

Filtracja aerozoli nanocząstek za pomocą materiałów włókninowych – mechanizmy zatrzymywania i wyniki doświadczalne¹

Nanoparticle aerosols filtration using nonwoven filter media – separation mechanisms and experimental results

dr inż. SZYMON JAKUBIAK
e-mail: szymon.jakubiak@ciop.pl
Centralny Instytut Ochrony Pracy –
Państwowy Instytut Badawczy
00-701 Warszawa
ul. Czerniakowska 16

Słowa kluczowe: nanoaerozole, filtracja nanocząstek, filtry włókninowe, mechanizmy filtracji.

Keywords: nanoaerosols, nanoparticles filtration, nonwoven filters, filtration mechanisms.

Streszczenie

W artykule przedstawiono mechanizmy zatrzymywania nanocząstek na materiałach włókninowych podczas filtracji wgłębnej aerozoli oraz wpływ takich parametrów, jak: wielkość cząstek, prędkość liniowa i temperatura gazu, średnica i gęstość upakowania włókien oraz ładunek powierzchniowy

cząstek i włókien na skuteczność zatrzymywania cząstek w świetle klasycznej teorii filtracji. Na podstawie analizy piśmiennictwa przedstawiono porównanie wyników skuteczności uzyskanych na podstawie klasycznej teorii z wynikami eksperymentalnymi.

Summary

This paper presents the mechanisms of nanoparticles retention on nonwoven filter media during depth aerosol filtration and the influence of parameters such as particle size, linear velocity and gas temperature, fibre diameter and packing density and surface charge of particles and fibres

on retention efficiency of particles according to the classic filtration theory. Based on a review of literature sources, a comparison of filtration efficiency results obtained on the basis of classic filtration theory and experimental results is presented.

¹ Publikacja opracowana na podstawie wyników IV etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2017-2019 w zakresie zadań służb państwowych przez Ministerstwo Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej.

Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

WPROWADZENIE

Znajomość mechanizmów zatrzymywania cząstek aerozoli o rozmiarach nanometrycznych na filtrach włókninowych oraz wpływu parametrów procesowych na skuteczność filtracji wgłębnej jest niezbędna do właściwego projektowania systemów ochrony zbiorowej na stanowiskach pracy. Wiedza ta umożliwia dobór odpowiednich rozwiązań technicznych do zapewnienia bezpiecznych warunków pracy oraz optymalizację nakładów związanych z kosztami inwestycyjnymi oraz operacyjnymi. Celem niniejszej pracy jest zaznajomienie osób niezwiązanych zawodowo z problematyką filtracji z podstawowymi zjawiskami zachodzącymi podczas zatrzymywania nanocząstek na filtrach włókninowych oraz możliwością wpływania na przebieg tego procesu za pomocą takich parametrów operacyjnych, jak: prędkość przepływu gazu, rozkład wielkości włókien czy porowatość materiału filtracyjnego.

Do emisji nanoobjektów na stanowiskach pracy może dochodzić zarówno podczas procesów, w których są one stosowane jako substraty lub otrzymywane jako produkty (np. w trakcie: wytwarzania materiałów kompozytowych, produkcji farb i powłok lakierniczych, w przemyśle farmaceutycznym i kosmetycznym), jak i gdy powstają one spontanicznie jako produkty uboczne (np. podczas procesów wysokotemperaturowych takich jak spalanie paliw czy spawanie). Należy przy tym pamiętać, że nanocząstki, mimo że stanowią niewielki udział w stężeniu masowym pyłów polidispersyjnych, mogą stanowić poważne zagrożenie dla zdrowia pracowników, ponieważ w przypadku ultradrobnych cząstek nawet małe stężenie masowe pyłu przekłada się na duże stężenie liczbowe.

