

Jakub M. GAC, Agnieszka PAZIEWSKA

e-mail: J.gac@ichip.pw.edu.pl

Katedra Inżynierii Procesów Zintegrowanych, Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Warszawska, Warszawa

Badanie porywania kropeł zdeponowanych na włókninowych wkładach filtracyjnych

Wstęp

Filtracja aerozoli z rozproszoną fazą ciekłą (mgieł) jest ważnym zagadnieniem praktycznym dla przemysłu chemicznego i pokrewnych [Boundy i in., 2000; Thornburg i Leith, 2000]. Istotność tego problemu wynika z faktu, że liczne substancje ciekłe wykorzystywane w procesach przemysłowych charakteryzują się właściwościami szkodliwymi zarówno dla człowieka jak i dla innych organizmów żywych. Z tego względu proces filtracji mgieł jest w ostatnim czasie bardzo intensywnie badany.

Zależność początkowej sprawności filtracji kropeł oraz początkowej wartości spadku ciśnienia na filtrze od parametrów filtra jest dość dobrze poznana. Zarówno wyniki badań eksperymentalnych, jak i modelowania numerycznego potwierdzają możliwość zastosowania do opisu tych parametrów metod stosowanych dla filtracji aerozoli stałych. Jednak przebieg filtracji niestacjonarnej, która zachodzi na filtrach pracujących przez dłuższy czas, jest zupełnie inny, niż przebieg filtracji cząstek stałych. Różnice wynikają przede wszystkim z faktu, że ciecz zdeponowana wewnątrz filtra w procesie filtracji posiada inną morfologię, niż depozyty cząstek stałych. Ponadto, na przebieg filtracji niestacjonarnej aerozoli ciekłych mogą mieć wpływ takie zjawiska, jak ociekanie włókien filtracyjnych oraz porywanie zdeponowanych kropeł przez strumień gazu. O ile pierwsze z tych zjawisk zostało stosunkowo dobrze poznane [Gac i Gradoń, 2013], zjawisko porywania zdeponowanych kropeł z włókien filtracyjnych jest ciągle jeszcze stosunkowo słabo zbadane. Nieliczne prace poświęcone temu zagadnieniu koncentrują się raczej na opisie zjawiska w skali mikro (porywanie pojedynczej kropli z izolowanego włókna) [Mullins i in., 2007], niż na makroskopowym opisie efektywności porywania kropeł. Tymczasem, ilościowy i jakościowy opis tego zjawiska może mieć kluczowe znaczenie dla projektowania filtrów do filtracji mgieł.

Celem niniejszej pracy jest eksperymentalne zbadanie efektywności porywania kropeł zdeponowanych na włóknach filtracyjnych. Przedstawione wyniki pozwolą opisać wpływ parametrów filtra na tę efektywność oraz stwierdzić, na ile jest to zjawisko istotne dla przebiegu filtracji aerozoli ciekłych.

Badania doświadczalne

Aparatura

Charakterystyki badanych wkładów filtracyjnych przedstawiono w tab. 1. Sprawności tych filtrów oraz ich wielowarstwowych kombinacji były badane w poprzedniej pracy [Gac i Gradoń, 2013]. Wszystkie wkłady składały się z włókien polipropylenowych i były otrzymywane metodą rozdmuchu stopionego polimeru (*melt blown*). Oprócz wymienionych wkładów testowano również wkład elektretowy. Jego charakterystyka była taka sama, jak filtra 2, lecz dodatkowo jego włókna posiadały trwały ładunek elektryczny, wytworzony na skutek działania wyładowania koronowego podczas zastygania włókien. Do badań dobierano wkłady filtracyjne o takiej samej grubości (posiadały one również zbliżone masy) równej 3 mm. Powierzchnia przekroju poprzecznego wkładów filtracyjnych wynosiła 177 cm².

Porywanie kropeł z włókien filtracyjnych było badane przy użyciu układu do testowania wkładów filtracyjnych HFP 2000 firmy PALAS. Schemat tego układu przedstawiony jest na rys. 1.

Generatorem aerozolu stosowanym do obładowywania wkładów filtracyjnych był nebulizator PLG 2000, który wytwarza aerozol ciekły przy użyciu dyszy Laskina. Koncentracja kropeł wytwarzanych przez nebulizator jest zależna od ciśnienia sprężonego powietrza zasilającego nebulizator, które może być kontrolowane.

