



Wpływ struktury kompozytów włókninowych na skuteczność filtracji aerozoli cieczy¹

The effect of structure of nonwoven composites on the filtration efficiency of liquid aerosols¹

dr inż. TOMASZ JANKOWSKI
<https://orcid.org/0000-0003-3620-9407>
e-mail: tojan@ciop.pl

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
Central Institute for Labour Protection – National Research Institute, Warsaw, Poland

Streszczenie

Podstawowym celem bezpieczeństwa pracy przy obróbce mechanicznej, z wykorzystaniem chłodziw olejowych, jest zapewnienie użytkownikom stanowisk pracy ochrony przed ryzykiem narażenia na cząstki aerozoli cieczy. Kompozyty włókninowe zajmują znaczącą pozycję wśród materiałów filtracyjnych stosowanych w systemach wentylacyjnych procesów obróbki skrawaniem. Warstwowe kompozyty włókninowe pozwalają nie tylko na odpowiednią regulację grubości filtra, lecz także na dobór odpowiedniej struktury przekroju filtra, aby jak najskuteczniej oczyścić powietrze z polidispersyjnego aerozolu cieczy. Celem pracy było określenie wpływu wybranych parametrów strukturalnych określonych włóknin na właściwości filtracyjne warstw materiałów włókninowych stosowanych do ochrony przed aerozolami cieczy. Badania obejmowały eksperymentalne określenie zależności pomiędzy takimi parametrami strukturalnymi włóknin, jak ich grubość i konfiguracja w warstwowym kompozycie, a parametrami procesu, takimi jak prędkość aerozolu w stosunku do skuteczności filtracji aerozolu cieczy. Skonfrontowano doświadczalne wyniki badania zmian skuteczności filtracji aerozolu przez warstwowe kompozyty włóknin z przebiegami określonymi zgodnie z obowiązującym równaniem teoretycznym dla obszaru przepływu laminarnego i burzliwego. Analiza wyników badań wykazała zależność skuteczności filtracji od parametrów strukturalnych badanych warstwowych kompozytów włókninowych (przede wszystkim grubości i konfiguracji w kompozycie) oraz parametrów procesowych obróbki (prędkości przepływu aerozolu). Zakres tematyczny artykułu obejmuje zagadnienia zdrowia oraz bezpieczeństwa i higieny środowiska pracy będące przedmiotem badań z zakresu nauk o zdrowiu oraz inżynierii środowiska.

Słowa kluczowe: wentylacja, skuteczność filtracji, filtry włókninowe, nauki o zdrowiu, inżynieria środowiska.

¹ Opracowano i wydano na podstawie wyników IV etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, dofinansowanego w latach 2017–2019 w zakresie prac badawczo-rozwojowych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Projekt nr III.N.06 pt. „Wpływ nawiewu wspomagającego na wzrost skuteczności działania wentylacji wyporowej na mobilnym stanowisku spawalniczym”.

Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

This paper is published and based on the results of a research task carried out within the scope of the fourth stage of the National Programme “Improvement of safety and working conditions” partly supported in 2017–2019 – within the scope of research and development – by the Ministry of Science and Higher Education/National Centre for Research and Development. Task no. III.N.06 entitled „Influence of supporting air on the increase of the effectiveness of displacement ventilation in a mobile welding station”.

The Central Institute for Labour Protection – National Research Institute is the Programme’s main co-ordinator.

Abstract

The primary goal for workplace safety in mechanical processing using oil coolers is to provide users with workplaces which will protect against the risk of exposure to liquid aerosol particles. Nonwoven composites have a significant position among the filter materials used in ventilation systems for machining processes. Layered nonwoven composites not only allow for the proper adjustment of the filter thickness, but also for selecting the right filter cross section structure for the most efficient air cleaning from the polydisperse liquid aerosol. The purpose of the work was to determine the influence of selected structural parameters of the chosen nonwovens on the filtration properties of the nonwoven layer composite materials used to protect against the risk of liquid aerosols. The study included experimental determination of the relationship between such structural parameters of nonwovens as their thickness and composition of layered composites, and process parameters such as aerosol velocity relative to liquid aerosol filtration efficiency. Experimental results of the study of changes in the efficiency of aerosol filtration through layered composites of nonwovens with the courses determined in accordance with the applicable theoretical equation for the area of laminar and turbulent flow were confronted. Analysis of the research results showed the dependence of filtration efficiency on the structural parameters of the tested nonwoven composite layers (primarily thickness and composition of layered composites), mechanical processing parameters (aerosol flow velocities). This article discusses the problems of occupational safety and health, which are covered by health sciences and environmental engineering.

Słowa kluczowe: ventilation, filtration efficiency, fibrous filters, health sciences, environmental engineering.

WPROWADZENIE

Jednym z istotnych czynników szkodliwych dla człowieka są cząstki aerozoli obecnych w powietrzu. Podejmowanie działań zmierzających do eliminowania zagrożenia zanieczyszczeniami powietrza w środowisku pracy człowieka jest zdeteminowane wymaganiami dyrektyw Unii Europejskiej oraz rozporządzeniami (Rozporządzenie... 1997; 2002).

W wielu procesach technologicznych, w tym wysokotemperaturowych, stosuje się jako czynniki chłodzące różnego rodzaju oleje. W obróbce mechanicznej oleje mogą ulegać utlenianiu, zanieczyszczaniu cząstkami metali lub produktami spalania, a także mogą powstawać nowe, szkodliwe substancje. Aerozole cieczy mogą również uszkadzać sprzęt elektroniczny stosowany do obsługi maszyn i urządzeń. Narażenie na aerozole cieczy, w szczególności mgłę olejową, może powodować powstawanie takich jednostek chorobowych, jak: przewlekłe zapalenie oskrzeli, astma, alergie, a także rozwój nowotworów wśród pracowników zatrudnionych w przemyśle.

