

Albert PODGÓRSKI¹, Anna JACKIEWICZ¹, Anne MAIßER², Władysław W. SZYMANSKI², Leon GRADON¹

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

¹ Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Warszawska, Warszawa² Wydział Fizyki, Uniwersytet Wiedeński, Wiedeń, Austria

Filtracja nanoaerozoli – model i eksperyment. Część II. Weryfikacja modeli

Wstęp

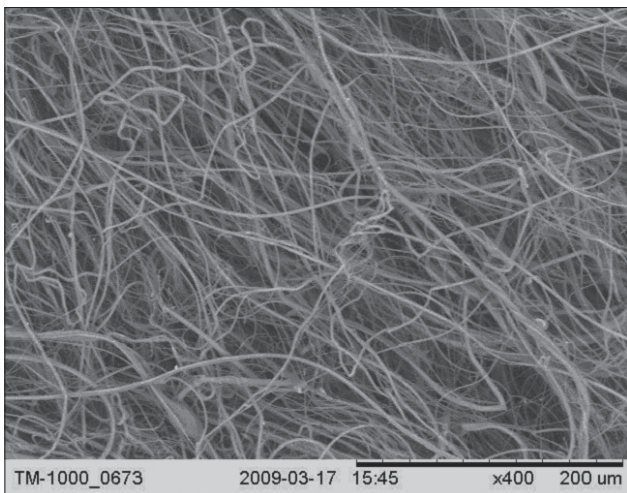
Opisane w poprzedniej części naszej pracy [1] modele filtracji nanoaerozoli w filtrach włókninowych, tzn. klasyczną teorię zastosowaną do średniej (zastępczej) średnicy włókna oraz nowo sformułowany model przepływu częściowo segregowanego (model *PSFM*), poddano weryfikacji doświadczalnej wykorzystując wyniki własnych pomiarów eksperymentalnych penetracji siedmiu rodzajów nanocząstek przez polidispersyjne filtry włókninowe o ściśle zdefiniowanej strukturze, wytworzone metodą rozdmuchu stopionego polimeru. W szczególności, celem pracy było określenie charakteru zależności stopnia segregacji od wielkości nanocząstki i odpowiedź na pytanie, czy możliwe jest znalezienie jakiegokolwiek równoważnej średnicy włókna, dla której klasyczna teoria filtracji byłaby w stanie precyzyjnie opisać doświadczalne wyniki penetracji nanocząstek aerozolowych przez polidispersyjne filtry włókninowe.

Doświadczalna weryfikacja modeli

W celu weryfikacji dwóch omówionych powyżej metod opisu – wykorzystania klasycznej teorii w powiązaniu ze średnią średnicą włókna oraz modelu *PSFM*, przeprowadzono badania doświadczalne penetracji nanoaerozoli przez cztery typy filtrów włókninowych wytworzonych metodą rozdmuchu stopionego polimeru. Poniżej omówione zostaną przykładowe wyniki dla jednego z filtrów, oznaczonego symbolem N6. Wszystkie badane filtry były polidispersyjne (zob. przykładowe zdjęcie SEM dla filtra N6 na rys. 1), a rozkład średnic ich włókien można było precyzyjnie opisać za pomocą rozkładu logarytmiczno-normalnego, którego znormalizowana dystrybuanta dana jest równaniem (1) – zob. przykład takiej aproksymacji dla filtra N6 na rys. 2.

$$G(d_f) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left[\frac{\ln(d_f/d_{Fg})}{\sqrt{2 \ln \sigma_{gdF}}} \right] \right\} \quad (1)$$

Filtr ten cechował się następującymi parametrami: grubość, $L = 0,78$ mm, gęstość upakowania $\alpha = 0,0171$, średnia arytmetyczna średnica włókna $d_{Fa} = 1,91$ μm , średnia geometryczna średnica włókna $d_{Fg} = 1,66$ μm , geometryczne odchylenie standardowe rozkładu średnic włókien $\sigma_{gdF} = 1,52$, minimalna – $d_{Fmin} = 0,72$ μm i maksymalna – $d_{Fmax} = 11,85$ μm – obserwowana średnica włókna.



