



Skuteczność filtracji cząstek aerozoli przez warstwowe układy włóknin filtracyjnych

mgr inż. TOMASZ JANKOWSKI
Centralny Instytut Ochrony Pracy
– Państwowy Instytut Badawczy

W artykule przedstawiono wyniki badania skuteczności filtracji cząstek aerozolu estru bis (2-etyloheksylu) kwasu sebacynowego (DEHS) przez warstwowe układy włóknin stosowane w systemach wentylacji i klimatyzacji. Badania polegały na określaniu zależności skuteczności frakcyjnej od zmiany grubości igłowanych włóknin filtracyjnych. Badania przeprowadzono przy dwóch prędkościach przepływu (2 i 5 cm/s).

Filtration efficiency of aerosol particles through multilayer filter nonwovens

This article presents results of an investigation of filtration efficiency of aerosol particles through multilayer filter nonwovens used in general ventilation and in air conditioning systems. The investigations consisted in determining the influence of the changes of thickness on the fractional efficiency of the raw material composition of nonwovens. The investigations were conducted at two velocities (2 and 5 cm/s).

Wstęp

Włókniny oraz ich warstwowe układy znajdują szerokie zastosowanie w systemach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych [1].

Podstawowym parametrem charakteryzującym użytkowanie filtra włókninowego jest skuteczność filtracji. Zmiany skuteczności filtracji odniesione do poszczególnych zakresów wymiarowych cząstek aerozoli są bezpośrednio związane ze zmianą grubości igłowanych włóknin filtracyjnych oraz prędkością przepływu aerozolu [2, 3].

Według badań Podgórskiego [4] różnicowanie struktury w przekroju poprzecznym dwuwarstwowych układów włóknin, głównie przez zmianę grubości i porowatości struktury, wywiera silny wpływ na ich właściwości filtracyjne, w tym na skuteczność filtracji cząstek aerozoli i opory przepływu aerozoli. Cząstki aerozoli obecne w pomieszczeniu pracy są bardzo szkodliwe dla człowieka, gdyż osadzając się w układzie oddechowym mogą być przyczyną wielu chorób, w tym pylic i no-

wotworów. Zapobieganie wzrostowi stężeń aerozoli w pomieszczeniach pracy wymaga podejmowania badań dotyczących ograniczenia narażenia człowieka na cząstki aerozoli poprzez stosowanie filtrów włókninowych umożliwiających uzyskanie najkorzystniejszych warunków filtracji, tzn. wysokiej skuteczności filtracji przy niskich oporach przepływu i długim czasie użytkowania filtra.

Dotychczas do oznaczania skuteczności filtracji materiałów filtracyjnych i filtrów powietrza stosowano metody fotometryczne. Nowoczesne techniki pomiarowe w zakresie badań skuteczności filtracji metodą zliczania cząstek [5] stwarzają możliwość podejmowania działań zmierzających do określania stężeń i rozkładów wymiarowych aerozoli w odniesieniu do cząstek o różnych wymiarach, zaczynając od cząstek o średnicy 10 nm. Pozwala to na pomiar stężenia cząstek najbardziej penetrujących (MPPS) przez filtr włókninowy, dla których występuje minimalna skuteczność filtracji.

CHARAKTERYSTYKA STRUKTURALNA BADANYCH WARSTWOWYCH UKŁADÓW WŁÓKNINY „A”
Structural parameters of multilayer filter nonwovens „A”

Tabela 1

Parametr strukturalny	Symbol	Jednostka miary	Liczba warstw układu włókniny „A”			
			1A	2A	3A	4A
Grubość układu	G	mm	1,11	2,11	3,09	4,04
Masa powierzchniowa układu	M _p	g/m ²	144,21	290,76	434,94	564,34
Gęstość upakowania włókniny	ρ	kg/m ³	130,44	137,67	140,95	139,68
Średnia średnica włókien	g	μm	26,18 * 35,78			
Ogólna porowatość układu	ε	%	89,72	90,26	90,49	90,40

* – warstwa filtrująca była złożona z włókien o dwóch średnich średnicach

Wyniki badania skuteczności filtracji materiałów stosowanych w filtrach dokładnych z grupy F (dla frakcji cząstek od 29 do 279 nm) i w filtrze wysoko skutecznym z grupy HEPA (dla frakcji cząstek od 32 do 225 nm) przedstawione zostały we wcześniejszej publikacji [6]. W tym artykule omówione zostaną wyniki badania skuteczności filtracji cząstek aerozolu DEHS przez warstwowe układy włóknin stosowane powszechnie w systemach wentylacji i klimatyzacji.