Zarówno w kraju, jak i na świecie podstawowym celem dotyczącym bezpieczeństwa pracy w procesach obróbki mechanicznej z użyciem chłodziw olejowych jest zapewnienie użytkownikom pomieszczeń pracy ochrony przed ryzykiem związanym z narażeniem na cząstki aerozoli cieczy. Obecnie wiele badań naukowych na świecie, jak i w Polsce jest prowadzonych przede wszystkim w zakresie oceny i eliminowania zagrożenia

cząstkami aerozoli w środowisku pracy człowieka z wykorzystaniem metod zliczania cząstek (Agranowski i in. 2006; Clement, Dunnett 2004; Mullins i in. 2003; 2004; Mullins, Kasper 2006). Nowoczesne techniki pomiarowe umożliwiają wykonywanie pomiarów stężeń cząstek aerozoli w szerokim zakresie wymiarowym. Zastosowanie tych metod pozwala na wykonywanie badań w kierunku optymalizacji warstwowych kompozytów włóknin stosowanych w obróbce mechanicznej w odniesieniu do zatrzymywania frakcji wymiarowych, poczynając już od wymiarów nanometrycznych.

W ostatnich latach powstają nowe rozwiązania eliminujące lub ograniczające zagrożenie cząstkami aerozolowymi człowieka w środowisku pracy (Albrecht i in. 2002; González i in. 2016; Pośniak i in. 2020). Zarówno w kraju, jak i na świecie warstwowe kompozyty włóknin stanowią znaczącą pozycję wśród materiałów filtracyjnych stosowanych w systemach wentylacji procesów obróbki mechanicznej (Brown 1993; Charvet i in. 2017; Gac i in. 2018; Kamiński i in. 2020; Spurny 1998).

Warstwowe kompozyty włóknin pozwalają nie tylko na dogodne regulowanie grubości filtru, lecz także na dobór odpowiedniej struktury w przekroju filtru w celu uzyskania najbardziej efektywnego oczyszczenia powietrza z polidispersyjnego aerozolu cieczy (np. filtracja powietrza zawierającego mgłę oleju mineralnego).

FILTRACJA AEROZOLI CIECZY

Kompozyty włóknin są zwykle stosowane jako ostatni etap procesu oczyszczania powietrza z zanieczyszczeń aerozolami cieczy. Układy te mają rozbudowaną strukturę w przekroju poprzecznym i cząstki aerozoli mogą być zatrzymywane na włóknach wewnątrz tej struktury.

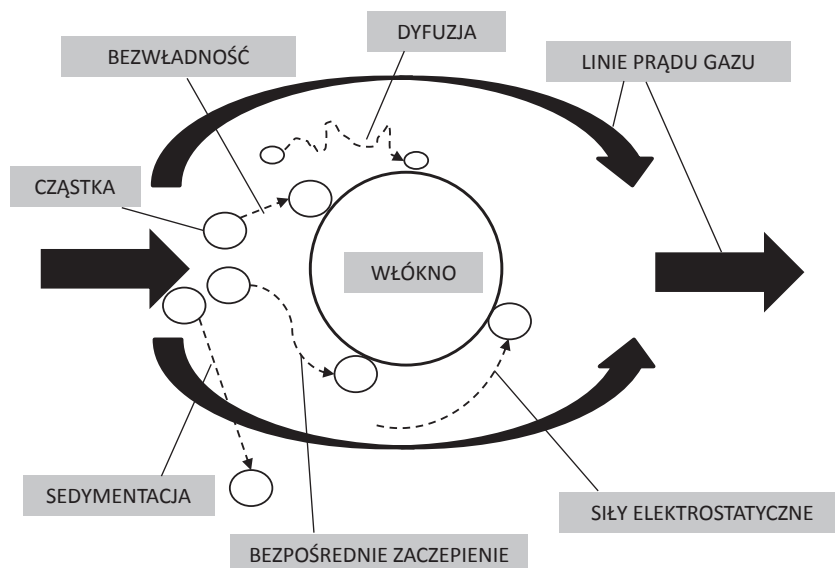
Jednym z najważniejszych zjawisk decydujących o optymalnych właściwościach filtracyjnych takich kompozytów jest oddziaływanie cząstek aerozoli z włóknami stanowiącymi warstwę filtracyjną. Podstawowymi parametrami opisującymi pracę kompozytu włóknin są opór przepływu i skuteczność frakcyjna określane podczas przebiegu niestalonej filtracji wgłębnej, charakteryzowanej przez złożone mechanizmy transportu i zatrzymywania cząstek aerozoli (Podgórski, Jackiewicz 2008a; Spurny 1998; Willeke, Baron 2001). Sposób przemieszczania się i zatrzymywania cząstek aerozoli w materiałach filtracyjnych jest uzależniony od jednoczesnego działania kilku procesów, m.in.: odparowania ze strumienia przepływającego powietrza, ponownego skroplenia, kondensacji na włóknach oraz drenażu (Agranovski, Braddock 1998; Conder, Liew 1989; Earnest 2000; Raynor, Leith 1999; 2000; Payet i in. 1992; Zibold 2000).

Zgodnie z klasyczną teorią opisującą filtrację aerozolu cieczy przez włókniny filtracyjne,

przemieszczanie się cząstek aerozolu w warstwach filtracyjnych może występować na skutek: dyfuzji molekularnej, bezwładności cząstek, bezpośredniego ich zaczepienia, efektu grawitacyjnego i sił elektrostatycznych. Mechanizmy depozycji cząstek aerozoli zostały przedstawione na rycinie 1.