Tab. 1. Parametry badanych filtrów koalescencyjnych

Filtr	Średnia średnica włókien [μm]	Odchylenie średnicy włókien [μm]	Porowatość [-]
1	18,05	6,47	0,821
2	11,00	5,22	0,817
3	29,10	11,11	0,835

Do pomiaru ilości kropeł porywanych z wkładu filtracyjnego wykorzystywano spektrometryczny licznik cząstek Welas 1200. Próbką służącą do pomiaru stężenia kropeł za filtrem była usytuowana na osi kanału w odległości 15 cm od filtra.

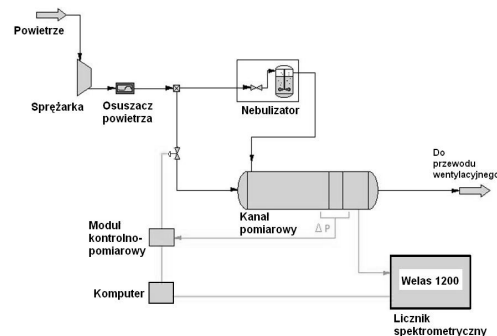
Badany wkład filtracyjny znajdował się w adapterze umieszczonym w poziomym kanale pomiarowym w odległości 75 cm od wlotu aerozolu. Badania wstępne pokazują, że dla tej odległości rozkład kropeł generowanych przez nebulizator można uznać jako stacjonarny. Ponadto, producent podaje, że dla takiej odległości koncentracja kropeł docierających do filtra jest praktycznie stała w każdym punkcie przekroju kanału pomiarowego (dla mniejszych odległości występuje maksimum koncentracji na osi kanału).

Materiały

Cieczą używaną do obładowywania filtrów był dietyloheksylosebakat (DEHS) - olej powszechnie stosowany do badania sprawności wkładów filtracyjnych.

Metodyka i procedura badań

Wkład filtracyjny był umieszczany w komorze testowej i intensywnie obładowywany kroplami DEHS poprzez ekspozycję na strumień aerozolu wytwarzanego przez generator. W celu jak najszybszego obładowania filtra cieczą – przy jednoczesnym zachowaniu warunków zbliżonych do rzeczywistego procesu filtracji (równomierna ekspozycja całego filtra na aerozol oraz stężenie kropeł na tyle niskie, aby koalescencja zachodząca w strumieniu gazu mogła zostać pominięta), ciśnienie powietrza zasilającego dyszę Laskina było ustawione na maksymalną możliwą wartość (400 kPa). Przy tej wartości ciśnienia zasilającego licznik spektrometryczny był odłączony, gdyż koncentracja kropeł była zbyt duża, aby możliwe było ich zliczanie (maksymalne ciśnienie zapewniające koncentrację kropeł, przy której możliwa jest normalna praca licznika wynosi około 80 kPa – i takie było stosowane w naszej poprzedniej pracy [Gac i Gradoń, 2013]). Masa filtra, która początkowo rosła podczas obładowywania filtra, po pewnym czasie osiągała praktycznie stałą wartość na skutek wystąpienia równowagi pomiędzy depozycją kropeł cieczy, porywaniem zdeponowanych kropeł oraz ociekaniem włókien [Frising i in., 2012].



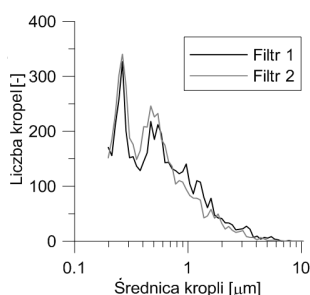
Rys. 1. Schemat układu do badania porywania kropeł zdeponowanych na filtrach włókninowych.

Wówczas przerywano pracę generatora aerozolu, uruchamiano licznik i rozpoczynano pomiar ilości i średnicy kropeł za wkładem filtracyjnym. Prędkość liniowa powietrza, zarówno w fazie obciążenia filtra, jak i pomiaru, wynosiła 0,2 m/s. Jedynie dla filtra 2 (z włóknami bez ładunku elektrycznego) przeprowadzono badanie również dla wartości prędkości 0,8 m/s. Pomiary przerywano, gdy liczba kropeł zarejestrowanych przez licznik w ciągu minuty spadała poniżej 10.

