz na wykresie 16 zestawiono skuteczności filtracji przegrody: całkowitą S_c , powierzchniową czyli dotyczącą pyłu znajdującego się na powierzchni filtra S_p , i skuteczności wewnętrzne, czyli dotyczące pyłu znajdującego się wewnątrz przegrody: całkowitą wewnętrzną S_w a także wewnętrzne dotyczące poszczególnych warstw S_{w_i} .



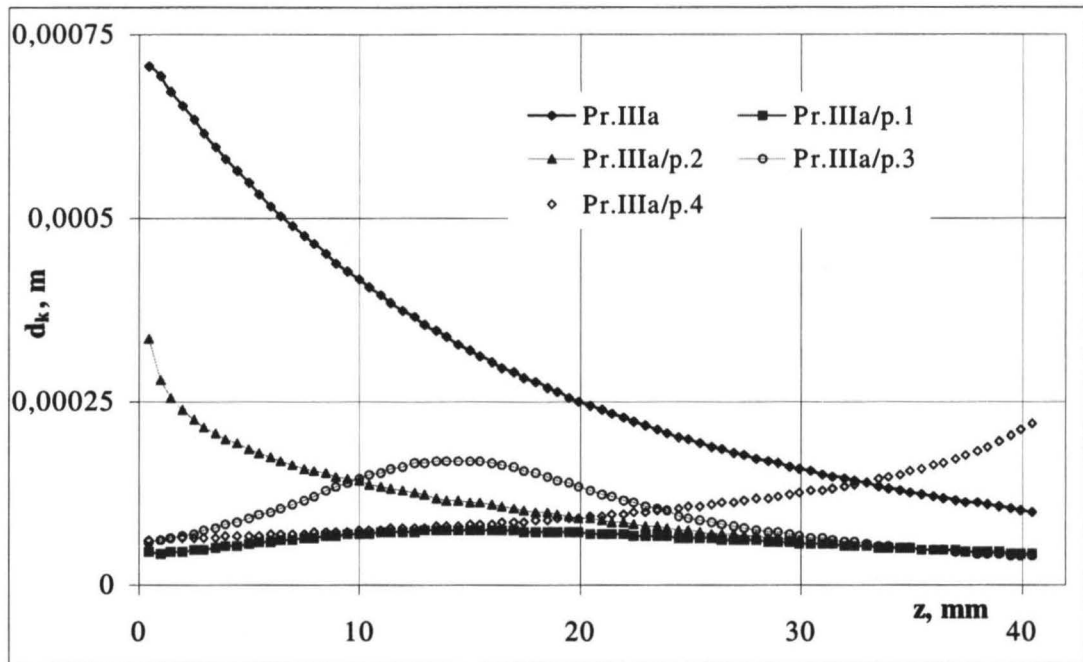
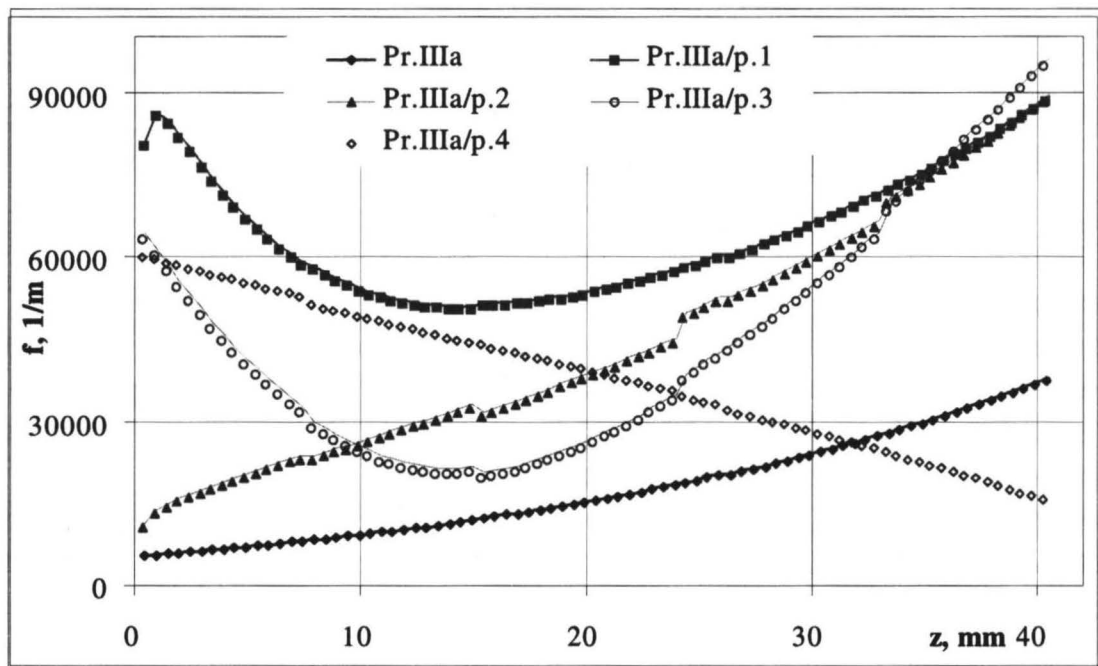
Rys. 18. Wypełnienie Pr.III-a, $w = f(o)$