Proces filtracji aerozoli cieczy przebiega odmiennie od pyłów. Cząstki aerozoli cieczy nie tworzą rozgałęzień dendrytów, ale wnikają w wolne przestrzenie znajdujące się pomiędzy elementami filtracyjnymi. Proces filtracji aerozoli cieczy w warunkach użytkowania ma charakter niestalony. Proces ten powoduje zmiany zarówno właściwości filtracyjnych kompozytów włóknin, jak i ich struktury w czasie. Jednym z najważniejszych zjawisk zachodzących w takich układach jest oddziaływanie cząstek aerozoli cieczy z włóknami stanowiącymi warstwę filtracyjną.

Na podstawie przeprowadzonych badań przez Raynor'a i Leith'a (1999) wykazano, że sposób przemieszczania się i zatrzymywania cząstek aerozolu cieczy w materiałach filtracyjnych jest uzależniony od jednoczesnego działania kilku procesów. Krople, przemieszczając się wzdłuż układów filtracyjnych, mogą ulegać odparowaniu w strumieniu przepływającego powietrza. Badania Raynor'a



Ryc. 1. Mechanizmy depozycji cząstek aerozoli
Fig. 1. Mechanisms of aerosol particles deposition

i *Leitha* (2000) potwierdziły występowanie zjawiska odparowywania cząstek aerozoli cieczy z materiałów filtracyjnych o różnych parametrach strukturalnych. Krople usunięte ze strumienia powietrza mogą ulegać akumulacji i przemieszczać w niżej położone warstwy układu filtracyjnego wskutek drenażu. Jednocześnie odparowane cząstki aerozolu mogą ulegać ponownemu skropleniu i kondensacji na włóknach materiału filtracyjnego.

Przedstawione w literaturze podejście do przewidywania skuteczności filtracji dotyczy w pierwszej kolejności określania skuteczności depozycji na pojedynczym włóknie.

Pierwsze modele bazują na wyznaczaniu jednostkowych skuteczności dla poszczególnych mechanizmów depozycji aerozoli cieczy w stanie początkowym filtracji dla filtra nieobciążonego. Z kolei modele opisujące stan nieustalony filtracji aerozoli cieczy opierają się na założeniu, że cząstki w sposób równomierny zapelniają wolne przestrzenie wewnątrz struktury filtrów powietrza (*Conder, Liew* 1989; *Gougeon* i in. 1996; *Payet* i in. 1992). Niemniej jednak przedstawione modele nie uwzględniają m. in. zaobserwowanego spadku ilości cieczy zatrzymanej w strukturze filtra powietrza w czasie trwania procesu filtracji. Ponadto modele te w sposób niedokładny opisują zmiany oporu przepływu i skuteczności filtracji w czasie zatrzymywania cząstek aerozolu cieczy na filtrach powietrza.

Frising i in. (2005) stworzyli model, w którym układ filtracji został podzielony na kilka teoretycznych warstw. Autorzy publikacji uważają, że cząstki aerozolu cieczy podczas depozycji w strukturze filtra powietrza tworzą rurę osłaniającą powierzchnię pojedynczego włókna. W następstwie takiej depozycji aerozolu cieczy zwiększa się średnica włókien w kompozytach włóknin.

Z kolei *Mullins* i *Kasper* (2006) w trakcie badań eksperymentalnych i teoretycznych stwierdzili, że niemożliwe jest utworzenie filmu cieczy na pojedynczym włóknie bez regularnego rozmieszczenia na nim cząstek aerozolu cieczy. Na podstawie przedstawionych wyników badań stwierdzono, że cząstki aerozolu cieczy w sposób nieregularny deponują się na powierzchni włókien oraz w miejscach ich krzyżowania się.

Qian i in. (2009) zastosowali metody numerycznej mechaniki płynów (CFD) do zbadania: wpływu prędkości przepływu powietrza, gęstości upakowania i średnicy cząstek na opór przepływu powietrza i skuteczność wychwytu cząstek.

Niemniej jednak w tym modelu nie zastosowano realistycznej struktury filtra powietrza, lecz szeregu równoległych, identycznych cylindrów analogicznie do modeli rozpatrywanych przez *Kuwabara* (1959). Dodatkowo istnieją duże rozbieżności pomiędzy wynikami teoretycznymi i obliczeniowymi dotyczącymi równań dla ruchów Browna cząstek mniejszych od 500 nm. Nad zastosowaniem metody gazu sieciowego lattice-Boltzmana do modelowania ruchu kropli o średnicy porównywalnej do średnicy włókna pracowali *Gac* i *Gradoń* (2012). Symulacje pokazały istnienie dwóch charakterystycznych zjawisk związanych z niejednorodnością powierzchni włókna. Zaobserwowano zwiększenie kąta zwilżania związanego z istnieniem „poduszek gazowych” pomiędzy nierównościami powierzchni. Przyspiesza to ruch cząstek aerozolu cieczy po włóknie. Drugim zjawiskiem jest zaczepienie linii kontaktu na nierównościach powierzchni, co prowadzi do wydłużenia kropli i w konsekwencji spowolnienia ich ruchu w stosunku do ruchu na włóknie o gładkiej powierzchni.

W pracy *King* i *Mullins* (2011) przeprowadzono symulację ruchu małych kropelek cieczy w filtrze, ich wychwytywanie przez włókna, przekształcanie cząstek aerozolu w film cieczy na włóknach na drodze mechanizmu koalescencji, rozpadu tych powłok na mniejsze aglomeraty i drenaż z filtra.

