

Anna JACKIEWICZ, Albert PODGÓRSKI

e-mail: a.jackiewicz@ichip.pw.edu.pl

Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Warszawska, Warszawa

Dyspersja masy w niehomogenicznych filtrach włókninowych

Wstęp

Właściwości filtrów włókninowych są silnie związane z ich strukturą, która jest zwykle niejednorodna, dlatego też modelowanie filtracji przez takie media jest trudne i złożone. Z racji nierównomierności porowatości oraz polidispersyjności rozkładu średnic włókien zastosowanie do opisu procesu klasycznej teorii filtracji wgłębniej z wykorzystaniem średnich parametrów strukturalnych prowadzi do drastycznych błędów przy szacowaniu sprawności rzeczywistego filtra włókninowego. W praktyce często stosuje się układy wielowarstwowe, pozwalające zoptymalizować przebieg procesu. W takim przypadku łączna penetracja przez układ wielowarstwowy winna być – wg klasycznej teorii – równa iloczynowi penetracji przez kolejne warstwy. Takie podejście pomija jednak możliwą osiową dyspersję masy w niehomogenicznych filtrach, która może być spowodowana preferencyjnym przepływem aerozolu przez obszary o większej lokalnej porowatości. Dlatego też, ażeby sprawdzić czy wspomniane zjawisko odgrywa znaczącą rolę w filtracji w filtrach włókninowych, zaproponowano interpretację otrzymanych wyników eksperymentalnych za pomocą modelu osiowej dyspersji masy oraz na ich podstawie wyznaczono współczynniki dyspersji osiowej.

Model osiowej dyspersji masy

Równanie transportowe dla filtracji cząstek aerozolowych w filtrach włókninowych ma postać:

$$U_0 \frac{\partial c}{\partial x} - \varepsilon D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \lambda U_0 c = 0, \quad (1)$$

gdzie pierwszy człon jest członem konwekcyjnym, drugi reprezentuje osiową dyspersję masy, natomiast ostatni jest równaniem kinetycznym lokalnej szybkości depozycji. W powyższym równaniu c jest to chwilowe, lokalne stężenie aerozolu uśrednione w danym przekroju filtra, natomiast x oznacza odległość mierzoną od wlotu filtra. Rozwiązanie tego modelu wraz z warunkami brzegowymi *Danckwerta*:

$$\text{wlot: } U_0 c_0 = U_0 c_{|x=0} - \varepsilon D_x \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)_{|x=0}; \quad \text{wylot: } D_x \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)_{|x=L} = 0, \quad (2)$$

prowadzi do następującego wyrażenia na penetrację, P , aerozoli przez filtr [1]:

$$\frac{1}{P} = \frac{\left(1 + \sqrt{1 + \frac{4d_f \lambda}{Bo}}\right)^2}{4\sqrt{1 + \frac{4d_f \lambda}{Bo}}} \exp\left[-\left(1 - \sqrt{1 + \frac{4d_f \lambda}{Bo}}\right) \frac{LBo}{2d_f}\right] + \frac{\left(1 - \sqrt{1 + \frac{4d_f \lambda}{Bo}}\right)^2}{4\sqrt{1 + \frac{4d_f \lambda}{Bo}}} \exp\left[-\left(1 + \sqrt{1 + \frac{4d_f \lambda}{Bo}}\right) \frac{LBo}{2d_f}\right] \quad (3)$$

gdzie liczba *Bodensteina* jest zdefiniowana następująco: $Bo = U_0 d_f / \varepsilon D_x$ (U_0 – prędkość pozorną powietrza, d_f – średnica włókna, ε – porowatość filtra). Model ten przewiduje – w przeciwieństwie do klasycznej teorii filtracji wgłębniej – niewykładniczy spadek penetracji aerozolu ze wzrostem grubości warstwy filtracyjnej. Zawiera on dwa parametry, współczynnik filtracyjny λ , oraz współczynnik dyspersji osiowej D_x w filtrze, które wyznaczono na podstawie doświadczeń.

