

mgr inż. PIOTR SOBIECH
 Centralny Instytut Ochrony Pracy
 – Państwowy Instytut Badawczy
 Kontakt: pisob@ciop.pl
 DOI: 10.5604/01.3001.0010.0438

Filtry koalescencyjne stosowane w filtracji aerozoli cieczy

Fot. LightFoto / Bigstockphoto



Wykorzystywane w przemyśle chemicznym i w pokrewnych gałęziach przemysłu substancje ciekłe mogą niekorzystnie wpływać na narażonych pracowników oraz na środowisko naturalne, dlatego też ich eliminacja z gazów odlotowych jest ważnym zagadnieniem z punktu widzenia bezpieczeństwa pracy oraz ochrony środowiska. Ważną rolę w procesie usuwania tych zanieczyszczeń odgrywają filtry koalescencyjne, tj. umożliwiające usuwanie fazy ciekłej poprzez łączenie się kropelek i ich ociekanie. Na całym świecie prowadzone są badania nad nowymi strukturami filtracyjnymi i zwiększaniem ich możliwości aplikacyjnych.

W artykule przeglądowym przedstawiono informacje dotyczące zasady działania filtrów koalescencyjnych (przede wszystkim w odniesieniu do filtracji aerozoli), czynników wpływających na ich skuteczność oraz obszarów ich zastosowań.

Słowa kluczowe: filtry koalescencyjne, koalescery, aerozole cieczy

Coalescing filters used in filtration of liquid aerosols

Liquids used in the chemical industry and in related industries may be a threat to exposed workers and they may have an adverse environmental effect; therefore, their elimination from exhaust gases is an important challenge from the point of view of work safety and environment protection. Coalescing filters, which make it possible to remove the liquid phase by combining and draining droplets, play an important role in removing those impurities. Researchers around the world are working on new structures and on increasing their possible applications. This review paper presents information on the operating principles of coalescing filters (especially in aerosol filtration), factors influencing their efficiency and application areas.

Keywords: coalescing filters, coalescers, liquid aerosols

Wstęp

Filtry koalescencyjne (zwane też „koalescerami”) mają szeroki zakres zastosowań i cechują się długim czasem pracy. Efektem tego jest ich rosnąca popularność. Wykorzystywane są zarówno do filtracji aerozoli ciekłych, jak i do rozdzielania układów dyspersyjnych typu ciecz-ciecz. Znalazły zastosowanie w procesach oczyszczania gazu ziemnego, sprężonego powietrza oraz innych substancji chemicznych, takich jak amoniak. Stosuje się je również do oczyszczania paliw, odzysku cennych składników z mieszanin czy też ochrony złóż katalitycznych. Montowane są w instalacjach przemysłowych jako elementy zabezpieczające przed awarią zaworów, turbin gazowych, sprężarek powietrza i innych maszyn. Wykorzystywane są głównie w instalacjach przemysłu chemicznego, petrochemicznego, górnictwie [1]. Ich stosowanie ma bezpośredni wpływ na poprawę bezpieczeństwa pracy ludzi obsługujących instalacje, a także minimalizuje zagrożenie dla środowiska naturalnego [1-3].

Obecnie na świecie prowadzone są prace mające na celu zaprojektowanie nowych struktur koalescencyjnych do ściśle określonych zastosowań. W artykule przybliżono zasadę działania filtrów koalescencyjnych podczas filtracji aerozoli zawierających cząstki ciekłe lub mieszaninę cząstek ciekłych i stałych oraz parametry wpływające na ich funkcjonowanie.

Filtry koalescencyjne – zasada działania

Rozdzielenie układu dyspersyjnego ciecz-ciecz, w którym krople fazy rozproszonej mają rozmiary

nie mniejsze od 50 μm nie jest praktycznie możliwe na podstawie technik bazujących na różnicy gęstości obu faz i sile grawitacji. Zastosowanie urządzeń, których działanie opiera się na wykorzystaniu siły odśrodkowej (np. hydrocyklony) umożliwia natomiast skuteczne usuwanie kropelek większych niż 5-10 μm . Wraz ze zmniejszaniem się wielkości kropelek skuteczność procesu maleje, a krople o wielkości poniżej 1 μm zasadniczo nie są już usuwane. W przypadku oczyszczania aerozoli ciekłych usunięcie cząstek cieczy o wielkościach mikronowych i submikronowych możliwe jest za pomocą filtrów włóknistych. Separacja tak małych kropelek za pomocą cyklonów jest praktycznie niemożliwa [2,5].