Model opracowany przez *Charvetà* i in. (2010) określa skuteczność filtracji dla poszczególnych wielkości cząstek, a nie tylko dla całkowitej penetracji. Ponadto oryginalne podejście polega na uwzględnieniu rozkładu wielkości włókien w filtrze powietrza, zamiast stosowania do obliczeń średniej średnicy włókna. Na podstawie wyników badań wykazano, że na początku procesu filtracji wartości oporu przepływu są niskie i wzrastają powoli, ponieważ jest mało zgromadzonych cząstek aerozolu cieczy w strukturze filtra i nie ma zakłóceń w przepływie powietrza. Po pewnym czasie następuje wykładniczy wzrost oporu przepływu powietrza spowodowany nagromadzeniem się cieczy w filtrze i powstawania połączeń między włóknami. Finalnie wartości oporu przepływu są stałe, co oznacza istnienie równowagi pomiędzy przepływem cieczy na wejściu do filtra i wyjściu z filtra na drodze drenażu.

Charvet i in. (2010) zaobserwowali, że minimalne skuteczności filtracji były osiąganymi dla cząstek w granicy średnicy 100 nm. Dla cząstek aerozolu cieczy mniejszych od 100 nm obserwowano

zwiększenie skuteczności filtracji i jej zmniejszenie dla cząstek większych.

W badaniach *Mead-Hunter'a* i in. (2012) potwierdzono, że rozkład cieczy w strukturze filtra jest niejednorodny. Cząstki aerozolu cieczy mają tendencje do gromadzenia się na krzyżowaniach pojedynczych włókien i innych zwiężeń w strukturze, natomiast na powierzchni włókien odpowiedzialnych głównie za zatrzymywanie cząstek aerozolu cieczy są tworzone tylko cienkie filmy cieczy. Dlatego też jest istotne ograniczenie ilości cieczy w przestrzeni między włóknami w celu uniknięcia zwiększenia oporu przepływu powietrza.

Tworzenie cienkich powłok cieczy na włóknach powoduje zmniejszenie lub całkowite wyeliminowanie odbicia cząstek aerozolu cieczy na płaskich powierzchniach włókien (*Kasper* i in. 2010). Ponadto cienkie warstwy filmu cieczy lub obecność cząstek aerozolu na włóknach zwiększają średnicę włókien, co ma wpływ na skuteczność ich dalszej depozycji.

Poszczególne cząstki aerozolu cieczy, tworzące film cieczy na włóknach, mają cylindryczny kształt i charakteryzują się małym kątem zwilżania (*Mullins* i in. 2011).

Bredin i *Mullins* (2012) badali wpływ zakłóceń (przerw w generowaniu aerozolu cieczy) przepływów powietrza na skuteczność filtracji aerozoli cieczy przez różne warstwowe filtry włókninowe. Okazało się, że we wszystkich badanych filtrach następował znaczący drugi etap obładowywania cząstkami aerozolu cieczy pomimo tego, że wcześniej już osiągnęły stan równowagi dla ciągłego przepływu. Filtry powietrza wykazywały wyraźny wzrost oporu przepływu i stopnia nasycenia, aż do osiągnięcia stanu drugiej równowagi. Autorzy drugi stan równowagi przypisali zachodzącym mechanizmom przegrupowania cieczy wewnątrz struktury filtra podczas przerw oraz dodatkowemu zatykaniu wcześniej wolnych przestrzeni między włóknami.

W badaniach *Mead-Hunter'a* i in. (2013) zastosowano numeryczną mechanikę płynów do kompleksowej oceny filtracji aerozoli cieczy o wymiarach nanometrycznych. Stwierdzono, że minimum skuteczności filtracji występowało w zakresie średnich średnic cząstek od 200 do 500 nm.

Muller i in. (2014) stwierdzili, że zwiększenie zdolności zatrzymywania aerozolu cieczy jest spowodowane głównie przez absorpcję cząstek na filmie cieczy wytworzonego wcześniej na włóknach.

Podczas gdy cząstki są wchłaniane przez film cieczy ani skuteczność filtracji, ani opór przepływu powietrza nie wzrastają znacznie. Nie zaobserwowano również transportu cząstek do tylnej strony włókna, co zwiększyłoby wytrzymałość połączeń cząstka – włókno.

Według wskazań autorów poszczególnych badań nad zmianami skuteczności filtracji aerozoli cieczy istnieje potrzeba wypełnienia luki pomiędzy wynikami prac doświadczalnych i teoretycznych.

Zgodnie z zależnością (*Brown* 1993) całkowita skuteczność filtracji aerozoli cieczy może zostać określona dla danego homogenicznego (o tej samej strukturze w przekroju) materiału filtracyjnego (E_{calc}):

$$E_{calc} = 1 - \exp\left(-\frac{4 \cdot E \cdot L \cdot \alpha}{\pi \cdot d_{wl} \cdot (1 - \alpha)}\right) = 1 - \exp\left(-a_1 \cdot \frac{1}{U^{2/3}}\right) \quad (1)$$

gdzie:

- L – grubość włókniny filtracyjnej [m],
- E – skuteczność depozycji cząstki aerozolu na pojedynczym włóknie [-],
- a – gęstość upakowania włókniny [kg/m^3],
- d_{wl} – średnia średnica włókien we włókninie [m],
- U – prędkość liniowa aerozolu [m/s],
- a_1 – stały współczynnik [-].

Całkowita skuteczność filtracji aerozolu cieczy (E_{calc}) w heterogenicznych kompozytach warstwowych (kompozycje o różnej konfiguracji włókien „x”, „y” i „z”) zarówno dla przepływu laminarnego, jak i burzliwego można zapisać w postaci:

$$E_{calc} = (E_x + E_y - E_x \cdot E_y) + E_z - E_{xy} \cdot E_z \quad (2)$$

gdzie:

- $E_x = 1 - \exp(-a_{1,x} \cdot U^{-2/3})$ – skuteczność filtracji aerozolu we włókninie „x” [%],
- $E_y = 1 - \exp(-a_{1,y} \cdot U^{-2/3})$ – skuteczność filtracji aerozolu we włókninie „y” [%],
- $E_z = 1 - \exp(-a_{1,z} \cdot U^{-2/3})$ – skuteczność filtracji aerozolu we włókninie „z” [%],
- $a_{1,x}$ – współczynnik wykładniczy funkcji dla włókniny „x” [-],
- $a_{1,y}$ – współczynnik wykładniczy funkcji dla włókniny „y” [-],
- $a_{1,z}$ – współczynnik wykładniczy funkcji dla włókniny „z” [-],
- U – prędkość liniowa aerozolu [m/s].