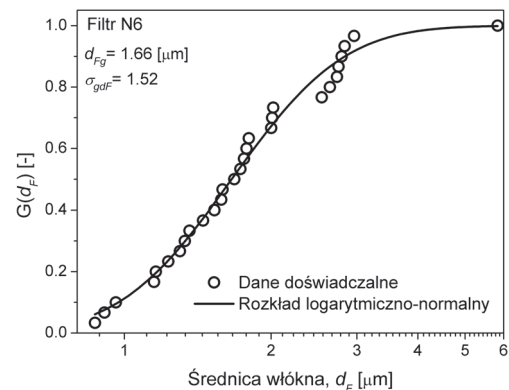
Rys. 1. Zdjęcie SEM filtra N6

Zmierzono penetrację 7 rodzajów nanocząstek aerozolowych o średnicach od 6,3 do 27,2 nm (pięć rodzajów białek: surowica albumina wołowa – BSA, enolaza, gamma-globulina, ferrytyna i tyreoglobulina, oraz dwa rodzaje krzemionki: HS-40 i AS-40). Wszystkie pomiary wykonano dla stałej prędkości pozornej powietrza 5,88 cm/s. Aerozol testowy wytwarzany był metodą atomizacji elektrohydrodynamicznej (*Electrospray Aerosol Generator*, EAG, Model 3480, *TSI Inc.*, USA) a następnie klasyfikowany za pomocą równoległego różnicowego analizatora ruchliwości (*Parallel Differential Mobility Analyzer*, PDMA; patent austriacki nr 502207A1, 2007). Pomiaru stężeń cząstek przed i za badanym filtrem dokonywano za pomocą kondensacyjnego licznika cząstek (*Condensation Particle Counter*, model 3022A, *TSI Inc.*, USA). Procedurę doświadczalną opisano szczegółowo w pracy [2].

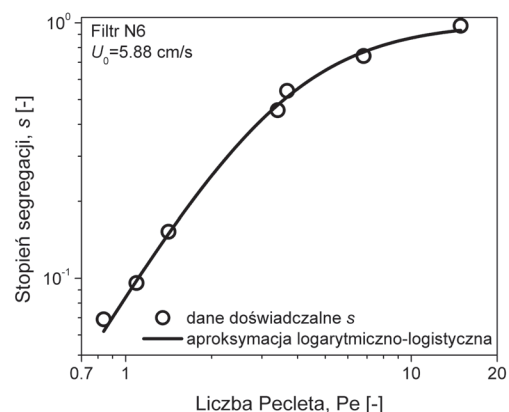
Dla każdej i -tej średnicy cząstki wyznaczono z równania (2) indywidualne wartości stopnia segregacji s_i dla których model *PSFM* pokrywa się dokładnie z danymi doświadczalnymi:

$$s_i = \frac{P_{\text{exp},i} - P_{\text{PMFM},i}}{P_{\text{FSFM},i} - P_{\text{PMFM},i}} \quad (2)$$

gdzie $P_{\text{exp},i}$ jest zmierzona doświadczalnie penetracją cząstek o i -tej średnicy, zaś $P_{\text{PMFM},i}$ i $P_{\text{FSFM},i}$ są penetracjami obliczonymi dla tej średnicy z modelu *PMFM* i *FSFM*, [1]. Okazało się, że tak wyznaczone wartości stopnia segregacji zawierają się w oczekiwany zakres $0 \leq s \leq 1$, przy czym wartości s wzrastały ze wzrostem wielkości cząstki. Łatwo to wytłumaczyć współzawodnictwem dwóch mechanizmów transportu



Rys. 2. Znormalizowana dystrybuanta rozkładu średnic włókien dla filtra N6 – aproksymacja danych doświadczalnych rozkładem logarytmiczno-normalnym

Rys. 3. Aproksymacja logarytmiczno-logistyczna eksperymentalnych wartości stopnia segregacji w funkcji liczby *Pecleta* dla filtra N6