W opisanych przypadkach, do skutecznej filtracji aerozolu czy rozdzielania cieczy wykorzystywane jest zjawisko koalescencji [2,5]. Polega ono na łączeniu małych kropelek w większe, które są łatwiejsze do usunięcia. Istnieją różne metody wywołania zjawiska koalescencji, np. elektrostatyczna, metoda zamrażania i topnienia (*freezing-thawing*). Najbardziej rozpowszechniona jest jednak metoda koalescencji w przepływie przez różnorodne struktury porowate. Podczas filtracji aerozoli ciekłych łączenie się małych kropelek na strukturze filtracyjnej umożliwia kropłom, po osiągnięciu dostatecznie dużych rozmiarów, ich ocieknięcie z filtru. Gdy filtry wykorzystywane są do rozdzielania cieczy, zjawisko koalescencji powoduje zmniejszenie stopnia zdyspersjonowania fazy rozproszonej [4,5].

Koalescery produkowane są najczęściej przy użyciu odpowiednio preparowanych włókien

szklanych, ceramicznych, metalowych oraz tworzyw sztucznych. Mogą być wytwarzane w postaci pakietów cylindrycznych lub płaskich, umieszczanych w osłonie cienkiej siatki drucianej [4]. W zależności od potrzeb procesu mogą być wykonane z włókien jednego rodzaju lub kombinacji włókien z różnych tworzyw o odmiennych parametrach i właściwościach [6].

Obecnie dostępne filtry są zwykle wykonywane w postaci wielowarstwowej [7]. Ilustrację działania wielowarstwowego filtru koalescencyjnego stosowanego do filtracji aerozoli ciekłych zawierających również zanieczyszczenia w postaci cząstek stałych przedstawiono na rysunku.

Parametry decydujące o skuteczności filtrów koalescencyjnych

Tak, jak w przypadku innych filtrów, projektanci koalescerów dążą do tego, by charakteryzowały się one jak największą skutecznością usuwania, zarówno w odniesieniu do cząstek ciekłych, jak i stałych, przy jednoczesnym zapewnieniu maksymalnie niskich oporów przepływu (spadków ciśnienia).

Filtry koalescencyjne nie są filtrami uniwersalnymi, dlatego w odniesieniu do każdego procesu technologicznego powinny być dobrane z uwzględnieniem rodzaju i właściwości zanieczyszczeń (właściwości cieczy, wielkość kropelek, stężenia, obecność zanieczyszczeń stałych), które mają być filtrowane.

Inaczej przebiega proces, gdy w strumieniu oczyszczonego gazu znajdują się tylko cząstki stałe, a inaczej, gdy znajdują się w nim cząstki ciekłe lub ich mieszanina. Podczas filtracji cząstek stałych, w większości przypadków następuje ciągły wzrost sprawności filtru oraz oporów przepływu. Jest to efekt zapelniania pustych obszarów struktury filtracyjnej cząstkami deponowanymi na włóknach i na innych cząstkach już zaczepionych (tworzą się wtedy tzw. agregaty). Zjawisko to nie występuje podczas filtracji cząstek ciekłych. W tym przypadku ciecz pokrywa włókna cienką warstwą. Wraz ze wzrostem masy deponowanej cieczy zaczyna ona tworzyć odrębne krople. Kiedy siła grawitacji jest wystarczająco duża, by spowodować ruch kropli wzdłuż włókna, rozpoczyna się proces ociekania cieczy. Dochodzi również do tworzenia się mostków cieczowych między włóknami, co powoduje znaczny wzrost zarówno sprawności filtracji, jak i oporów przepływu. Towarzyszy temu wzrost intensywności zjawiska resuspensji, tj. odrywania się kropli od włókien i wtórnego przechodzenia ich do strumienia gazu. W pewnym momencie procesu dochodzi do ustalenia się równowagi dynamicznej pomiędzy kroplami deponowanymi, ociekającymi z włókien oraz ulegającymi resuspensji [7].

Jeszcze inny charakter ma proces filtracji aerozoli zawierających zanieczyszczenia mieszane. Wynika to z faktu innych interakcji między cząstkami stałymi w przypadku obecności lub nieobecności cieczy. Warstwa cieczy na filtrach może blokować tworzenie się aglomeratów cząstek [8].