MATERIAŁY TESTOWE

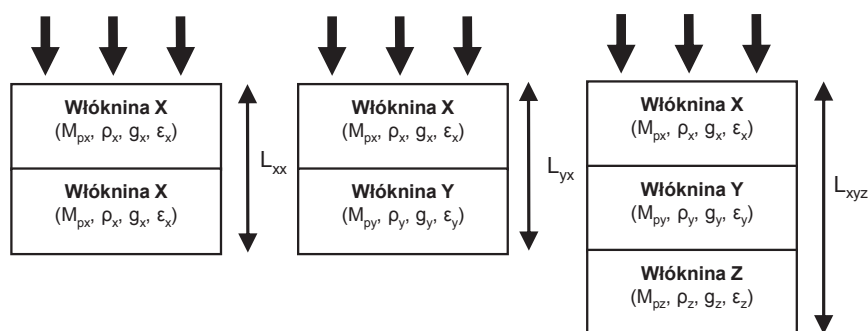
Do badań wybrano pięć komercyjnych włókien z włókien syntetycznych wytworzonych z włókien poliestrowych (PES) techniką *spun-lace* (oznaczone symbolami G, I) i z włókien polipropylenowych (PP) z użyciem metody *melt-blown* (oznaczone symbolami: K2, K6, K12). Włókniny w znacznym stopniu różniły się między sobą takimi parametrami strukturalnymi, jak: grubość (metoda zgodna z PN-EN ISO 9073-2:2002), masa powierzchniowa (waga analityczna Sartorius typu R160P, Sartorius GmbH), gęstość upakowania włókien (metoda

obliczeniowa), średnia średnica włókien (system przetwarzania i analizy obrazów mikroskopowych MULTISCANBASE, Computer Scanning Systems II) i porowatość (Porometr Kapilarny Model 4.900, Porous Materials, Inc.).

Włókniny i warstwowe kompozyty *spun-lace* i *melt-blown* charakteryzowały się zakresami parametrów strukturalnych. Parametry strukturalne warstwowych kompozytów oraz włókien *spun-lace* i *melt-blown* przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry strukturalne warstwowych kompozytów oraz włókien *spun-lace* i *melt-blown*
Table 1. Structural characteristic of the *spun-lace* and *melt-blown* nonwovens and layered composites

Typ włókniny, kompozytu, symbol/nazwa próby	Grubość, $\bar{L}\bar{s}r, m \cdot 10^3$	Masa powierzchniowa, $Mp, g/m^2$	Gęstość upakowania, $\alpha\bar{s}r, kg/m^3$	Całkowita porowatość, $\epsilon\bar{s}r, \%$	Średnia średnica włókien, $\bar{d}\bar{s}r, \mu m$
G-1-layer (warstwowy) <i>spun-lace</i> PES	5,31	282			
G-2-layer (warstwowy) <i>spun-lace</i> PES	11,1	614	53,1	96,0	54,8±2,0
G-3-layer (warstwowy) <i>spun-lace</i> PES	16,1	913			
I-1-layer (warstwowy) <i>spun-lace</i> PES	2,16	532			
I-2-layer (warstwowy) <i>spun-lace</i> PES	4,25	1106	247	81,6	16,5±0,6
I-3-layer (warstwowy) <i>spun-lace</i> PES	6,51	1645			
K2-1-layer (warstwowy) <i>melt-blown</i> PP	2,55	68,0			
K2-2-layer (warstwowy) <i>melt-blown</i> PP	4,90	140	26,6	97,1	2,9±0,2
K2-3-layer (warstwowy) <i>melt-blown</i> PP	8,54	210			
GI-2-layer (warstwowy) <i>spun-lace</i> PES	7,00	828	118	91,2	
GGI-3-layer (warstwowy) <i>spun-lace</i> PES	11,0	1141	104	92,2	54,8±2,0 16,5±0,6
GII-3-layer (warstwowy) <i>spun-lace</i> PES	9,50	1365	144	89,3	
K2-G-2-layer (warstwowy) <i>melt-blown</i> PP	7,76	372	47,9	95,9	2,9±0,2 54,8±2,0
K6-G-2-layer (warstwowy) <i>melt-blown</i> PP	6,95	374	53,8	95,5	6,7±0,6 54,8±2,0
K12-G-2-layer (warstwowy) <i>melt-blown</i> PP	6,54	385	58,9	95,1	12,4±0,4 54,8±2,0



Ryc. 2. Przykładowy schemat dwu- i trójwarstwowego kompozytu włóknin typu *spun-lace* i *melt-blown*
 Fig. 2. Example diagram of a two-stage and three stage composition of *spun-lace* and *melt-blown* nonwovens

Wytwarzanie włóknin metodą *melt-blown* polegało na rozdmuchiwaniu roztopionego polimeru na elementarne włókna o zróżnicowanej grubości i długości. Technika *melt-blown* jest technologią bezpośredniego, jednoprosesowego wytwarzania włóknin z polimeru. W tym procesie uzyskuje się najczęściej włókniny zbudowane z włókien o średnicy $0,5 \div 30 \mu\text{m}$, które odznaczają się: znaczną przepuszczalnością powietrza, wysoką skutecznością filtracji oraz małymi oporami przepływu.