KLASYCZNA TEORIA FILTRACJI

Filtracja aerozoli za pomocą materiałów włókninowych jest procesem złożonym, dlatego też wpływ poszczególnych parametrów procesowych na przebieg procesu rozpatruje się zwykle w uproszczonym przypadku zatrzymywania cząstki przez pojedyncze włókno. Zakłada się przy tym, że filtr składa się z włókien o takich samych średnicach, mających jednakową sprawność zatrzymywania, a mechanizmami są: dyfuzja molekularna, bezpośrednie zaczepienie, działanie sił bezwładności, opadanie w wyniku działania siły grawitacyjnej lub oddziaływania elektrostatyczne. Podejście takie jest określane mianem klasycznej teorii filtracji (Podgórski, Bałazy 2004), a skuteczność filtracji dla danego materiału filtracyjnego wyraża się wzorem (Podgórski 2010):

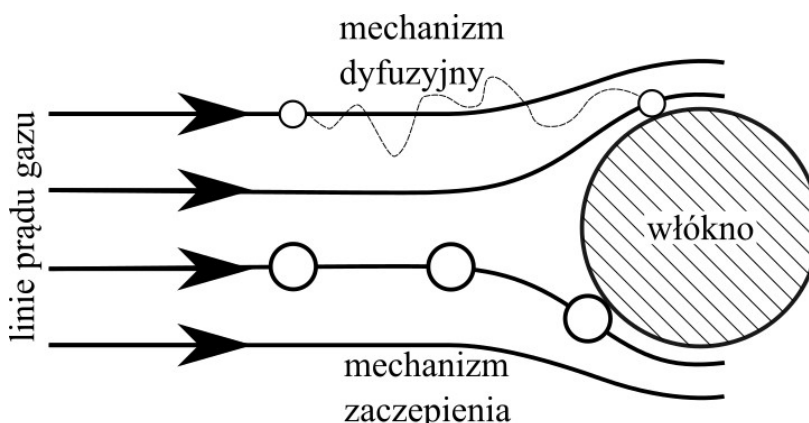
$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-4 \cdot \alpha \cdot E \cdot L}{\pi \cdot d_f (1 - \alpha)}\right) \quad (1)$$

gdzie:

- α – gęstość upakowania materiału filtracyjnego,
- E – suma skuteczności zatrzymywania cząstek na pojedynczym włóknie za pomocą poszczególnych mechanizmów,

- L – grubość filtra,
- d_f – średnica włókien.

Nanocząstki, czyli cząstki o wielkości mniejszej niż 100 nm, są zatrzymywane przede wszystkim za pomocą dwóch mechanizmów – dyfuzyjnego oraz bezpośredniego zaczepienia (Steffens, Coury 2007a). Bardzo małe cząstki zmieniają swój kierunek ruchu w sposób przypadkowy, w wyniku zderzania się z cząsteczkami gazu, przez co rośnie prawdopodobieństwo ich kontaktu z włóknem podczas ruchu wzdłuż linii prądu gazu, z której nie mogłyby być zatrzymane za pomocą bezpośredniego zaczepienia. Zjawisko to jest nazywane dyfuzyjnym mechanizmem zatrzymywania cząstek. Jeżeli cząstki, poruszając się wzdłuż linii prądu gazu, znajdują się w odległości mniejszej niż ich promień od powierzchni włókna, zostaną one na niej zatrzymane, a mechanizm ten nazywa się bezpośrednim zaczepieniem. Oba wspomniane mechanizmy zatrzymywania cząstek przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie zatrzymywania cząstek aerozolu na włóknie za pomocą mechanizmów – dyfuzyjnego i bezpośredniego zaczepienia

Na skuteczność zatrzymywania cząstek mogą również wpływać siły elektrostatyczne występujące zarówno między cząstkami, jak i między cząstkami a włóknami filtra. Jeżeli między cząstkami aerozolu a włóknomi istnieje różnica potencjału elektrostatycznego, mogą być one przyciągane lub odpychane od włókna w wyniku działania sił kulombowskich. W przypadku gdy tylko cząstki lub tylko włókna mają ładunek elektrostatyczny, możliwe jest również spontaniczne indukowanie

ładunku o przeciwnym znaku na powierzchni odpowiednio neutralnych włókien lub neutralnych cząstek. W przypadku gdy włókna filtra są wykonane z materiału dielektrycznego, możliwe jest umieszczenie go w zewnętrznym polu elektrycznym, dzięki czemu powstaje siła dielektroforetyczna, przyciągająca cząstki aerozolu do włókna.

MECHANIZM DYFUZYJNY

Podstawowym parametrem, opisującym skuteczność zatrzymywania cząstek w wyniku działania mechanizmu dyfuzyjnego, jest liczba kryterialna Pecleta, określająca stosunek szybkości procesów transportu w wyniku konwekcji i dyfuzji:

$$Pe = \frac{U_g \cdot d_f}{D} \quad (2)$$

gdzie:

- U_g – prędkość gazu,
- d_f – średnica włókna,
- D – współczynnik dyfuzji cząstek aerozolu w gazie (zależny od wielkości cząstek).