Materiał i metoda badań

Przeprowadzone badania dotyczyły powszechnie dostępnej na rynku włókniny wytwarzanej ze 100-procentowych włókien poliestrowych metodą igłowania wodnego (włóknina „A”). Podstawowe parametry strukturalne badanych warstwowych układów włókniny „A” przedstawiono w tabeli 1.

W warstwowych układach włókniny igłowanej „A” parametrem zmiennym była grubość struktury, którą uzyskiwano przez nakładanie na siebie warstw pojedynczych włókien o określonych wartościach średnic średnic włókien, gęstości upakowania, masy powierzchniowej oraz porowatości.

Grubość włókien określano zgodnie z normą PN-EN ISO 9073-2:2002 [7].

Badanie skuteczności filtracji przez warstwowe układy włókniny „A” wykonano testem aerozolu estru bis (2-ethyloheksylu) kwasu sebacynowego (DEHS). Skuteczność filtracji w funkcji wymiarów cząstek w odniesieniu do danej próbki warstwowego układu włóknin określano na podstawie pomiaru stężenia liczbowego cząstek aerozolu testowego przed i za badaną próbką. Zastosowano

system analizy wymiarowej cząstek SMPS Model 3936 (TSI Inc, USA) składający się z analizatora ruchliwości elektrycznej cząstek (LDMA, Model 3080L, TSI, USA) i kondensacyjnego licznika cząstek (CPC, Model 3022A, TSI, USA). Schemat stanowiska do badania skuteczności filtracji warstwowych układów włóknin przedstawiono na rysunku 1. Pomiar stężenia cząstek DEHS w przedziale średnic od 40 do 165 nm wykonywano w odniesieniu

do dwóch prędkości przepływu (2 i 5 cm/s) przez uchwyt pomiarowy.

Skuteczność filtracji przez próbkę warstwowego układu włóknin odnosząc się do danego zakresu wymiarowego cząstek (skuteczność frakcyjna) określano z zależności:

$$E_{j, \text{śr}} = \left(\frac{C_{j, \text{śr}}^{\text{przed}} - C_{j, \text{śr}}^{\text{za}}}{C_{j, \text{śr}}^{\text{przed}}} \right) * 100$$

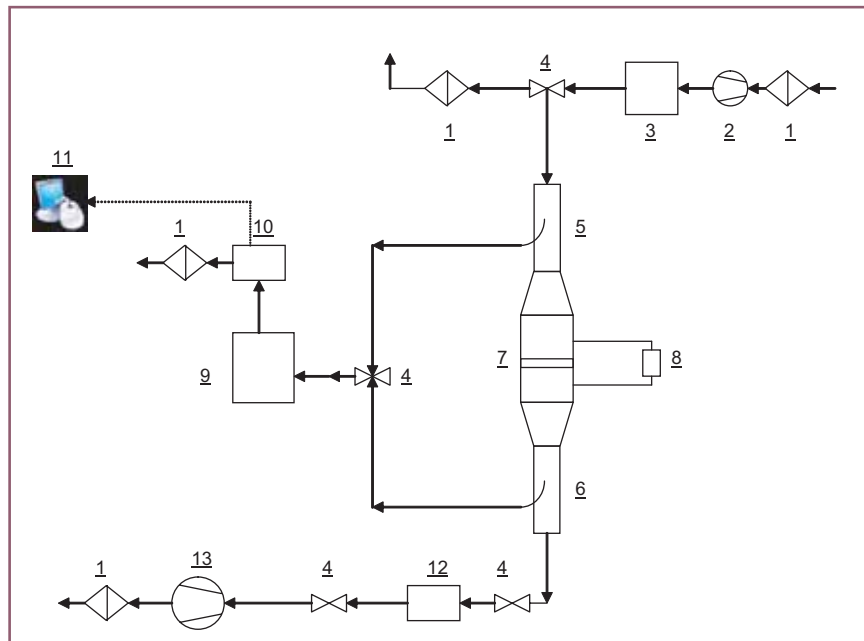
gdzie:

j – zakres wymiarowy cząstek aerozolu
C_{j,śr}^{przed} – średnie stężenie liczbowe aerozolu przed próbką dla zakresu wymiarowego „j” [cząstek/cm³]

C_{j,śr}^{za} – średnie stężenie liczbowe aerozolu za próbką dla zakresu wymiarowego „j” [cząstek/cm³].