W ramach badań zaproponowano zbadanie właściwości filtracyjnych warstwowych kompozytów złożonych z wyżej opisanych włóknin. Układy filtracyjne tworzyły mieszane jedno-, dwu- i trzostopniowe kompozycje złożone z wybranych włóknin o różnej morfologii. Przykład schematu dwu- i trójwarstwowego kompozytu włóknin typu *spun-lace* i *melt-blown* przedstawiono na rycinie 2.

STANOWISKO I METODA BADAWCZA

Badania przeprowadzono w aspekcie powstawania mgły olejowej oraz relacji pomiędzy zmianami sprawności filtracji aerozoli cieczy a:

- parametrami strukturalnymi wielostopniowych układów filtracji, w szczególności:
 - grubością warstwy filtrującej w wielostopniowych układach filtracji,
 - sposobem ułożenia warstw filtrujących w wielostopniowych układach filtracji;
- parametrami procesowymi obróbki mechanicznej symulowanymi przez:
 - prędkość przepływu aerozolu cieczy przez wielostopniowy układ filtracji.

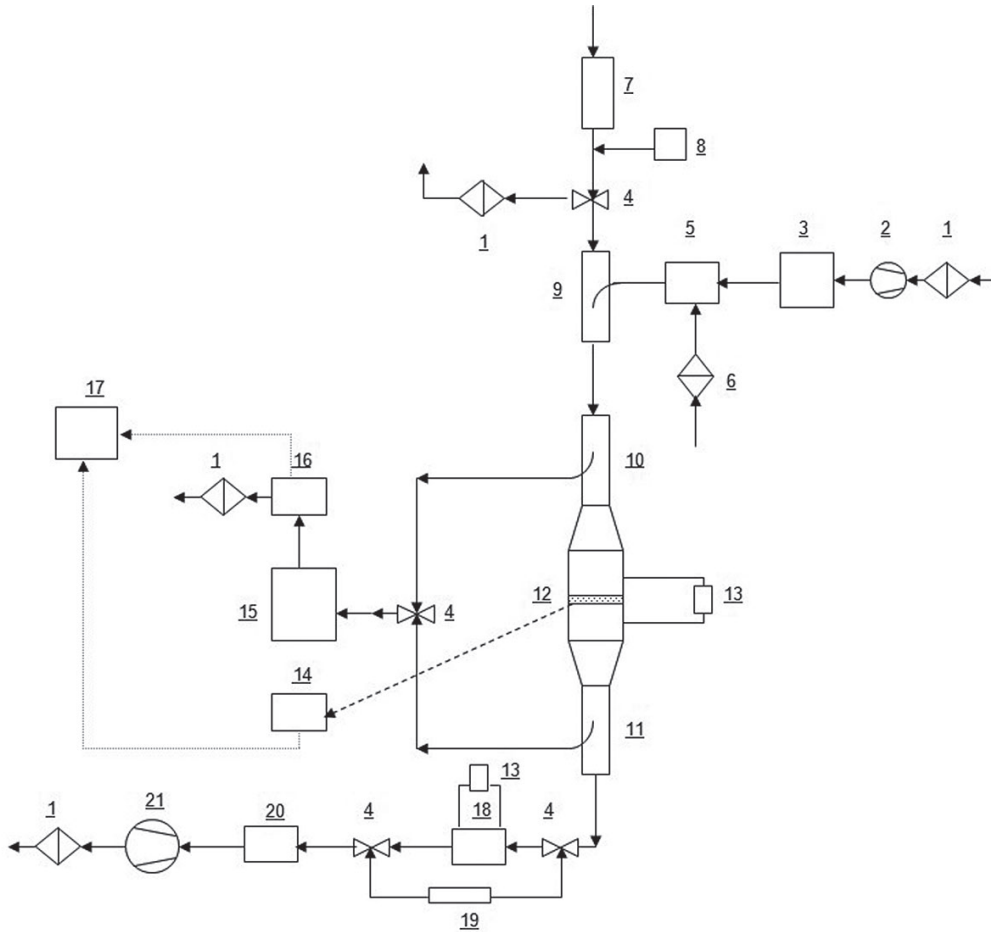
Na podstawie wyników badań były wyznaczone charakterystyki na etapie początkowym zmian frakcyjnej sprawności w czasie trwania procesu filtracji, dla wielostopniowych układów włókninowych o różnej grubości oraz o zróżnicowanej strukturze w przekroju poprzecznym.

Badanie sprawności filtracji przez wybrane warstwowe kompozyty filtracyjne było wykonywane testem aerozolu estru bis (2-etyloheksylu) kwasu sebacynowego (DEHS).

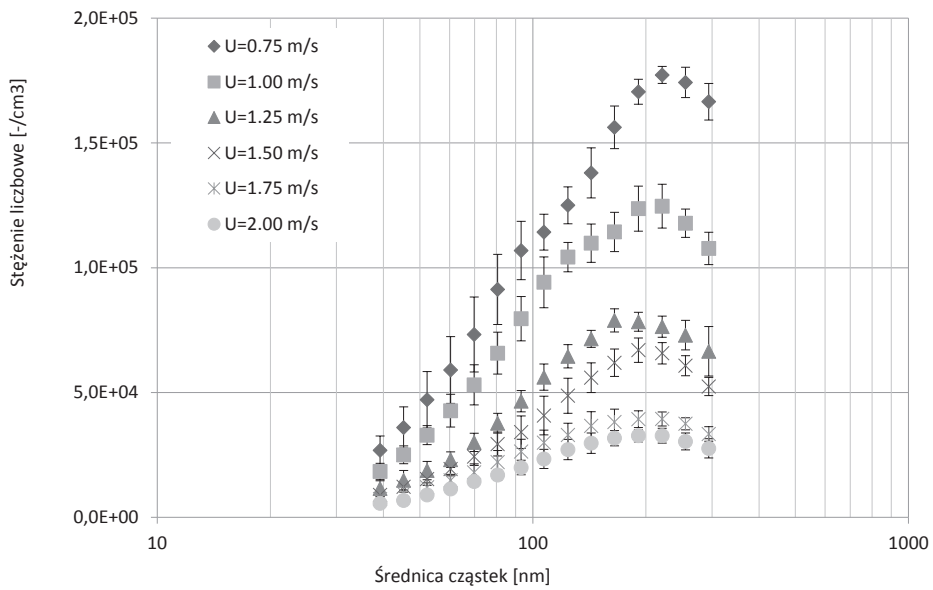
Wybór aerozolu testowego do symulowania emisji zanieczyszczeń powietrza podczas obróbki mechanicznej z użyciem chłodziw olejowych został dokonany na podstawie normy EN 1822-1:2019.