Parametry użytkowe filtrów (skuteczność, opory przepływu) uzależnione są w dużej mierze od właściwości struktury filtracyjnej. Znaczenie mają przede wszystkim: rozkład średnic włókien, chropowatość ich powierzchni, zwilżalność, energia powierzchniowa, średnica porów, grubość struktury. W przypadku filtracji kropli cieczy bardzo duże znaczenie ma ułożenie warstw filtrujących. Włókna o różnej średnicy charakteryzują się różną skutecznością filtracji, ale jednocześnie mają różną podatność na resuspensję kropli. Na przykład warstwa o najmniejszych średnicach włókien charakteryzuje się największą sprawnością zatrzymywania kropli, a jednocześnie są one z niej najłatwiej uwalniane do gazu w wyniku resuspensji. Dlatego też, za warstwą o najmniejszej średnicy włókien powinna znajdować się warstwa filtracyjna, wykonana z włókien o średnicach zabezpieczających filtr przed wtórnym wprowadzaniem cieczy do strumienia gazu, a jednocześnie powinna ona być poprzedzona taką warstwą filtracyjną, która zabezpieczy ją przed szybkim zatykaniem cząstkami stałymi, co mogłoby skutkować szybkim wzrostem oporów przepływu [2,7,9,10].

Jednym z ważnych parametrów mających znaczenie w procesie koalescencji, mogącym służyć do opisu ilościowego właściwości powierzchniowego materiału filtracyjnego, jest kąt zwilżania. To kąt, który tworzy styczna do powierzchni kropli osadzonej na powierzchni ciała stałego, w punkcie styku fazy stałej, ciekłej i gazowej. Bardzo dobre zwilżanie materiału przez ciecz odpowiada kątowi zwilżania 0° , brak zwilżania powierzchni odpowiada natomiast kątowi większym niż 90° . Kąt zwilżania może posłużyć np. do oceny, czy dana powierzchnia jest hydrofilowa lub hydrofobowa [5]. Filtry koalescencyjne, które przeznaczone są do usuwania kropli wody, powinny zawierać warstwę hydrofobową, natomiast te przeznaczone do usuwania kropli oleju – warstwę oleofobową.

Wytwarzane są również filtry, będące mieszaniną włókien wykazujących zarówno właściwości hydrofobowe i hydrofilowe (lub odpowiednie przeciwstawne właściwości do innego rodzaju cieczy niż woda). Takie mieszane, odpowiednio zaprojektowane układy wykazują zwiększoną sprawność filtracji przy jednoczesnym obniżeniu oporów przepływu w stosunku do struktur tylko „fobowych” [11].

Podczas filtracji aerozoli ciekłych ważna jest skuteczność ociekania cieczy z włókien filtru koalescencyjnego. Z praktycznego punktu widzenia najbardziej korzystne jest jak najszybsze usuwanie cieczy z włókniny. Szybkość ta uzależniona jest od średnicy włókien (im większa średnica, tym szybszy proces), kąta zwilżania przez ciecz oraz struktury powierzchniowej włókna. Z tego powodu prowadzone są prace (również teoretyczne) nad takimi modyfikacjami powierzchni włókien filtrów, aby usprawnić proces ociekania cieczy [11].

Jeśli w strumieniu aerozolu znajdują się cząstki stałe oraz ciekłe należy stosować filtry przeznaczone do usuwania obydwu rodzajów zanieczyszczeń. Na rynku dostępne są filtry o różnej skuteczności, w tym takie, które umożliwiają usuwanie cząstek o wielkości $0,01 \mu\text{m}$ z efektywnością przekraczającą 99,9% (należy tu zaznaczyć, że w przypadku filtrów koalescencyjnych nie ma podziału na klasy, tak jak ma to miejsce np. dla filtrów wentylacyjnych). Deponowanie się cząstek stałych powoduje wzrost oporów przepływu przez filtr, dlatego też w przypadku obecności dużych cząstek w oczyszczanym strumieniu (np. powyżej ok. $5 \mu\text{m}$) należy zastosować filtrację wstępną cząstek stałych [1].

Istotny wpływ na efektywność procesu filtracji ma prędkość przepływu aerozolu przez filtr. Wzrost prędkości aerozolu przyczynić się może do intensyfikacji zjawiska resuspensji kropli [7].

Do porównywania różnych filtrów lub pracy tego samego filtru w odmiennych warunkach prowadzenia procesu przydatny jest wzór określający współczynnik jakości filtru (Q_F) [12]:

$$Q_F = \frac{\ln\left(\frac{1}{P}\right)}{\Delta p}$$

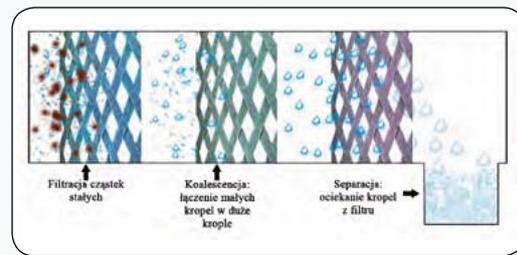
gdzie: P – penetracja cząstek przez filtr¹, Δp – spadek ciśnienia na filtrze.