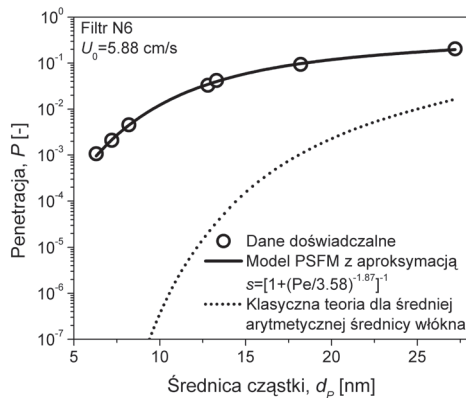
cząstek aerozolowych w niehomogenicznych filtrach włókninowych – konwekcyjną segregacją przepływu w niejednorodnej strukturze filtra oraz dyfuzyjnym mieszaniami aerozolu, którego znaczenie rośnie ze spadkiem wielkości cząstki, zmniejszając w efekcie stopień segregacji dla cząstek mniejszych. Stwierdzono, że dla wszystkich badanych filtrów doświadczalne wartości stopnia segregacji można bardzo precyzyjnie aproksymować w funkcji liczby *Pecleta* (*Pe*) za pomocą rozkładu logarytmiczno-logistycznego:

$$s(Pe) = \frac{1}{1 + \left(\frac{Pe}{Pe_m}\right)^{-\beta}} \quad (3)$$

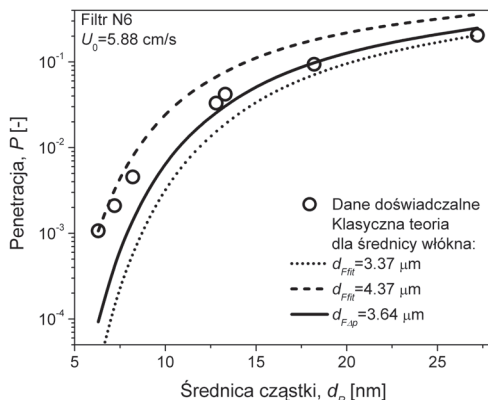
gdzie Pe_m jest medianą rozkładu, zaś β – współczynnikiem kształtu. Przykład takiej aproksymacji dla filtra N6 za pomocą równania: $s = 1/[1 + (Pe/3,85)^{-1,87}]$ przedstawiono na rys. 3. Następnie porównano doświadczalne wartości penetracji nanocząstek z obliczeniami teoretycznymi przeprowadzonymi dwiema metodami: 1) wykorzystując model *PSFM* wraz z logarytmiczno-logistyczną interpolacją stopnia segregacji w funkcji liczby *Pe*; 2) stosując klasyczną teorię do średniej arytmetycznej średnicy włókna d_{Fa} . Jak widać na rys. 4, model *PSFM* zastosowany wraz z logarytmiczno-logistyczną interpolacją stopnia segregacji pozwala perfekcyjnie opisać wyniki pomiarów doświadczalnych, podczas gdy klasyczna teoria dla d_{Fa} przewiduje penetrację nanoaerozoli niższą o kilka rzędów wielkości, przy czym różnica ta staje się coraz większa dla mniejszych cząstek.

Znacznie lepsze wyniki daje zastosowanie do klasycznej teorii zastępczej średnicy włókna wyznaczonej ze spadków ciśnienia, $d_{F\Delta p}$, zob. [1], niemniej jednak tak obliczona penetracja jest wciąż o rząd wielkości mniejsza od penetracji wyznaczonej doświadczalnie dla najdrobniejszych cząstek – por. linię ciągłą na rys. 5.

W następnym etapie przeanalizowano, czy możliwe jest uzyskanie dobrej zgodności obliczeń wg klasycznej teorii z danymi doświadczalnymi, jeśli teorię tę zastosować do odpowiednio dopasowanej, stałej zastępczej średnicy włókna. Przykład takiej analizy dla filtra N6 ilu-



Rys. 4. Porównanie doświadczalnych wartości penetracji (punkty) z modelem *PSFM* (linia ciągła) i z klasyczną teorią dla średniej arytmetycznej średnicy włókna (linia przerywana) dla filtra N6