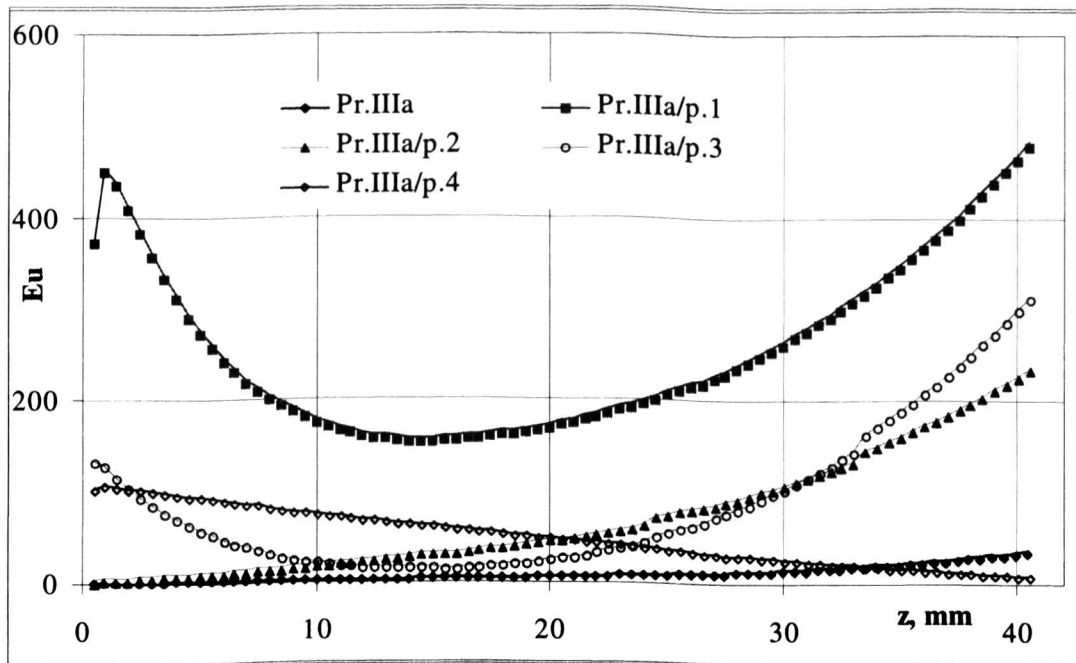


Rys. 19. Skuteczności filtracji Pr.III-a

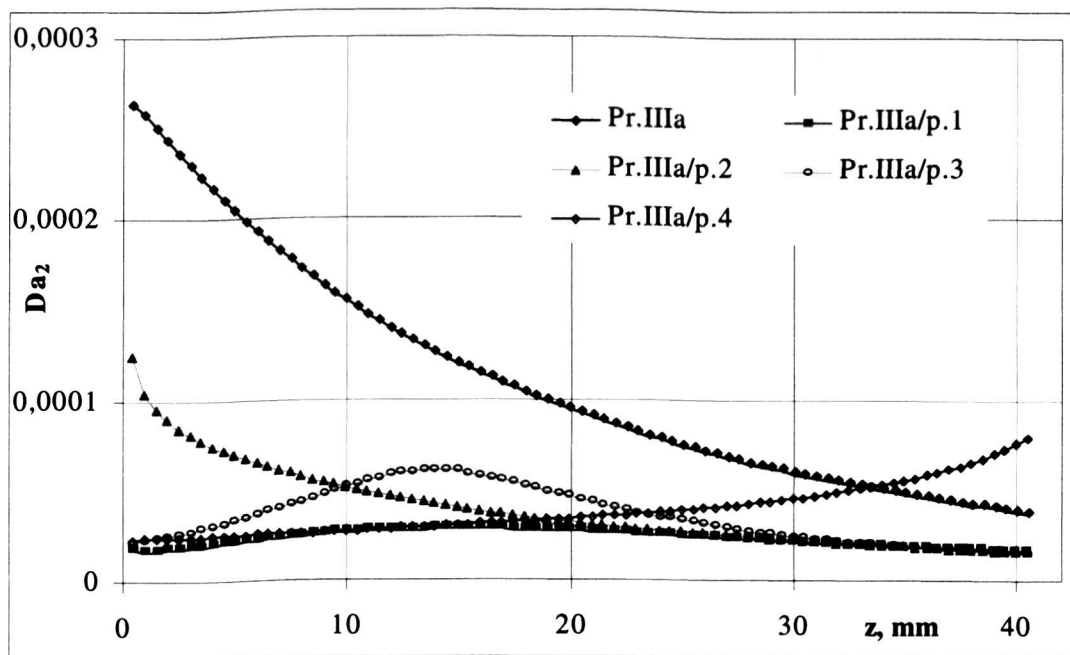
3.9. Lokalne charakterystyki parametrów geometrycznych i liczb – przykładowe zależności dla próbki Pr. III-a z różnymi pyłami

Parametry geometryczne charakteryzują struktury porowate „filtr-pył”, które powstały w wyniku absorpcji pyłu przez przegrody, natomiast liczby kryterialne informują o charakterze przepływu przez te struktury. W oparciu o obliczone wartości wskaźników geometrycznych oraz liczb kryterialnych opracowano charakterystyki globalne dla strumienia masy przepływającego powietrza i dla drogi przepływu. Poniżej zestawiono wybrane charakterystyki: średnice kanalików \underline{d}_k , powierzchnię właściwą \underline{f} , liczbę Eulera \underline{Eu} i Darcy'ego \underline{Da}_2 filtrów czystych i zapylnych w funkcji odległości \underline{z} , od wlotu do filtrów przy zbliżonych wartościach wypełnieniach.

Rys. 20. Charakterystyki Pr.III-a, $d_k = f(z)$ Rys. 21. Charakterystyki Pr.III-a, $f = f(z)$



Rys. 22. Charakterystyki Pr.III-a, $E_u = f(z)$



Rys. 23. Charakterystyki Pr.III-a, $Da_2 = f(z)$

Przebiegi krzywych reprezentujących wskaźniki geometryczne i liczby kryterialne przegród niezapylnych i obłożonych pyłem różnią się wyraźnie i zależą od rodzaju pyłu (głównie jego ziarnistości) i budowy filtra (grubości włókien i układu warstw).

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W wyniku wykonanych badań opracowano model struktury geometrycznej włókienniczego materiału filtracyjnego, zdefiniowany przez średnicę kanalika d_k , liczbę kanalików \bar{j} i powierzchnię właściwą f , oraz model fizyczny oparty o zasady zachowania masy, pędu i energii, który wyrażono przez kryterialne liczby podobieństwa: Re_k , Re_o , Eu , Da_1 i Da_2 .