Schemat stanowiska do badania właściwości filtracyjnych wielostopniowych układów filtracji przedstawiono na rycinie 3.

Powietrze jest zasysane z otoczenia i przepływa przez elektryczną nagrzewnicę kanałową (7) DH-100/03, gdzie następuje ogrzanie powietrza do wymaganej temperatury z użyciem termostatu TK-1 (8). Aerozol cieczy o określonym stężeniu i rozkładzie wymiarowym jest wytwarzany w generatorze atomizacyjnym (3). Rozkład wymiarowy cząstek aerozolu DEHS przedstawiono na rycinie 4.



Ryc. 3. Stanowisko badawcze (stanowisko zbudowane w ramach projektu badawczego realizowanego w CIOP-PIB)
Fig. 3. Experimental setup (experimental setup was built as part of a research project carried out at the CIOP-PIB)



Ryc. 4. Rozkład wymiarowy cząstek aerozolu DEHS
Fig. 4. Size distribution of DEHS aerosol particles

Za pomocą wbudowanej pompy wygenerowane cząstki aerozolu cieczy są podawane ze stałą prędkością do systemu rozcieńczania VKL-10 (5), co zapewnia zmniejszenie stężenia aerozolu. System umożliwia dziesięciokrotne rozcieńczenie aerozolu, poprzez wymieszanie z oczyszczonym sprężonym powietrzem (6). Następnie mieszanina aerozolu testowego i powietrza jest podawana do stanowiska badawczego z użyciem zespołu dozowania (9).

Przepływ aerozolu cieczy jest wymuszany przez wentylator kanałowy VENT-100L (21) wraz z tłumikiem (20), który posiada ciągły regulator prędkości obrotowej, dzięki czemu jest możliwa płynna zmiana wartości strumienia objętości powietrza w układzie pomiarowym. Ponadto strumień objętości powietrza w układzie pomiarowym jest regulowany za pomocą zaworów (4) zintegrowanych z zestawem przepływomierzy (19) i przepustnicą regulacyjną (18).

Próbka wielostopniowego układu filtracji jest umieszczana w dolnej części uchwyty pomiarowego (12) stanowiącego centralną część zespołu poboru próbek aerozolu cieczy. Materiał filtracyjny zostaje dociśnięty poprzez pierścienie dystansowe, górną ruchomą częścią uchwyty do jego dolnej części.

W zespole poboru próbek aerozolu przed (10) i za (11) uchwytem pomiarowym (12) zastosowano sondy o wymiennych głowicach (o wlotowych średnicach wewnętrznych w zakresie $0,5 \div 6,0$ mm).

Początkowe opory przepływu przez próbkę wielostopniowego układu filtracji o znanych parametrach strukturalnych powinny być mierzone

przed podaniem do układu pomiarowego aerozolu cieczy. Badania początkowych oporów przepływu są wykonywane po osiągnięciu stabilnej pracy układu pomiarowego, w tym elektronicznego mikromanometru różnicowego (13). Pomiar jest wykonywany przy różnych wartościach prędkości przepływu powietrza przez uchwyt pomiarowy. Przepływ powietrza jest wymuszany przez wentylator kanałowy (21) umieszczony za uchwytem pomiarowym (12), a wartość prędkości jest regulowana z użyciem zaworów (4) zintegrowanych z zestawem przepływomierzy (19) i przepustnicą regulacyjną (18). Dla każdej próbki włókniny dokonuje się sześciu pomiarów różnicy ciśnień „przed” i „za” badanym materiałem filtracyjnym. Następnie są wytwarzane i podawane ze stałą prędkością cząstki aerozolu cieczy do układu pomiarowego. W czasie przepływu aerozolu cieczy są określane zmiany oporów przepływu na każdej próbce wielostopniowego układu filtracji.

Sprawność filtracji w funkcji wymiarów cząstek dla danej próbki wielostopniowego układu filtracji określa się na podstawie pomiaru stężenia liczbowego cząstek aerozolu testowego „przed” i „za” badanym materiałem filtracyjnym. Po trzy próbki aerozolu cieczy są pobierane „przed” i „za” badanym materiałem filtracyjnym, z wykorzystaniem zestawu sond (10, 11) do poboru w sposób izokinetyczny, a następnie cząstki są zliczane za pomocą kondensacyjnego licznika (16) w przedziale średnic $40 \div 300$ nm (analyzer ruchliwości elektrycznej cząstek LDMA, Model 3080L), (15).