Wyniki i dyskusja

Liczba porywanych kropeł

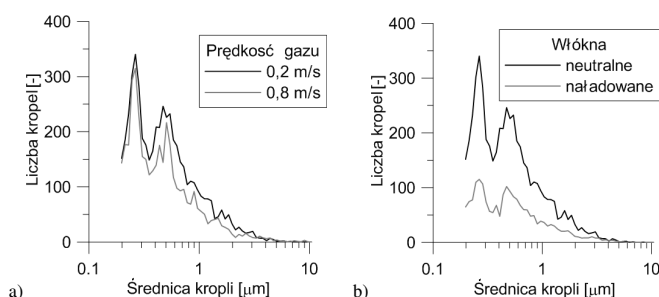
Na rys. 2. przedstawiono liczbę porywanych kropeł z dwóch badanych filtrów w czasie jednej minuty po zatrzymaniu pracy generatora. W obu przypadkach filtry zostały obciążone do stanu równowagowego, w którym masa oleju zatrzymywanej przez filtr równa jest masie oleju usuwanej z filtra na skutek ociekania włókien lub porywania kropeł. Z rys. 2. wynika, że dla obu filtrów liczba ta jest zbliżona, gdyż charakteryzują się one zbliżonymi parametrami (średnica włókien oraz porowatość). Liczba kropeł porywanych w tym samym czasie z filtra 3 była znacznie mniejsza i nie przekraczała 20 dla żadnego zakresu wartości średnic kropeł.



Rys. 2. Liczba kropeł porywanych z badanych filtrów w czasie 1 min. po wyłączeniu generatora.

Na podstawie tych obserwacji można stwierdzić, że efektywność porywania kropeł jest mniejsza w przypadku filtrów o większych średnicach włókien. Wprawdzie różnica pomiędzy liczbami kropeł porywanych z obu filtrów jest stosunkowo niewielka, jednak fakt, że była ona obserwowana pomiędzy wynikami dowolnych pięciu pomiarów przeprowadzonych dla obu filtrów pozwala stwierdzić, że nie jest to wyłącznie wynik niepewności pomiarowej, lecz stała tendencja. Jest to zgodne z wynikami przedstawionymi przez Dawara i Chase [2010], wg których siła działająca na kroplę o określonej objętości ze strony włókna jest funkcją rosnącą zależną od średnicy tego włókna.

Bardziej szczegółowa analiza pozwala zauważyć, że w przypadku filtra 2 obserwuje się nieco większą liczbę małych kropeł (o średnicach mniejszych, niż 0,8 μm), podczas gdy dla filtra 1 obserwuje się większą liczbę dużych kropeł (o średnicach powyżej 0,8 μm). Mimo, że różnica ta jest niewielka, została ona zaobserwowana przy każdym powtórzeniu pomiaru. Efekt ten prawdopodobnie wynika z faktu, że w przypadku filtra o nieco większej średnicy włókien (filtr 1) rzadziej dochodzi do rozpadu zdeponowanej kroplel i porwania jej niewielkiego fragmentu.

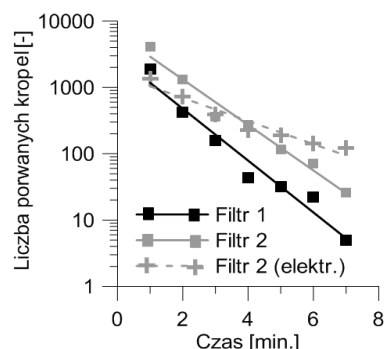


Rys. 3. Liczba kropeł porywanych z filtra 2 w czasie 1 min. po wyłączeniu generatora w przypadku (a) dwóch różnych prędkości gazu i (b) obecności lub braku stałego ładunku elektrycznego na włóknach.