Opracowany model zweryfikowano eksperymentalnie dla filtrów włókninowych bez pyłu i z pyłem. Umożliwia on opis budowy i struktury tych przegród w nowy sposób. Zależności fizyczne opisujące zjawiska przepływów filtracyjnych można przedstawić w funkcji budowy włókninowych przegród filtracyjnych, tj. takich ich właściwości jak grubość włókien, z których je wytworzono, układ warstw czy porowatość. Badania filtracyjne pozwalają też na rozpoznanie charakterystycznych okresów i stanów procesu filtracji gazowej pyłu. Otrzymane korelacje parametrów geometrycznych i liczb podobieństwa mogą być wykorzystane przy dalszych pracach badawczych oraz projektowaniu nowych przegród włókninowych o właściwościach dostosowanych do konkretnych wymagań użytkownika.

Wykonane badania potwierdzają skuteczność zastosowanej metody do identyfikacji wewnętrznej budowy włókninowych przegród filtracyjnych oraz opisu struktur zapylnych. Może być ona wykorzystana również do oceny ich przydatności do konkretnych zastosowań przemysłowych oraz opisu przebiegu procesu filtracji.

W ramach pracy skonstruowano także przyrząd pomiarowy (zgłoszenie patentu nr P-368 219 autorzy: W. Wawszczak, I. Krucińska, W. Strzembosz) przeznaczony do wyznaczania właściwości geometryczno przepływowych dowolnej struktury włókienniczej i opracowano metodykę pomiarów oraz analizy wyników, które umożliwiają wykonywanie badań za pomocą wyżej wymienionego przyrządu.

4.1. Wnioski końcowe

1. W wyniku wykonanych badań wykazano istnienie wyraźnych zależności pomiędzy budową przegrody, tj. grubością włókien d_w i układem warstw a parametrami geometrycznymi i liczbami kryterialnymi opisującymi model: ze wzrostem grubości włókien d_w wzrasta wyraźnie średnica kanalików d_k , natomiast ich powierzchnia właściwa f ulega zmniejszeniu, dla przegród, których budowa wewnętrzna zmienia się w funkcji z , przebieg krzywych reprezentujących parametry geometryczne odzwierciedla zmienność średnic włókien $d_w = f(z)$.
2. W procesie filtracji we włókninach wyróżnić można charakterystyczne stany:
 - „brak filtracji”,
 - „filtracja z przebicciem przegrody”,
 - „filtracja kompensowana pyłem”,

- „filtracja plackowa”,
 - „filtracja powierzchniowa”,
 - „filtracja wewnętrzna”,
 - „filtracja mieszana”.
 - „filtracja mieszana równomierna”.
3. Opracowany model geometryczno-fizyczny pozwala na jednoznaczne rozróżnienie przegród niezapyłonych i obłożonych pyłem za pomocą krzywych ilustrujących parametry geometryczne i liczby kryterialne. Na przebieg tych krzywych wpływają:
 - budowa przegrody,
 - ziarnistość pyłu,
 - ilość pyłu podanego (obłożenie) i znajdującego się wewnątrz filtra (wypełnienie).
 4. Metodę analizy modelowej przedstawioną w pracy można zastosować również do wyników pomiarów wykonywanych poza stanowiskiem badawczym. Pozwala ona na rozróżnienie przegród wytworzonych z różnych surowców oraz różniących się porowatością.
 5. Zastosowanie opracowanego modelu może być przydatne przy projektowaniu przegród filtracyjnych na bazie tradycyjnych surowców i technologii, lecz o optymalnej strukturze i właściwościach dostosowanych do konkretnych wymagań użytkownika.