Ponieważ współczynnik dyfuzji znajduje się w mianowniku wzoru, skuteczność zatrzymywania cząstek aerozolu za pomocą mechanizmu dyfuzyjnego będzie spadała wraz ze wzrostem wartości liczby Pecleta (przy stałej prędkości przepływu gazu i dla danego włókna), przy czym w przypadku

filtracji nanocząstek, dąży ona do zera. Współczynnik dyfuzji wyznacza się na podstawie wzoru Stokesa-Einsteina (Hinds 1999):

$$D = \frac{k_B \cdot T \cdot C_C}{3 \cdot \pi \cdot \mu_g \cdot d_p} \quad (3)$$

gdzie:

- k_B – stała Boltzmanna ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K),
- T – temperatura (w skali Kelvina),
- C_C – współczynnik poprawkowy Cunninghama na poślizg,
- μ_g – lepkość dynamiczna gazu,
- d_p – średnica cząstki.

Dla cząstek mniejszych niż 100 nm współczynnik poprawkowy na poślizg można wyznaczyć na podstawie wzoru sformułowanego przez Allena i Raabe (Podgórski, Balazy 2004):

$$C_C = 1 + Kn_p \left(1,142 + 0,558 \cdot \exp\left(\frac{-0,999}{Kn_p}\right) \right) \quad (4)$$

$$Kn_p = \frac{2 \cdot \lambda}{d_p} \quad (5)$$

gdzie:

- Kn_p – liczba kryterialna Knudsen, a
- λ – średnia droga swobodna cząsteczek gazu.

Z równania (4) wynika, że współczynnik Cunninghama rośnie wraz ze zmniejszeniem wielkości cząstek oraz zwiększeniem średniej drogi swobodnej, która z kolei jest zależna od ciśnienia gazu (rośnie wraz z jego spadkiem) oraz temperatury (rośnie wraz z jej wzrostem).

W źródłach literaturowych można znaleźć półempiryczne wzory pozwalające wyznaczyć skuteczność zatrzymywania cząstek na materiałach włókninowych za pomocą poszczególnych mechanizmów filtracji (Steffens, Coury 2007a; Brown 1993; Wang i in. 2007).

Przykładowe równanie dla mechanizmu dyfuzyjnego:

$$E_D = 1,6 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{K_u} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot Pe^{-\frac{2}{3}} \cdot C_D \quad (6)$$

gdzie:

- ε – porowatość materiału filtracyjnego,
- K_u – współczynnik hydrodynamiczny Kuwabary,
- C_D – współczynnik poprawkowy na przepływ z poślizgiem.

Współczynnik hydrodynamiczny Kubawary obliczamy na podstawie wzoru:

$$K_u = \frac{-\ln(1-\varepsilon)}{2} - \frac{3}{4} + (1-\varepsilon) - \frac{(1-\varepsilon)^2}{4} \quad (7)$$

natomiast współczynnik poprawkowy na przepływ z poślizgiem możemy określić na podstawie równania:

$$C_D = 1 + 0,388 \cdot Kn_f \left(\frac{\varepsilon \cdot Pe}{K_u} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

gdzie:

- Kn_f – liczba kryterialna Knudsen zdefiniowana analogicznie jak we wzorze (5), ale wyrażona poprzez średnią drogę swobodną oraz średnicę włókna.