Na rys. 3a. przedstawiono liczbę porywanych kropeł (również podczas pierwszej minuty po zatrzymaniu pracy generatora) dla dwóch różnych prędkości gazu. Mimo, że liczba porywanych kropeł w obu przypadkach jest również zbliżona, to dla większej prędkości gazu obserwuje się nieznacznie mniej kropeł o średnicach powyżej 0,5 μm. Różnica ta również była obserwowana w przypadku każdej pary serii pomiarowych. Warto również zwrócić uwagę, że wartość równowagowa masy oleju zatrzymanego w filtrze jest trochę mniejsza dla przypadku prędkości 0,8 m/s i wynosi 7,7 g, wobec 8,6 g oleju zatrzymanego przy prędkości 0,2 m/s. Na podkreślenie zasługuje fakt, że przy ustalonej prędkości (0,2 m/s) równowagowa masa oleju zatrzymanego w filtrze jest większa w przypadku większej średniej średnicy włókien. Dla filtra 1 wynosiła ona 8,4 g a dla filtra 3 – 21,1 g (początkowa masa suchego filtra we wszystkich przypadkach wynosiła 3,6 g).

Rys. 3b przedstawia liczbę kropeł porywanych z filtra 2 (również w ciągu 1 minuty od zatrzymania pracy generatora) dla zwykłego filtra oraz dla filtra elektretowego. Prędkość liniowa gazu dla obu przypadków wynosiła 0,2 m/s. Z wykresu tego wynika jednoznacznie, że liczba porywanych kropeł (o dowolnych średnicach) z filtra elektretowego jest istotnie mniejsza, niż z filtra o włóknach niemodyfikowanych. Równocześnie, masa oleju zatrzymanego w filtrze elektretowym wynosiła 20,25 g, a więc znacznie więcej, niż w przypadku oryginalnego filtra. Należy zatem stwierdzić, że włókna obciążone trwałym ładunkiem elektrycznym silnie wiążą krople oleju, niż włókna nie posiadające tego ładunku. Na podstawie przedstawionych wyników nie można jednak stwierdzić, czy dominującą przyczyną obserwowanego spadku ilości porywanych kropeł jest tutaj występowanie ładunku elektrycznego na powierzchni włókien czy lokalna modyfikacja powierzchni włókna (zwilżalności), która zachodzi na skutek oddziaływania koronowego. Takie lokalnie występujące niejednorodności powierzchni mogą prowadzić do zaczepienia (pinning) krawędzi kropeł i tym samym utrudniać ruch kropeł, zwłaszcza o małych średnicach, i ich odrywanie od powierzchni [Schäffer i Wong, 1998; Ramos i Tanguy, 2006].

Wraz z czasem, jaki upłynął od wyłączenia generatora, zmniejsza się oczywiście liczba kropeł porywanych z filtra. Rys. 4. przedstawia zmianę całkowitej liczby kropeł mierzoną w strumieniu gazu opuszczającym filtr w czasie minuty w funkcji czasu (czas liczony jest od chwili zatrzymania pracy generatora).



Rys. 4. Całkowite liczby kropeł porywanych z poszczególnych filtrów w czasie.

Na podstawie wykresów zamieszczonych na rys. 3 można stwierdzić, że liczba kropeł opuszczających filtr maleje, w przybliżeniu eksponencjalnie, zgodnie z równaniem:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

gdzie:

$N(t)$ – liczba kropeł zaobserwowanych w czasie 1 minuty po czasie t w powietrzu opuszczającym filtr

N_0 – liczba kropeł zaobserwowanych w czasie pierwszej minuty od wyłączenia nebulizatora w powietrzu opuszczającym filtr

λ – stała charakteryzująca szybkość zaniku liczby porywanych kropeł [min^{-1}]

Analogiczna zależność zachodzi dla strumieni kropeł w strumieniu gazu opuszczającym filtr. Istotnie, po pomnożeniu obu stron równania (1) przez prędkość oraz podzieleniu przez pole powierzchni filtru otrzymuje się:

$$\dot{c}(t) = \dot{c}_0 e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

gdzie:

$\dot{c}(t)$ – strumień kropeł w powietrzu opuszczającym filtr [$\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$]

Stała λ przyjmuje dla filtru 1 i 2 wartość równą, odpowiednio, $0,90 \text{ min}^{-1}$ i $0,81 \text{ min}^{-1}$. Oznacza to, że liczba (lub koncentracja) kropeł spada w czasie niecałych trzech minut od wyłączenia generatora dziesięciokrotnie. Dla filtru elektretowego wartość ta jest istotnie mniejsza i wynosi $0,41 \text{ min}^{-1}$, co związane jest ze znacznie wolniejszym spadkiem liczby porywanych kropeł. Dla filtru 3 wykonanie podobnych pomiarów było niemożliwe, gdyż już w trakcie trzeciej minuty w strumieniu gazu opuszczającym filtr krople nie były obserwowane.