Doświadczalna weryfikacja modelu

Przetestowano cztery filtry włókninowe o różnych strukturach wykonane z polipropylenu metodą rozdmuchu stopionego polimeru dla

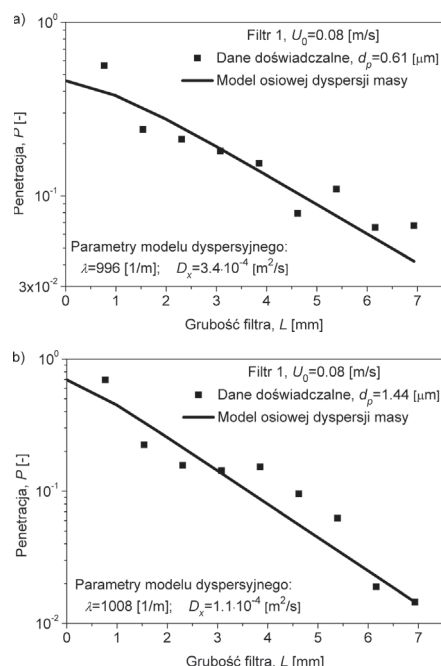
kilku prędkości przepływu powietrza z zakresu 0,08–0,2 m/s. Wyznaczono ich pełną charakterystykę strukturalną (średnią średnicę włókna, d_{Fa} , wraz z odchyleniem standardowym, σ_{adF} , grubość filtra, L , porowatość, ε , gęstość powierzchniową, q_s , współczynnik zmienności, $CV = \sigma_{adF} / d_{Fa}$, będący bezwymiarową miarą polidispersyjności rozkładu wielkości włókien filtra), wyniki zestawiono w tab. 1.

Wyznaczono doświadczalnie penetracje cząstek aerozolowych o rozmiarach 0,2–10 μm wykorzystując zestaw do badania płaskich materiałów filtracyjnych *Palas MFP-2000*. Pomiar przeprowadzono dla układów wielowarstwowych (do 9 warstw) tego samego filtra. Tak otrzymane dane doświadczalne penetracji zinterpretowano za pomocą modelu osiowej dyspersji masy. Dopasowując wartości eksperymentalnych penetracji do równania (3) wyznaczono parametry modelu λ oraz D_x . We wspomnianym równaniu w miejsce d_f wstawiono średnią arytmetyczną średnicę, d_{Fa} . Porównując przykładowe wyniki dla filtra 1 dla prędkości 0,08 m/s dla dwóch różnych średnic cząstek: $d_p = 0,61 \mu\text{m}$ (Rys. 1a) oraz $d_p = 1,44 \mu\text{m}$ (Rys. 1b) stwierdzono, iż wartość współczynnika dyspersji, D_x , jest trzy razy większa w przypadku cząstki mniejszej.

Wyznaczone wartości współczynników dyspersji, D_x , okazały się być kilka rzędów wielkości wyższe od wartości współczynników dyfuzji brownowskiej, D , obliczonych dla tej samej średnicy cząstki według wzoru *Stokesa-Einsteina*: $D = k_B T C_c / 3\pi\mu_g d_p$, gdzie k_B jest stałą Boltzmann, T oznacza temperaturę, C_c jest współczynnikiem *Cunninghama*.

Tab. 1. Charakterystyka strukturalna badanych filtrów

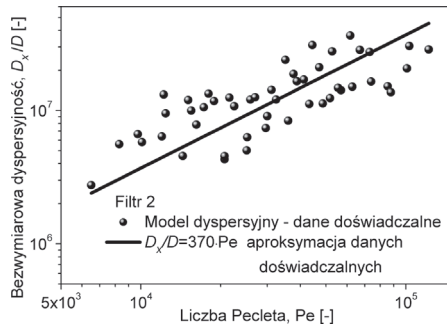
| Nr filtra | $d_{Fa} \pm \sigma_{adF}$ [μm] | L [mm] | ε [%] | q_s [g/m^2] | CV [-] |
|-----------|---|----------|-------------------|---------------------------------|----------|
| 1 | 11,9 \pm 3,8 | 0,77 | 93,2 | 47 | 0,32 |
| 2 | 15,0 \pm 6,2 | 1,28 | 84,4 | 182 | 0,41 |
| 3 | 12,5 \pm 7,6 | 1,14 | 82,2 | 184 | 0,61 |
| 4 | 25,4 \pm 8,4 | 1,37 | 83,6 | 205 | 0,33 |