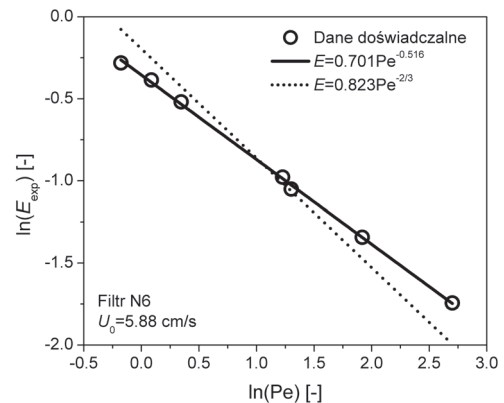


Rys. 5. Porównanie doświadczalnych wartości penetracji z klasyczną teorią dla zastępczej średnicy włókna wyznaczonej ze spadków ciśnienia (linia ciągła) i dla dwóch dopasowywanych średnic włókna (linie przerywane)

strują dwie linie przerywane na rys. 5. Jedną z tych krzywych uzyskana została dla dopasowywanej zastępczej średnicy włókna $d_{Ffit} = 4,37 \mu\text{m}$, dla której klasyczna teoria pokrywa się z danymi doświadczalnymi dla najmniejszych badanych cząstek; niestety, uzyskuje się wtedy znacznie wyższą przewidywaną penetrację od mierzonej doświadczalnie dla cząstek większych. Z drugiej strony, przyjmując $d_{Ffit} = 3,37 \mu\text{m}$, można uzyskać dobrą zgodność klasycznej teorii z doświadczeniem dla cząstek największych, jednakże teoria drastycznie różni się wtedy z doświadczeniem w przypadku najmniejszych analizowanych cząstek. Reasumując można zatem stwierdzić, że nie jest możliwe dopasowanie żadnej stałej zastępczej średnicy włókna, dla której można by za pomocą klasycznej teorii uzyskać dobrą zgodność z danymi doświadczalnymi penetracji w całym zakresie wielkości badanych cząstek aerozolowych. Analizując wykresy na rys. 4 i 5 można zauważyć, że przebieg zależności $P(d_p)$ jest, wg klasycznej teorii, znacznie bardziej stromy, niezależnie od zastosowanej średnicy zastępczej włókna, niż przebieg tej zależności wyznaczony doświadczalnie, bądź uzyskany z modelu *PSFM*. Widać to szczególnie wyraźnie, jeśli doświadczalne wartości sprawności E_{exp} pojedynczego włókna, obliczone na podstawie eksperymentalnych danych penetracji jako:

$$E_{exp} = \frac{\pi(1-\alpha)d_{Fa} \ln P_{exp}}{4\alpha L} \quad (4)$$

wykreślmy na wykresie logarytmicznym w funkcji liczby *Pe* (Rys. 6). Jak widać, uzyskany pozorny wykładnik liczby *Pecleta* (opartej na średniej arytmetycznej średnicy włókna) przyjmuje większą wartość, od oczekiwanej z klasycznej teorii wartości $-2/3$. Jest to jakościowo zgodne z naszymi wcześniejszymi rozważaniami teoretycznymi [3] i danymi doświadczalnymi innych autorów [4].



Rys. 6. Aproksymacja doświadczalnych danych sprawności pojedynczego włókna potęgową funkcją *Pe* – stały wykładnik = $-2/3$ – linia przerywana, wolny wykładnik – linia ciągła

Wnioski i podsumowanie

Przeprowadzone badania doświadczalne filtracji nanoaerozoli w polidispersyjnych filtrach włókninowych pokazały, że klasyczna teoria nie jest w stanie poprawnie przewidzieć ich penetracji, niezależnie od zastosowanej do obliczeń wartości zastępczej średnicy włókna. Zaproponowany model *PSFM* daje natomiast możliwość niezwykle precyzyjnego opisu danych eksperymentalnych, jeśli uwzględni się zależność stopnia segregacji od liczby *Pecleta*. Analogiczne rezultaty uzyskano dla trzech innych badanych filtrów.

LITERATURA

- [1] A. Podgórski, A. Jackiewicz, A. Maisser, W. Szymanski, L. Gradoń: Inż. Ap. Chem. 49, nr 1, 89 (2010).
- [2] A. Podgórski, A. Maisser, W. Szymanski, A. Jackiewicz, L. Gradoń: Aerosol Sci. Technol. – złożono do recenzji (2010).
- [3] A. Podgórski: J. Nanopart. Res. 11, 197 (2009).
- [4] J. Wang, D.R. Chen, D.Y.H. Pui: J. Nanopart. Res. 9, 109 (2007).