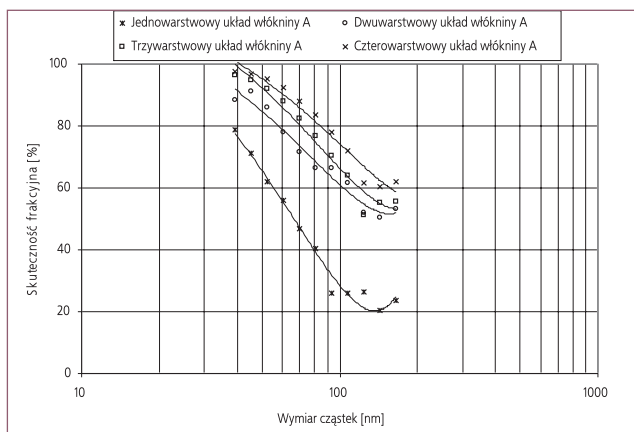
Wyniki badań

Wyniki badania skuteczności filtracji cząstek aerozolu DEHS w warstwowych układach włókniny „A” przedstawiono na rysunkach:



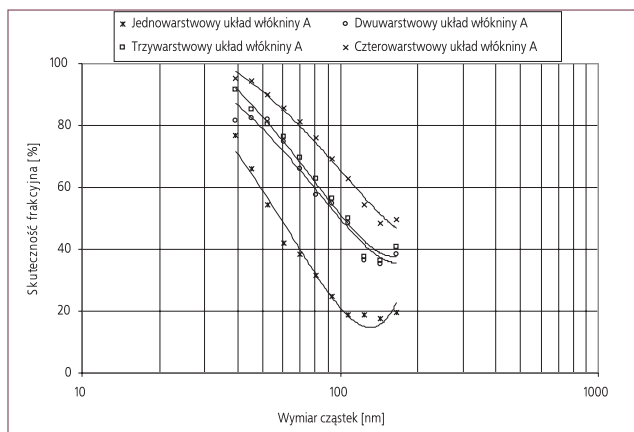
Rys. 1. Schemat stanowiska badania warstwowych układów włóknin: 1 filtr powietrza, 2 – wbudowana pompa powietrza, 3 – atomizacyjny generator aerozolu testowego, 4 – zawór odcinający, 5 – sonda do poboru próbek aerozolu „przed” warstwowym układem włóknin, 6 – sonda do poboru próbek aerozolu „za” warstwowym układem włóknin, 7 – uchwyt pomiarowy próbki warstwowego układu włóknin [8], 8 – cyfrowy mikromanometr różnicowy, 9 – analizator ruchliwości elektrycznej cząstek, 10 – kondensacyjny licznik cząstek (CPC), 11 – komputer, 12 – zestaw przepływomierzy, 13 – urządzenie do wymuszania przepływu powietrza przez próbkę warstwowego układu włóknin

Fig. 1. Schematic of the instrumental setup



Rys. 2. Zmiana skuteczności filtracji przez warstwowe układy włókniny „A” o różnych grubościach (tab. 1.) w zależności od wymiarów cząstek aerozolu DEHS przy prędkości przepływu aerozolu (U) równej 2 cm/s

Fig. 2. Filtration efficiency of aerosol DEHS particles through multilayer filter nonwovens „A” with different thickness (table 1) at the aerosol velocity $U = 2 \text{ cm/s}$



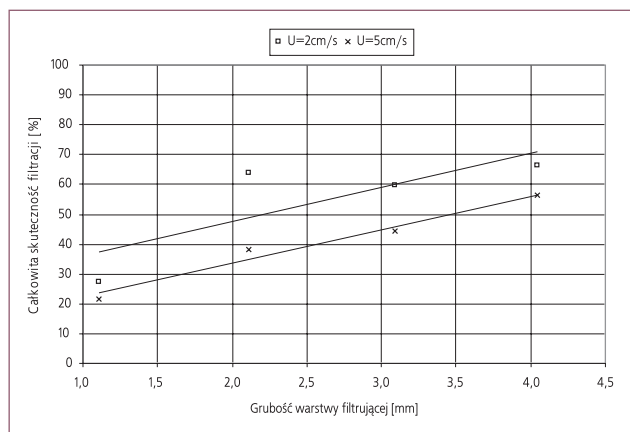
Rys. 3. Zmiana skuteczności filtracji przez warstwowe układy włókniny „A” o różnych grubościach (tab. 1.) w zależności od wymiarów cząstek aerozolu DEHS przy prędkości przepływu aerozolu (U) równej 5 cm/s