Rys. 1. Porównanie doświadczalnych wartości penetracji (punkty) dla jednego z czterech badanych filtrów dla tej samej prędkości przepływu gazu dla różnych średnic cząstek z modelem osiowej dyspersji masy (linia ciągła)

ma, zaś μ_g lepkością gazu. Zauważono, iż dane eksperymentalne dla układów wielowarstwowych przedstawione na wykresach jako logarytm penetracji w funkcji grubości warstwy filtracyjnej nie układają się wzdłuż linii prostej, jak to powinno mieć miejsce zgodnie z klasyczną teorią filtracji wgłębnej. Ponadto, dane doświadczalne penetracji ekstrapolowane do $L \rightarrow 0$ nie dążą do 1, co sugeruje nieciągłość stężenia aerozolu w przekroju wlotowym filtra, a co za tym idzie obecność zjawiska dyspersji masy w tychże filtrach. W przypadku każdego z badanych filtrów, dla każdej analizowanej prędkości oraz każdej średnicy cząstki otrzymano bardzo dobrą zgodność danych doświadczalnych penetracji z przewidywaniami modelu osiowej dyspersji masy.

Wyznaczone wartości D_x dla czterech testowanych filtrów dla różnych prędkości oraz średnic cząstek zebrano na wykresach przedstawiających zależność bezwymiarowej dyspersyjności zdefiniowanej jako stosunek D_x/D od liczby Pecleta, $Pe = U_0 d_{Fd}/D$. W celu aproksymowania tej zależności użyto powszechnie stosowanej korelacji: $D_x/D = A \cdot Pe^m$. Pomimo, iż rozrzut danych eksperymentalnych jest znaczny wyniki otrzymane dla wszystkich badanych filtrów można było przybliżyć liniową funkcją liczby Pecleta ($m = 1$) – zob. rezultaty uzyskane dla jednego z czterech testowanych filtrów na rys. 2. Sugerują one dominację dyspersji konwekcyjnej w silnie porowatych filtrach włókninowych. Ich niehomogeniczna struktura powoduje efekt tunelowania, tzn. preferencyjny transport aerozolu przez obszary o wyższej lokalnej porowatości.



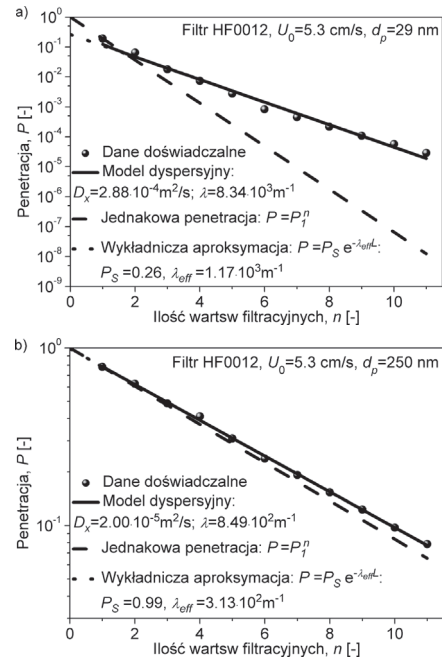
Rys. 2. Aproksymacja bezwymiarowej dyspersyjności liniową funkcją liczby Pe

Model osiowej dyspersji masy zastosowano również do interpretacji zaczerpniętych z literatury danych dotyczących penetracji nanocząstek przez układy filtrów wykonanych z włókna szklanego [2]. Analizowano układy złożone z n (od 1 do 11) warstw filtra HF0012 o następującej charakterystyce strukturalnej: średnia średnica włókna, $d_f = 5,4 \mu\text{m}$, grubość filtra, $L = 0,074 \text{ cm}$, porowatość, $\varepsilon = 96,1\%$, gęstość powierzchniowa, $q_s = 69,2 \text{ g/m}^2$. Pomiarzy były wykonywane dla prędkości przepływu aerozolu równej $5,3 \text{ cm/s}$ za pomocą modularnego zestawu do testowania filtrów TSI 8160. Badano filtrację cząstek NaCl o rozmiarach $d_p = 29; 47; 90,2; 164,4; 250; 326 \text{ nm}$. Do interpretacji danych doświadczalnych penetracji oprócz modelu osiowej dyspersji masy zastosowano dwie inne metody: a) zakładając jednakową penetrację przez wszystkie warstwy równą penetracji przez warstwę pierwszą, P_1 , co prowadzi do zależności: $P = P_1^n$; b) wykorzystując wykładnicze przybliżenie modelu dyspersyjnego (uzyskane przez pominięcie drugiego członu w równaniu (3)), co daje: $P = P_s \exp(-\lambda_{\text{eff}} L_1 n)$, w którym parametry P_s i λ_{eff} obliczono z następujących wzorów:

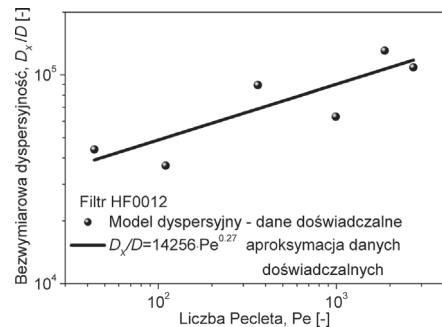
$$P_s = 4\sqrt{1 + 4d_f \lambda / Bo} / (1 + \sqrt{1 + 4d_f \lambda / Bo})^2, \quad (4)$$

$$\lambda_{\text{eff}} = 0,5(\sqrt{1 + 4d_f \lambda / Bo} - 1)Bo/d_f. \quad (5)$$

Wykazano, iż penetracja mierzona dla układów złożonych z n warstw o grubości L_1 każda nie jest równa P_1^n . Rozbieżność pomiędzy danymi eksperymentalnymi penetracji a tym podejściem jest bardziej istotna dla mniejszych cząstek (Rys. 3a), gdy współczynnik dyspersji masy ma większą wartość, przez co spadek stężenia aerozolu w pobliżu wlotu do pierwszej warstwy ma bardziej gwałtowny charakter, niż ma to miejsce dla cząstek większych (Rys. 3b), gdy dyspersja masy odgrywa mniejszą rolę i obie analizowane metody opisu, tj. model dyspersyjny oraz założenie stałej penetracji dla wszystkich warstw, dają zbliżone rezultaty. Ponadto na rys. 3 naniesiono wyniki obliczeń uzyskanych z wykładniczej aproksymacji modelu dyspersyjnego równaniami (4) i (5), które są



Rys. 3. Trzy metody opisu danych doświadczalnych penetracji dla układów wielowarstwowych (punkty): model osiowej dyspersji masy (linia ciągła); stała penetracja przez wszystkie warstwy (linia przerywana); aproksymacja wykładnicza (linia kropkowa)



Rys. 4. Aproksymacja bezwymiarowej dyspersyjności potęgową funkcją liczby Pe

praktycznie niewidoczne, gdyż pokrywają się z pełnym rozwiązaniem modelu dyspersyjnego.

Stwierdzono, iż bezwymiarowa dyspersyjność rośnie – podobnie jak dla aerozoli submikronowych i mikronowych – ze wzrostem liczby Pe , jednakże w przypadku nanoaerozoli zależność ta jest znacznie słabsza od zależności liniowej (Rys. 4).

Wnioski

Uzyskane wyniki pokazały, iż model osiowej dyspersji masy jest w stanie bardzo dobrze opisać dane doświadczalne penetracji zarówno cząstek nanometrycznych, jak i submikronowych oraz mikronowych przez układy złożone z wielu warstw tego samego filtra. Po raz pierwszy wyznaczono współczynniki dyspersji w filtrach włókninowych i okazało się, że są one kilka rzędów wielkości wyższe od współczynników dyfuzji brownowskiej dla tej samej średnicy cząstki. Zaproponowano postać korelacji opisującej zależność stosunku obu wymienionych wyżej współczynników od liczby Pecleta. Stwierdzono, iż dyspersja masy odgrywa istotną rolę w przypadku filtrów włókninowych, szczególnie tych charakteryzujących się silnie poldyspersyjną strukturą.

LITERATURA

- [1] A. Podgórski: Electret Filters, Production and Properties (J. I. T. Stenhouse, L. Gradoń, and J. C. M. Marijnissen, Eds.), pp. 95-106, Delft University Press, 1999.
- [2] D. Japuntich: Proceedings of 22nd Annual Conference of AFS; Bloomington, USA 2009.