Zgodnie z zależnościami (6) – (8), na skuteczność zatrzymywania nanocząstek na filtrach włókninowych w wyniku działania mechanizmu dyfuzyjnego można wpływać poprzez zmianę prędkości przepływu gazu, jego temperatury i ciśnienia oraz strukturę zastosowanego materiału filtracyjnego. Wpływ prędkości przepływu gazu wynika ze wzoru (2) – liczba Pecleta rośnie liniowo wraz ze wzrostem prędkości przepływu, przez co skuteczność zatrzymywania cząstek maleje proporcjonalnie do liczby Pecleta w potęgę $-1/3$, zgodnie z zależnościami (6) i (8). Ponieważ współczynnik dyfuzji D , znajdujący się w liczniku wzoru (2), rośnie wraz ze spadkiem wielkości cząstek, wpływ prędkości przepływu gazu jest szczególnie istotny w przypadku filtracji najmniejszych cząstek. Z tego powodu korzystne jest prowadzenie procesu filtracji nanocząstek przy możliwie małej prędkości przepływu, co w praktyce oznacza dążenie do zwiększania powierzchni czołowej materiału filtracyjnego (przy założeniu braku możliwości wpływania na natężenie strumienia oczyszczanego gazu). Efekt ten został również potwierdzony na drodze doświadczalnej (Balazy, Podgórski 2004; Steffens, Coury 2007a). Ponadto redukcja prędkości przepływu będzie skutkowała mniejszym spadkiem ciśnienia na materiale filtracyjnym.

Temperatura aerozolu wpływa na wartość współczynnika dyfuzji D zdefiniowanego wzorem (3). Należy pamiętać, że oprócz jawnie występującej w liczniku wyrażenia (3) temperatury, występują tu również dwie wielkości, które od niej zależą – lepkość dynamiczna gazu μ_g oraz współczynnik poprawkowy na poślizg Cunninghama C_C , którego wartość zgodnie z wzorami (4) oraz (5) zależy od średniej drogi swobodnej cząsteczek gazu λ (Hinds 1999). Uogólniając wpływ poszczególnych składowych, można przyjąć, że zgodnie z klasyczną teorią filtracji, współczynnik dyfuzji D zmienia się proporcjonalnie do temperatury aerozolu T w potęgę $3/2$ (Shin i in. 2008). Ponieważ liczba kryterialna Pecleta zmienia się odwrotnie do zmiany współczynnika dyfuzji, oznacza to, że wzrost temperatury gazu będzie przekładał się na wzrost skuteczności zatrzymywania nanocząstek na skutek działania mechanizmu dyfuzyjnego, co wynika również ze wzoru (6).

Wpływ średnic włókien materiału filtracyjnego na skuteczność procesu filtracji, podobnie jak w przypadku prędkości przepływu gazu, wynika ze

wzorów (2) oraz (6) – większą skutecznością będą charakteryzowały się włókniny o mniejszej średnicy włókien. Należy przy tym pamiętać, że obecność włókien submikrometrycznych powoduje wzrost oporów przepływu gazu przez materiał filtracyjny (Podgórski i in. 2006). Rozwiązaniem może być stosowanie materiałów o polidispersyjnym rozkładzie wielkości włókien, gdzie włókna o średnicach submikrometrycznych są odpowiedzialne za wysoką skuteczność zatrzymywania

cząstek, a włókna mikrometryczne pozwalają wyrównać linie prądu gazu w strukturze filtra i ograniczyć spadek ciśnienia (Podgórski i in. 2006; Steffens, Coury 2007b). Korzystne jest również stosowanie materiałów filtracyjnych o dużym rozwinięciu powierzchni włókien (Jakubiak i in. 2016). Oczywiście wydaje się też, że skuteczność zatrzymywania cząstek maleje wraz ze wzrostem porowatości materiału filtracyjnego, co wynika ze wzorów (6) – (8).

MECHANIZM BEZPOŚREDNIEGO ZACZEPIENIA

Przyjmuje się, że mechanizm bezpośredniego zaczepienia jest istotny głównie dla cząstek o średnicy większej niż 100 nm, ale ma on również pewien wpływ na skuteczność filtracji nanocząstek (Podgórski i in. 2004; Hinds 1999). Półempiryczne równanie opisujące skuteczność zatrzymywania nanocząstek za pomocą materiału włókninowego (Steffens, Coury 2007a):

$$E_z = 0,6 \frac{\varepsilon \cdot R^2}{K_u \cdot (1 + R)} \cdot C_z \quad (9)$$

$$C_z = 1 + \frac{1,996 \cdot Kn_f}{R} \quad (10)$$

gdzie:

R – stosunek średnicy cząstki do średnicy włókna,

C_z – współczynnik poprawkowy na przepływ z poślizgiem.