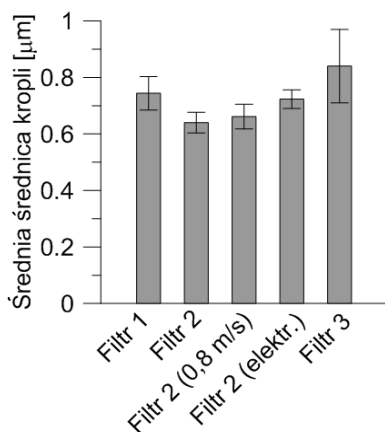
Średnica porywanych kropeł

Rys. 5 przedstawia średnią średnicę kropeł porywanych z badanych filtrów. Wartość ta została wyznaczona na podstawie pięciokrotnego powtórzenia eksperymentu.

Porównanie wartości średniej średnicy dla filtrów 1, 2 i 3 przy tej samej wartości prędkości (pierwsza, druga i piąta kolumna) prowadzi do wniosku, że najmniejszą średnią średnicą porywanych kropeł charakteryzuje się filtr 2, a największą – filtr 3. Należy zatem stwierdzić, że średnica ta jest rosnącą funkcją średniej średnicy włókien filtracyjnych. Zwraca również uwagę stosunkowo wysoka wartość odchylenia standardowego w przypadku filtra 3, w porównaniu z wartościami obliczonymi dla pozostałych filtrów. Świadczy ona o tym, że rozkłady wielkości kropeł w poszczególnych doświadczeniach przeprowadzonych z udziałem tego filtra różnią się dość istotnie, co wynika z ogólnie małej liczby kropeł obserwowanych w strumieniu gazu opuszczającym ten filtr.

Ponadto, można zauważyć, że zwiększenie prędkości gazu nośnego z wartości $0,2 \text{ m/s}$ do wartości $0,8 \text{ m/s}$ prowadzi do jedynie nieznacznego zwiększenia średniej średnicy porywanych kropeł. Znacznie większą średnicą porywanych kropeł charakteryzuje się filtr elektretowy. W tym przypadku średnica ta jest zbliżona do średnicy zaobserwowanej dla filtra 1, wynosi bowiem $0,72 \text{ }\mu\text{m}$ wobec $0,66 \text{ }\mu\text{m}$ dla filtra 2 i $0,74 \text{ }\mu\text{m}$ dla filtra 1.

Przeprowadzone doświadczenia wskazują, że średnia średnica kropeł porywanych z filtra nie istotnie zmienia się wraz z czasem, jaki upłynął od wyłączenia generatora. Obserwowane zmiany średniej liczbowej średnicy kropeł nie przekraczają wartości średniego odchylenia standardowego wyznaczonego dla poszczególnych pomiarów.



Rys. 5. Średnia średnica kropeł porywanych z badanych filtrów.

Wnioski

Z przeprowadzonych badań wynika, że zarówno całkowita liczba kropeł porywanych przez przepływający gaz z wkładu filtracyjnego jak i średnia średnica porywanych kropeł jest zależna od średniej

średnicy włókien. Liczba kropeł porywanych z filtra zmniejsza się wraz ze wzrostem średniej średnicy włókien filtracyjnych i dla filtra o średnicy większej niż $20 \text{ }\mu\text{m}$ (filtr 3) jest praktycznie pomijalnie mała. Ta tendencja pozwala rozważać warstwy filtracyjne o stosunkowo dużej wartości średniej średnicy włókien jako końcowe warstwy filtrów włókninowych. W takiej końcowej warstwie dochodzi do wychwytu kropeł porywanych z wcześniejszych warstw, natomiast praktycznie nie ma miejsca ich wtórne porywanie do strumienia przepływającego gazu.