Fig. 3. Filtration efficiency of aerosol DEHS particles through multilayer filter nonwovens „A” with different thickness (table 1) at the aerosol velocity $U = 5 \text{ cm/s}$

- rys. 2 i 3. – zmiany skuteczności frakcyjnej cząstek aerozolu DEHS w warstwowych układach włókniny „A” przy prędkości przepływu aerozolu równej 2 i 5 cm/s

- rys. 4. – zmiany całkowitej skuteczności filtracji cząstek aerozolu DEHS w zależności od grubości warstwowych układów włókniny „A” przy prędkości przepływu aerozolu równej 2 i 5 cm/s.

Jak wynika z danych przedstawionych na rysunkach 2. i 3., skuteczności frakcyjne warstwowych układów włókniny „A” maleją w obszarze cząstek aerozolu o wymiarach 40 nm do cząstek najbardziej penetrujących (MPPS). Dla wszystkich badanych warstwowych układów włókniny „A” w zakresie wymiarowym od 124 nm do 143 nm występowały cząstki najbardziej penetrujące (MPPS), w odniesieniu do których skuteczność filtracji osiągała minimum, zaś dla cząstek większych od cząstek MPPS skuteczność filtracji wzrastała. W tabeli 2. przedstawiono wartości minimalnej skuteczności filtracji odniesione do wymiaru cząstek aerozolu dla warstwowych układów włókniny „A”.



Rys. 4. Zmiana całkowitej skuteczności filtracji cząstek aerozolu DEHS w zależności od grubości warstwowych układów włókniny „A” przy prędkości przepływu aerozolu (U) równej 2 cm/s i 5 cm/s

Fig. 4. Filtration efficiency of aerosol DEHS particles through multilayer filter nonwovens „A” with different thickness at both aerosol velocities ($U = 2 \text{ cm/s}$ and $U = 5 \text{ cm/s}$)

Analizując zmiany skuteczności filtracji w funkcji grubości warstwowych układów włókniny „A” określonych dla dwóch prędkości przepływu aerozolu, stwierdzono, że największy wzrost skuteczności filtracji w odniesieniu do cząstek najbardziej penetrujących (MPPS) odpowiadał dodaniu drugiej warstwy filtrującej. Dwukrotny wzrost grubości próbki spowodował 2,5-krotny wzrost skuteczności filtracji cząstek aerozolu najbardziej penetrujących (MPPS) przy prędkości powietrza wynoszącej 2 cm/s oraz dwukrotny wzrost skuteczności filtracji przy prędkości przepływu powietrza przez układ pomiarowy równej 5 cm/s.

Dalszy wzrost grubości warstwowego układu włókniny „A” nie powodował już tak znacznego przyrostu całkowitej skuteczności filtracji (tab. 2.).

Z porównania wartości minimalnych skuteczności uzyskanych w odniesieniu do cząstek najbardziej penetrujących (MPPS) wynika, że wraz z 2,5-krotnym wzrostem prędkości przepływu aerozolu DEHS coraz mniejszymi wartościami skuteczności filtracji odpowiadał taki sam zakres wymiarowy cząstek MPPS, tzn. od 124 nm do 143 nm (rys. 4.).

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały istotny wpływ grubości włókien i warunków przepływu aerozolu na skuteczność filtracji cząstek aerozolu przez warstwowe układy włókniny igłowanej. Przy zastosowaniu badanego materiału stwierdzono efektywny wzrost skuteczności filtracji cząstek najbardziej penetrujących MPPS w odniesieniu tylko do dwuwarstwowego układu włókniny „A”. Dalszy wzrost grubości warstwy filtrującej nie wpływał istotnie na spadek stężenia liczbowego cząstek MPPS za warstwowymi układami włókniny „A”. Wraz ze wzrostem prędkości przepływu aerozolu przez warstwy filtrujące malały wartości skuteczności filtracji cząstek najbardziej penetrujących. Zatem zwiększenie prędkości nawiewania powietrza przez stosowany system oczyszczania zawierający badany warstwowy układ włókniny igłowanej „A” może spowodować wzrost stężenia czą-