Parametr R , zwany parametrem zaczepienia, jest głównym wskaźnikiem skuteczności zatrzymywania cząstek w wyniku działania tego mechanizmu (Hinds 1999). Skuteczność zatrzymywania jest więc odwrotnie proporcjonalna do średnicy włókien, a jej znaczenie rośnie wraz ze wzrostem wielkości cząstek. Co ciekawe, w odróżnieniu od mechanizmu dyfuzyjnego, prędkość przepływu aerozolu nie wpływa na skuteczność filtracji. Również wpływ temperatury aerozolu jest niewielki i związany ze zmianą średniej drogi swobodnej cząsteczek gazu występującej w definicji liczby Knudsen.

MECHANIZM ELEKTROSTATYCZNY

Oprócz wspomnianych wcześniej mechanizmów filtracji w wyniku dyfuzji oraz bezpośredniego zaczepienia, nanocząstki mogą być również zatrzymywane na włóknach w wyniku oddziaływania sił elektrostatycznych. Pochodzenie ładunku powierzchniowego występującego na cząstkach aerozolu i włóknach może być różnorakie, od powstającego spontanicznie w wyniku zderzeń cząstek między sobą i ściankami przewodów lub wzajemnego tarcia włókien, do indukowanego celowo poprzez wytworzenie pola elektrycznego. Udział tego mechanizmu w łącznej skuteczności filtracji może

być znaczący, ale jednocześnie jest on trudny do oszacowania ze względu na mnogość parametrów i zjawisk wpływających na wartość ładunku i jego rozłożenie na powierzchni cząstek i włókien. Można natomiast przyjąć, że zarówno zwiększenie ładunku cząstek oraz włókien, jak i zmniejszenie prędkości przepływu aerozolu powoduje wzrost skuteczności zatrzymywania (Hinds 1999).

Przy zastosowaniu mechanizmu elektrostatycznego jest możliwe prowadzenie procesu filtracji aerozoli z dużą skutecznością, przy jednoczesnym zachowaniu niskich oporów przepływu.

Należy przy tym pamiętać, że w specyficznych warunkach może dojść do niepożądanego spadku skuteczności filtracji związanego np. z pojawieniem się w strumieniu aerozolu wilgoci lub par rozpuszczalników organicznych, które mogą tworzyć na cząstkach i włóknach warstwę ekranującą ładunek powierzchniowy (Hinds 1999; Brochocka i in. 2013). W podobny sposób mogą działać cząstki zdeponowane na włóknach. Dlatego

nie powinno się projektować procesów filtracyjnych, w których mechanizm elektrostatyczny jest głównym mechanizmem zatrzymywania, szczególnie w przypadku filtracji aerozoli cząstek szkodliwych dla zdrowia.

WPLYW WILGOTNOŚCI POWIETRZA

Oprócz opisanych wcześniej parametrów procesowych należy również wspomnieć o możliwości wpływu na proces filtracji nanocząstek na materiałach włókninowych poprzez zmianę wilgotności powietrza. W tym przypadku nie jest jednak możliwe podanie prostego uogólnienia, jaki będzie wpływ zmiany wilgotności na przebieg procesu. Zależy to zarówno od właściwości filtrowanych nanoobjektów (takich jak: kształt, rozwinięcie powierzchni, powinowactwo do wody), jak i rodzaju użytego materiału filtracyjnego. Według Givhechi i Tan (2015) wyższa wilgotność powietrza powoduje spadek prawdopodobieństwa odbicia się cząstki od włókna w momencie kontaktu dzięki działaniu sił kapilarnych, co może przyczynić się do wzrostu skuteczności zatrzymywania. Można też jednak wyobrazić sobie sytuację, gdy na powierzchni higroskopijnych nanocząstek kondensuje warstewka cieczy sprzyjająca tworzeniu się

aglomeratów, co przekłada się na spadek skuteczności zatrzymywania cząstek w wyniku działania mechanizmu dyfuzyjnego. W skrajnych przypadkach utworzone aglomeraty mogą mieć rozmiary submikrometryczne lub mikrometryczne, czego skutkiem byłaby zmiana skuteczności zatrzymywania w wyniku działania opisanych wcześniej mechanizmów charakterystycznych dla nanocząstek oraz konieczność uwzględnienia dwóch dodatkowych mechanizmów będących następstwem działania siły bezwładności oraz opadania w wyniku działania siły grawitacyjnej. Duża wilgotność powietrza może również powodować ekranowanie ładunku powierzchniowego cząstek aerozolu oraz włókien, co będzie skutkowało spadkiem skuteczności filtracji w wyniku działania mechanizmu elektrostatycznego.