Zaobserwowano także, że liczba kropeł porywanych przez przepływający gaz maleje w czasie. Zależność liczby kropeł porywanych (lub ich koncentracji w strumieniu powietrza opuszczającym filtr) może być z dobrą dokładnością opisana zależnością eksponencjalną, przy czym czas, po jakim krople przestają być obserwowane w powietrzu opuszczającym filtr jest dla zbadanych wkładów bardzo krótki i wynosi w każdym przypadku mniej, niż 10 minut. Na tej podstawie można uznać, że przepuszczanie czystego gazu (pozbawionego cząstek aerozolowych) przez przepracowany filtr nie może stanowić skutecznego sposobu jego regeneracji. Ponadto, wynik ten świadczy o tym, że ryzyko zanieczyszczenia gazu przepływającego przez przepracowany filtr kroplami cieczy na skutek ich wtórnego uwalniania należy ocenić jako niewielkie, zwłaszcza po upływie kilku minut od zakończenia procesu filtracji.

Średnia średnica porywanych kropeł również zależy od struktury filtra. Choć różnice pomiędzy badanymi filtrami nie są duże i wartości średniej średnicy kropeł porywanych z filtrów zawierają się w przedziale od $0,6$ do $1 \text{ }\mu\text{m}$, można dostrzec wyraźną tendencję, zgodnie z którą z filtrów o większej średnicy włókien porywane są krople o większej średnicy. Również większy jest średni rozmiar kropeł porywanych z filtra o włóknach obdarzonych ładunkiem, niż z filtra o włóknach nienaładowanych (przy tej samej strukturze filtra). Prędkość liniowa gazu wydaje się nie mieć istotnego wpływu na wartość tej średnicy – przy czterokrotnym wzroście prędkości gazu zaobserwowano niewielki wzrost średniej średnicy porywanych kropeł, mieszczący się w granicach błędów pomiarowych.

Przeprowadzone badania pozwalają także stwierdzić, że struktura powierzchni włókien filtracyjnych ma również wpływ na intensywność porywania zdeponowanych kropeł. Filtr o włóknach poddanych działaniu wyładowania elektrycznego w momencie ich zastygania charakteryzuje się znacznie mniejszą intensywnością porywania kropeł. To zagadnienie wymaga jednak dalszych badań.

LITERATURA

- Boundy M., Leith D., David H., Michael G., Edward, B.G., 2000. Performance of industrial mist collectors over time. *Appl. Occup. Env. Hyg.* **15** (12), 928–935. DOI: 10.1080/104732200750051166
- Dawar S., Chase, G.G., 2010. Correlations for transverse motion of liquid drops on fibers. *Sep. Purif. Technol.* **72**, 282–287. DOI: 10.1016/j.seppur.2010.02.018
- Frising T., Thomas D., Bemer D., Contal P., 2005. Clogging of fibrous filters by liquid aerosol particles: Experimental and phenomenological modeling study. *Chem. Eng. Sci.* **60**, 2751–2762. DOI: 10.1016/j.ces.2004.12.026
- Gac J.M., Gradoń L., 2013. Badanie nieustalanej filtracji aerozoli ciekłych na filtrach włóknistych. *Inż. Ap. Chem.* **52**, nr 4, 308–309
- Leith D., Raynor P.C., Boundy M.G., Cooper S.J., 1996. Performance of industrial equipment to collect coolant mist. *Am. Ind. Hygiene Assoc. J.* **57**, 1142–1148. DOI: 10.1080/15428119691014251
- Mullins B.J., Pfrang A., Braddock R.D., Schimmel T., Kasper G., 2007. Detachment of liquid droplets from fibres - Experimental and theoretical evaluation of detachment force due to interfacial tension effects. *J. Colloid Int. Sci.* **312**, 333–340. DOI: 10.1016/j.jcis.2007.03.051
- Ramos S., Tanguy A., 2006. Pinning-depinning of the contact line on nano-rough surfaces. *Eur. Phys. J. E* **19**, 433–440. DOI: 10.1140/epje/i2005-10056-0
- Schäffer E., Wong P., 1998. Dynamics of contact line pinning in capillary rise and fall. *Phys. Rev. Lett.* **80**, 3069–3072. DOI: 10.1103/PhysRevLett.80.3069