5. WYKAZ NAJWAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- c** - prędkość powietrza, m/s,
 d_k - średnica kanalika, m,
 d_w - średnica włókien, μm ,
D - średnica przepływu w głowicy pomiarowej,
Da - liczba Darcego,
Eu - liczba Eulera,
f - powierzchnia właściwa 1/m,
g - grubość badanej próbki, mm,
 g_0 - przyspieszenie ziemskie, $9,81 \text{ m/s}^2$,
i - ilość warstw pomiarowych w badanej próbce,
 \bar{j} - gęstość powierzchniowa kanalików w i-tej warstwie $1/\text{m}^2$,
K - współczynnik Darcy'ego, m^2 ,
o - całkowite obłożenie przegrody pyłem, kg/m^2 ,
 p_i - opór wszystkich warstw przegrody aż do warstwy i, Pa,
 $p(z)$ - zmiana ciśnienia w funkcji odległości z od wlotu powietrza do przegrody, Pa,
 p_w - podciśnienie na wakuometrze, Pa,
 Δp_i - spadek ciśnienia na i-tej warstwie, Pa,

- R** - stała gazowa; dla powietrza $R=287,14 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,
Re_k - liczba Reynoldsa w kanaliku modelu,
Re_o - liczba Reynoldsa w rurze pomiarowej,
S - skuteczność odpylania, %,
S_i - skuteczność odpylania w i-tym napylaniu, %,
S_p - powierzchniowa skuteczność odpylania, %,
S_{wi} - wewnętrzna skuteczność odpylania i-tej warstwy, %,
T - temperatura, K,
W - całkowite wypełnienie przegrody pyłem, kg/m^2 ,
m - strumień masy powietrza, $[\text{kg}/\text{s}]$,
z - głębokość filtra (odległość od powierzchni wlotowej); mm,
η - lepkość dynamiczna, $\text{kg}/(\text{ms})$,
μ - lepkość kinematyczna, m^2/s ,
ε - porowatość,
ρ_w - gęstość włókien, kg/m .

LITERATURA

- [1] **Brown R.C.:** Air Filtration, an Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters; Pergamon Press, New York, 1993.
- [2] **Bukowski J., Kijkowski P.:** Kurs mechaniki płynów; PWN, Warszawa, 1980.
- [3] **Gryboś R.:** Podstawy mechaniki płynów; PWN, Warszawa, 1989.
- [4] **Hansen D.:** A Review of Terminology Pertaining to Darcy's Law and Flow through Porous Media; Journal of Porous Media; Vol 6 No 2 2003, Riverside, USA.
- [5] **Kabsch P.:** Odpylanie i odpylacze; t. 1, WNT, Warszawa 1992.
- [6] **Łuczyński W., Wierzbowska T., Nogacka-Stachowiak M.:** Nowe materiały filtracyjne do odpylania przemysłowego; Techniczne Wyroby Włókiennicze nr 1, Łódź 1995, p. 8-16.
- [7] **Obersztyn E., Strzembosz W.:** Kaskadowe struktury filtracyjne do odpylania przemysłowego; Techniczne Wyroby Włókiennicze nr 1, Łódź 1997, s. 58-64.
- [8] **Obersztyn E., Strzembosz W.:** Optymalizacja parametrów użytkowych włókien filtracyjnych do odpylania przemysłowego; Informacja INSTAL nr 10 1998, s. 44-47.
- [9] **Orzechowski Z.:** Mechanika płynów; Skrypt Politechniki Łódzkiej, Łódź 1975.
- [10] **Orzechowski Z., Prywer J., Zarzycki R.:** Mechanika płynów w inżynierii środowiska; WNT, Warszawa 2001.
- [11] **Pierchlewska-Bernacka A., Strzembosz W.:** Wpływ struktury na właściwości filtracyjne włókien przeznaczonych do odpylania; Techniczne Wyroby Włókiennicze, Łódź 1995, nr 2, s. 45-48.
- [12] **Prosnak W.:** Mechanika płynów; PWN Warszawa 1970.
- [13] **Strzembosz W.:** Włókniny filtracyjne do odpylania przemysłowego; Przegląd Włókienniczy + Tech. Włók., Łódź 2004, s. 3-7.
- [14] Teoria pomiarów pod redakcją H. Szydłowskiego; PWN, Warszawa 1970.