PORÓWNANIE WYNIKÓW TEORETYCZNYCH I EKSPERYMENTALNYCH

Rzeczywista skuteczność zatrzymywania nanocząstek za pomocą materiałów włókninowych zmierzona w wyniku badań doświadczalnych może znacząco różnić od tej wyznaczonej na podstawie zależności teoretycznych lub wzorów półempirycznych. Według Balazy i in. (2004) rzeczywista skuteczność zatrzymywania nanocząstek jest niższa niż ta wynikająca z klasycznej teorii filtracji, co prawdopodobnie wynika z występowania zjawiska termicznego odbicia cząstek o średnicy mniejszej niż 20 nm od powierzchni włókien oraz resuspensji w wyniku bombardowania cząsteczkami gazu cząstek uprzednio zdeponowanych na włóknach. Na podstawie analizy otrzymanych wyników badań doświadczalnych

Podgórski i Balazy (2004) sformułowali model matematyczny pozwalający uwzględnić wpływ termicznego odbicia oraz resuspensji depozytów na skuteczność zatrzymywania nanocząstek za pomocą materiałów włókninowych. Istnieją jednak również doniesienia o dobrej zgodności danych eksperymentalnych z klasyczną teorią filtracji, w których dopuszcza się występowanie zjawiska odbicia termicznego wyłącznie dla najmniejszych cząstek o maksymalnej wielkości $1 \div 3$ nm (Wang i in. 2007; Mouret i in. 2011).

Steffens i Coury porównywali wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych z wynikami uzyskanymi za pomocą wzorów półempirycznych (Steffens, Coury 2007a; Steffens, Coury 2007b).

Autorzy uzyskali dobrą zgodność pomiędzy wynikami doświadczalnymi a modelowymi w przypadku filtrów o monodispersyjnym rozkładzie wielkości średnic włókien (Steffens, Coury 2007a). W przypadku filtrów o polidispersyjnym rozkładzie wielkości średnic włókien (który jest charakterystyczny np. dla włókien produkowanych metodą rozdmuchu pneumatycznego) autorzy stwierdzili, że wyniki skuteczności filtra-

cji uzyskane za pomocą wzorów półempirycznych są zaniżone w stosunku do wyników uzyskanych eksperymentalnie, bez względu na sposób wyrażenia średnicy włókien użytej w obliczeniach (za pomocą: średniej arytmetycznej, mediany, średnicy zastępczej o równoważnym oporze Davisa lub Kuwabary), (Steffens, Coury 2007a).

PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy przedstawiono wpływ takich podstawowych parametrów procesowych, jak: prędkość przepływu gazu, jego temperatura i ciśnienie oraz morfologia zastosowanego materiału filtracyjnego na skuteczność zatrzymywania nanocząstek za pomocą materiałów włókninowych w świetle klasycznej teorii filtracji. Wskazano korzyści płynące z prowadzenia procesu filtracji nanocząstek przy niskiej prędkości przepływu na skuteczność filtracji na skutek działania mechanizmu dyfuzyjnego i elektrostatycznego oraz wpływ podniesienia temperatury aerozolu na skuteczność zatrzymywania w wyniku dyfuzji. Przedstawiono również wady i zalety stosowania filtrów o małych średnicach włókien i małej porowatości, a także doniesienia literaturowe dotyczące zgodności danych otrzymanych na podstawie modeli matematycznych, mających za podstawę klasyczną teorię filtracji, z danymi eksperymentalnymi.

Z dostępnych danych literaturowych wynika, że o ile znajomość podstaw teoretycznych procesu filtracji nanocząstek za pomocą materiałów włókninowych umożliwi ogólne określenie wpływu

poszczególnych zmiennych procesowych na skuteczność zatrzymywania cząstek aerozolu, zastosowanie modelowania matematycznego do projektowania układów filtracji może być źródłem istotnych błędów. Dlatego wskazana jest każdorazowa walidacja stosowanych modeli za pomocą badań doświadczalnych przeprowadzonych w warunkach rzeczywistych lub możliwie do nich zbliżonych.