Z definicji współczynnika jakości filtru wynika, że filtr jest tym lepszy, im mniejsza jest penetracja cząstek (wyższa sprawność) przy jak najniższym spadku ciśnienia. Filtry można również charakteryzować za pomocą wskaźnika użyteczności filtru (FUF), który służy do określenia rzeczywistych kosztów inwestycyjnych i operacyjnych [12].

Podsumowanie

Filtry koalescencyjne są grupą filtrów o szerokim spektrum możliwości aplikacyjnych. Sprawia to, że na świecie prowadzone są prace nad modyfikacją struktur filtracyjnych, między innymi pod kątem składu materiałowego (ilościowego i jakościowego), modyfikacji powierzchni włókien czy optymalnego doboru struktury warstwowej.

¹ Penetracja cząstek przez filtr obliczana jest jako stosunek stężenia zanieczyszczeń za filtrem do stężenia zanieczyszczeń przed filtrem. Korzystając z pojęcia sprawności (η) penetracja może być obliczona ze wzoru $P = 1 - \eta$.



Rys. Schemat ideowy działania filtra koalescencyjnego podczas filtracji aerozoli zawierających cząstki ciekłe oraz stałe

Fig. Schematic diagram of the operating principle of a coalescing filter in filtration of aerosols containing liquid and solid particles

W Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym podjęto tematykę dotyczącą filtracji koalescencyjnej. W ramach działalności statutowej prowadzone są badania nad możliwością wykorzystania filtrów koalescencyjnych do filtracji nanoaerozoli zawierających cząstki stałe. Prace dotyczą takiej modyfikacji aerozolu, aby uzyskać jak największe skuteczności filtracji cząstek stałych przy zminimalizowaniu ich wpływu na opory przepływu, dla wybranych komercyjnie dostępnych struktur filtracyjnych.

Wyniki z przeprowadzonych badań opublikujemy w „Bezpieczeństwie Pracy”.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Sutherland K. *Filters and filtration handbook, 5th edition*. Elsevier Science, Hungary 2008
- [2] Gac J., Gradoń L. *Badanie nieustalanej filtracji aerozoli ciekłych na filtrach włóknistych*. „Inżynieria i Aparatura Chemiczna” 2013,52,4:308-309
- [3] Shin C., Chase G. G. *Separation of liquid drops from air by glass fiber filters augmented with polystyrene nanofibers*. „Journal of Dispersion Science and Technology” 2006,27,1:5-9
- [4] Warych J. *Aparatura chemiczna i procesowa*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1996
- [5] Krasiński A. *Rozdzielanie dyspersji ciecz-ciecz w aparatach koalescencyjnych*. „Inżynieria i Aparatura Chemiczna” 2010,49,3:59-60
- [6] Purchas D.B., Sutherland K. *Handbook of filter media*. Elsevier Science & Technology Books, Great Britain 2002
- [7] Gac J. *Zjawiska transportu kropli cieczy w strukturach włókninowych. Modelowanie procesów dla projektowania filtrów koalescencyjnych*. Oficyna Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2016
- [8] Gac J., Jackiewicz A., Werner Ł., Jakubiak Sz. *Consecutive filtration of solid particles and droplets in fibrous filters*. „Separation and Purification Technology” 2016,170:234-240
- [9] Agarwal S., Armin V., Stegmaier T., Planck H., Agarwal A. *Role of surface wettability and roughness in emulsion separation*. „Separation and Purification Technology” 2013,107:19-25
- [10] Hajra M.G., Mehta K., Chase G.G. *Effects of humidity, temperature, and nanofibers on drop coalescence in glass fiber media*. „Separation and Purification Technology” 2003,30,1:79-88
- [11] Kulkarni P.S., Shagufa U., Patel S.U. Chase G.G. *Layered hydrophilic/hydrophobic fiber media for water-in-oil coalescence*. „Separation and Purification Technology” 2012, 85:157-164
- [12] Jankowski T. *Charakterystyki dynamiczne procesu penetracji cząstek pyłu i mgły olejowej w układzie włókninowym*. „Inżynieria i Aparatura Chemiczna” 2013, 52, 4:321-322

Publikacja opracowana w ramach realizacji zadania badawczego z działalności statutowej, finansowanej ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.