- [15] **Valencia-Lopez J.J.:** Mass Transfer Jump Condition at the Boundary Between a Porous Medium and a Homogeneous Fluid; *Journal of Porous Media*. Vol. 6 No 1 2003 Riverside, USA.
- [16] **Wawszczak W.:** Analogia i podobieństwo zjawisk, materiały dla studentów; Politechnika Łódzka, Instytut Maszyn Przepływowych, Łódź 2000.
- [17] **Wawszczak W.:** Przepływy gazu przez kanały; Politechnika Łódzka, Instytut Maszyn Przepływowych, Łódź 1992.
- [18] **Wawszczak W., Piec M., Strzembosz W.:** The Conception of Filtration Testing in Nonwovens; II International Conference MTE 2000; Katedra Metrologii Włókienniczej, PŁ, Łódź 23-24.11.2000.
- [19] **Wawszczak W., Krucińska I., Strzembosz W.:** Multifunctional Stand for Studies of External and Internal Aerodynamic Properties of Textiles; VII International Conference IMTEX 2002, Department of Textile Engineering and Marketing, Technical University of Łódź, May 2002, Poland.
- [20] **Wawszczak W., Krucińska I., Strzembosz W.:** Aparat do pomiarów i analizy struktury wyrobów włókienniczych (ASW-I); Zgłoszenie patentu nr P-368 219, Przegląd Włókienniczy+ Tech. Włók., Łódź 2004 nr 1, s. 3-7.
- [21] **Wawszczak W., Strzembosz W.:** Aerodynamic Method in Studies of Textile Products; *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, Vol. 13 No 2 (50), Łódź 2005, Poland s. 61-65
- [22] **Wawszczak W., Strzembosz W.:** Criterial Analysis of the Influence of Dust in The Filter Barrier; XI International Conference STRUTEX 2004, 6-7 grudzień 2004 r.
- [23] **Wawszczak W., Strzembosz W.:** Criterion Aerodynamic Analysis of Needled Nonwovens; *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, Vol. 10, No 1 (36), Łódź 2002, Poland.
- [24] **Wawszczak W., Strzembosz W.:** Experimental and Theoretical Diffusion Modelling of Gas Filtration Processes; *Research Journal of Textile and Apparel*, Hong Kong 2004.
- [25] **Wawszczak W., Strzembosz W.:** Recognition of The Mechanical Interaction in Textiles on the Basis of Dust Filtration as an Example; International Conference IMTEX 2004, Department of Textile Engineering and Marketing, Technical University of Łódź, November 2004, Poland.
- [26] **Wierzbowska T.:** Zastosowanie włókien polipropylenowych w igłowanych materiałach filtracyjnych; *Techniczne Wyroby Włókiennicze* 1997, p. 20-30.
- [27] **Wierzbowska T., Strzembosz W., Dolny S.:** Nowe struktury włókninowe do stosowania w odpylaczach dla pyłów drzewnych. *Przemysł Drzewny* nr 11 1996.

MODELLING OF CHARACTERISTIC STATES OF THE GASEOUS DUST FILTRATION IN NONWOVENS

Summary

A new research method for clean and dusted textile materials has been developed, and applied for stitched nonwovens. The basis of this method is testing the aerodynamic resistance of the material along the z -axis, which is perpendicular to the nonwoven's surface, at various quantities of the mass stream of the air flowing through the nonwoven, and within a broad mass range. A geometrical and physical model of the clean and dusted nonwoven's structure is developed on the basis of the aerodynamic characteristics obtained. The model has a layered character described by the following geometrical parameters: duct diameter d_k , specific surface f , and area density of duct j , assessed for each of the layers. A physical model based on the laws of conservation of mass, momenta, and energy, as well as on the Darcy and Poiseuille-Hagen laws was used for the analysis of the investigation we carried out. The Reynolds Re_k , Re_0 , Darcy' Da_1 , Da_2 and Euler Eu criterial numbers describe the phenomena which occur in the filter media. The model that has been worked out was later experimentally verified for clean and dusted nonwoven filters. The research which was carried out confirmed the method applied useful for the identification of the internal structure of nonwoven filters and description of dusted structures.