Jednym z problemów, który utrudniał porównywanie skuteczności dostępnych na rynku włókninowych materiałów filtracyjnych przeznaczonych do głębokiej filtracji nanoaerozoli, był brak dokumentów normatywnych w tym zakresie. Ulegnie to zmianie po wprowadzeniu nowej normy (ISO 21083), która obecnie jest na etapie opiniowania. Norma ta wprowadzi ujednoliconą metodykę charakteryzacji płaskich włókien filtracyjnych przeznaczonych do filtracji nanoaerozoli, m.in. poprzez wyznaczenie skuteczności początkowej filtracji aerozolu cząstek ciekłych dla zakresu wielkości $20 \div 500$ nm oraz stałych dla zakresu wielkości $3 \div 30$ nm.

PIŚMIENNICTWO

Balazy A., Podgórski A. (2004). The influence of the filtration conditions on the optimization of aerosol filtration in fibrous filters. Abstracts of the European Aerosol Conference 2004, 969–970.

Balazy A., Podgórski A., Gradoń L. (2004). Filtration of nanosized aerosol particles in fibrous filters. I – experimental results. Abstracts of the European Aerosol Conference 2004, 967–968.

Brochocka A., Makowski K., Majchrzycka K., Grzybowski P. (2013). Efficiency of filtering materials used in respiratory protective devices against nanoparticles. International Journal of

Occupational Safety and Ergonomics (JOSE) 19, 285–295.

Brown R.C. (1993). Air filtration. An integrated approach to the theory and applications of fibrous filters. Oxford, Pergamon Press, wyd. I.

Givhchi R., Tan Z. (2015). The effect of capillary force on airborne nanoparticle filtration. Journal of Aerosol Science 83, 12–24.

Hinds W.C. (1999). Aerosol technology. Properties, behavior and measurement of airborne particles. Nowy Jork, John Wiley & Sons, wyd. II.

ISO 21083 Test method to measure the efficiency of air filtration media against spherical nanomaterials (Part 1: Particle size range from 20 nm to 500 nm, Part 2: Particle size range from 3 nm to 30 nm) [w trakcie opiniowania].

Jakubiak S., Tomaszewska J., Jackiewicz A., Michalski J., Kurzydłowski K.J. (2016). Polypropylene. Zinc oxide nanorod hybrid material for applications in separation processes. *Chemical and Process Engineering* 37, 393–403.

Mouret G., Chazelet S., Thomas D., Bemmerl D. (2011). Discussion about the thermal rebound of nanoparticles. *Separation and Purification Technology* 78, 125–131.

Podgórski A. (2010). Protection of the respiratory system against nanoparticles inhalation. [W:] *Nanoparticles in medicine and environment. Inhalation and health effect.* [Red.] J. Marijnissen, L. Gradoń. Dordrecht, Springer Science+Business Media, 251–277.

Podgórski A., Bałazy A. (2004). Filtracja nanoaerozoli w filtrach włóknistych. Model termicznego odbicia i resuspensji nanocząsteczek – II. *Inżynieria Chemiczna i Procesowa* 25, 1515–1520.

Podgórski A., Gradoń L., Bałazy A. (2004). Filtracja aerozoli w filtrach włókninowych. *Poradnik dla użytkowników, producentów i służb BHP.* Warszawa [praca niepublikowana, dostępna w CIOP-PIB].

Podgórski A., Bałazy A., Gradoń L. (2006). Application of nanofibers to improve the filtration efficiency of the most penetrating aerosol particles in fibrous filters. *Chemical Engineering Science* 61, 6804–6815.

Shin W.G., Mulholland G.W., Kim S.C., Pui D.Y.H. (2008). Experimental study of filtration efficiency of nanoparticles below 20 nm at elevated temperatures. *Aerosol Science* 39, 488–499.

Steffens J., Coury J.R. (2007a). Collection efficiency of fiber filters operating on the removal of nano-sized aerosol particles: I – Homogeneous fibers. *Separation and Purification Technology* 58, 99–105.

Steffens J., Coury J.R. (2007b). Collection efficiency of fiber filters operating on the removal of nano-sized aerosol particles: II – Heterogeneous fibers. *Separation and Purification Technology* 58, 106–112.

Wang J., Chen D.R., Pui D.Y.H. (2007). Modeling of filtration efficiency of nanoparticles in standard filter media. *Journal of Nanoparticles Research* 9, 109–115.