Tabela 2
MINIMALNE SKUTECZNOŚCI FILTRACJI CZĄSTEK AERAZOLU PRZEZ WARSTWOWE UKŁADY WŁÓKNINY „A” DLA RÓŻNYCH PRĘDKOŚCI PRZEPEŁYWU AERAZOLU

Minimum fractional efficiency of multilayer filter nonwovens "A" for different aerosol velocities

Liczba warstw włókniny „A”	Wymiar cząstek, dla których występuje minimalna skuteczność filtracji nm		Wartości minimalnej skuteczności filtracji %	
	Prędkość przepływu aerazolu U = 2 cm/s	Prędkość przepływu aerazolu U = 5 cm/s	Prędkość przepływu aerazolu U = 2 cm/s	Prędkość przepływu aerazolu U = 5 cm/s
1A	143	143	20,43	17,73
2A	143	143	50,26	35,36
3A	124	143	51,23	36,36
4A	143	143	60,35	48,45

stek MPPS w pomieszczeniu pracy. Cząstki MPPS o wymiarach manometrycznych, obecne w większym stężeniu liczbowym na stanowiskach pracy, przedostając się do pęcherzyków płucnych człowieka mogą być przyczyną występowania negatywnych skutków zdrowotnych (jak pylice czy nowotwory).

Warstwowe układy włókien pozwalają nie tylko na wygodne regulowanie grubości warstwy filtrującej, ale również na dobór odpowiedniej struktury w jej przekroju poprzecznym [4]. Umożliwia to uzyskanie najkorzystniejszych warunków filtracji, tzn. wysokiej skuteczności filtracji przy niskich oporach przepływu i długim czasie użytkowania filtra. Skuteczność filtracji przez włókninę zależy w istotnej mierze od relacji rozkładu wymiarowego cząstek aerazolowych do wielkości porów we włókninie [3]. Z kolei stosunek wielkości cząstek aerazolu do wielkości porów jest zależny od grubości i struktury warstwy filtrującej. Zależność ta jest związana ze specyficzną strukturą warstwowych układów włókien filtracyjnych, które są zbudowane z pojedynczych włókien o różnym wzajemnym ułożeniu w stosunku do kierunku przepływu medium. Obecnie wiele wytwarzanych włókien wykazuje wymagane właściwości filtracyjne już wtedy, gdy rozkład wielkości porów przekracza kilkakrotnie rozkład wymiarowy cząstek deponowanych we włókninie.

W związku z tym, obecnie w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym są kontynuowane badania wpływu relacji rozkładu wymiarowego cząstek aerazoli do wielkości porów we włókninie o różnych parametrach strukturalnych, na właściwości filtracyjne warstwowych układów włókien stosowanych w systemach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Albrecht W., Fuchs H., Kittelmann W. *Nonwoven fabrics: Raw Materials, Manufacture, Applications, Characteristics, Testing Processes*. Wiley-VCH, Weinheim 2002
- [2] Brown R.C. *Air filtration*. Pergamon 1993
- [3] Spurny K. R. *Advances in aerosol filtration*. Lewis Publishers 1998
- [4] Podgórski A., Bałazy A. *The loading of bilayer fibrous filter with solid polydisperse aerosol*. "Journal of Aerosol Science", vol. 11, 1197-1198, 2003
- [5] Jankowska E. i inni. *Sprawozdanie z realizacji II etapu zadania badawczego II-4.02 nt. „Opracowywanie metodyki określania skuteczności frakcyjnej materiałów filtracyjnych i filtrów powietrza stosowanych w środkach ochrony zbiorowej przed zapyleniem” realizowanego w programie wieloletnim pn. „Dostosowywanie warunków pracy w Polsce do standardów Unii Europejskiej”*, CIOP-PIB, Warszawa 2003
- [6] Jankowska E. *Skuteczność filtracji cząstek nanometrycznych przez materiały filtracyjne*. „Bezpieczeństwo Pracy”, 9(419)2005 s. 9-11
- [7] PN-EN ISO 9073-2:2002. *Tekstylija. Metody badania włókien. Część 2: Wyznaczanie grubości*
- [8] Lisowski A., Jankowska E., Thorpe A., Brown R.C. *Performance of textile fibre material measured with monodisperse and standard aerosols*. "Powder Technology", 118 (1-2), 149-159, 2001

Publikacja opracowana na podstawie wyników zadania badawczego realizowanego w ramach działalności statutowej Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego



**BEZPIECZEŃSTWO
PRACY**
nauka i praktyka

PRENUMERUJ