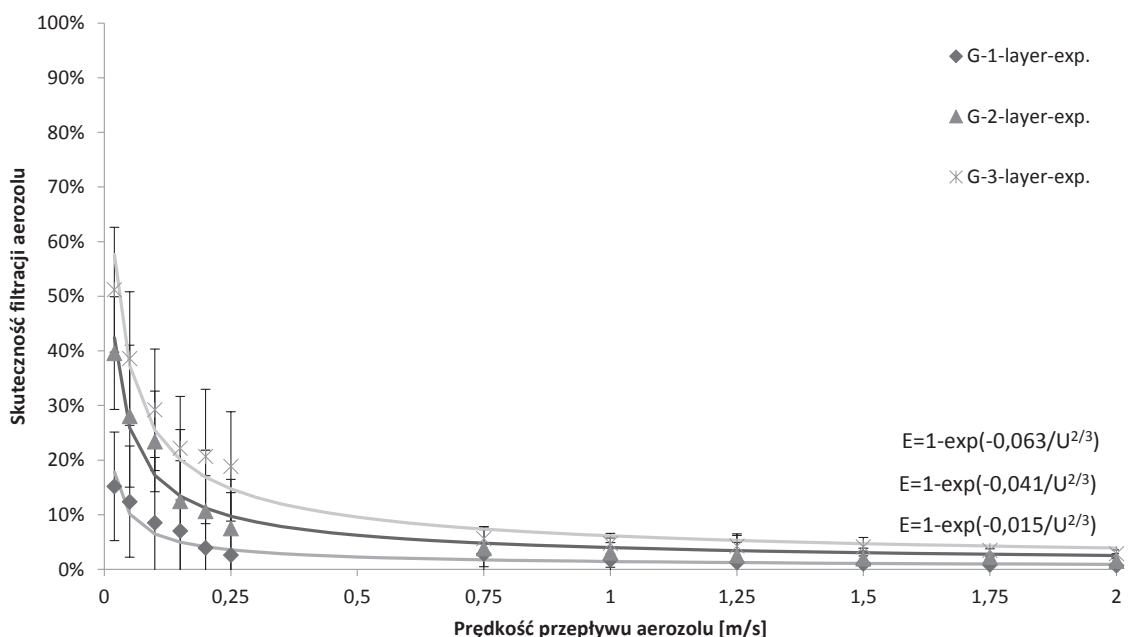
WYNIKI BADAŃ

Badania zmian skuteczności frakcyjnej w procesie filtracji aerozoli cieczy przeprowadzono dla włóknin i warstwowych kompozytów filtracyjnych składających się z włóknin wykonanych techniką *spun-lace* (oznaczonych symbolami G, I) oraz za pomocą techniki *melt-blown* (oznaczone symbolami: K2, K6, K12).

Ze względu na szeroki zakres parametrów procesowych i strukturalnych poniżej przedstawiono wyniki badań dla pojedynczych włóknin oraz dwu- lub trójwarstwowych kompozytów włókninowych K, G i I.

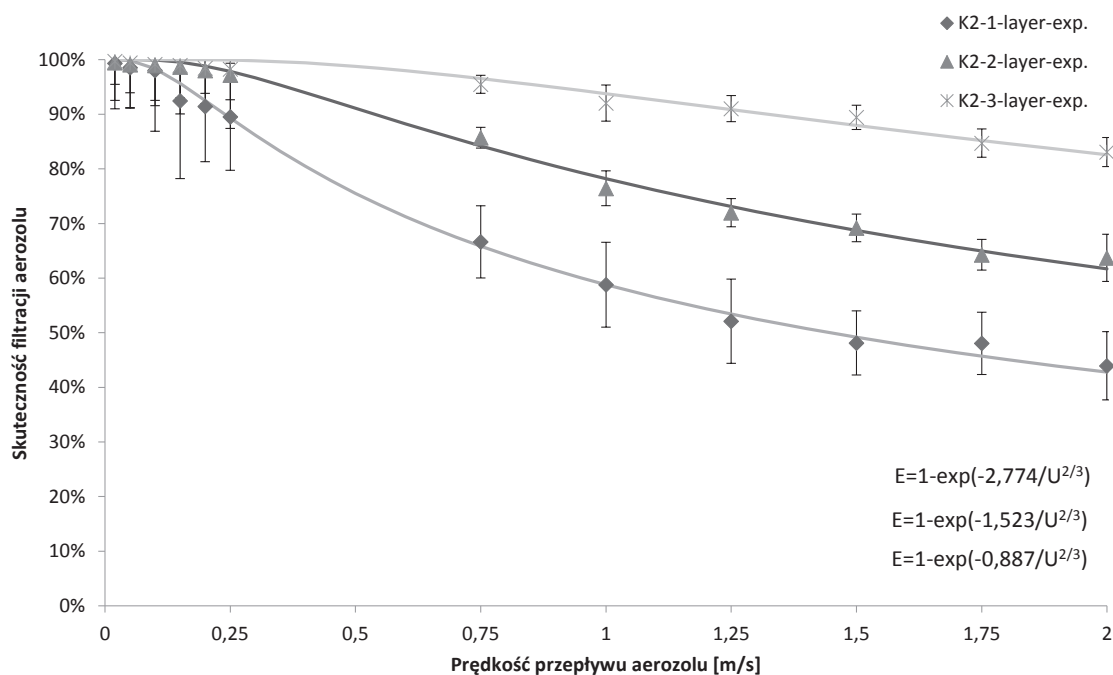
Zmiany całkowitych skuteczności filtracji w zależności od prędkości przepływu aerozolu

przez warstwowe kompozyty włóknin zamieszczono na rycinach: 5., 6., 7., 8. Na rycinach zostały porównane przebiegi zmian całkowitej skuteczności filtracji (obliczone z teorii filtracji aerozoli) z wartościami całkowitej skuteczności filtracji aerozolu przez warstwowe kompozyty włóknin otrzymanymi na drodze eksperymentalnej. Skonfrontowano doświadczalne wyniki badania zmian skuteczności filtracji aerozolu przez warstwowe kompozyty włóknin z przebiegami określonymi zgodnie z obowiązującym równaniem 1 dla obszaru przepływu laminarnego i burzliwego.



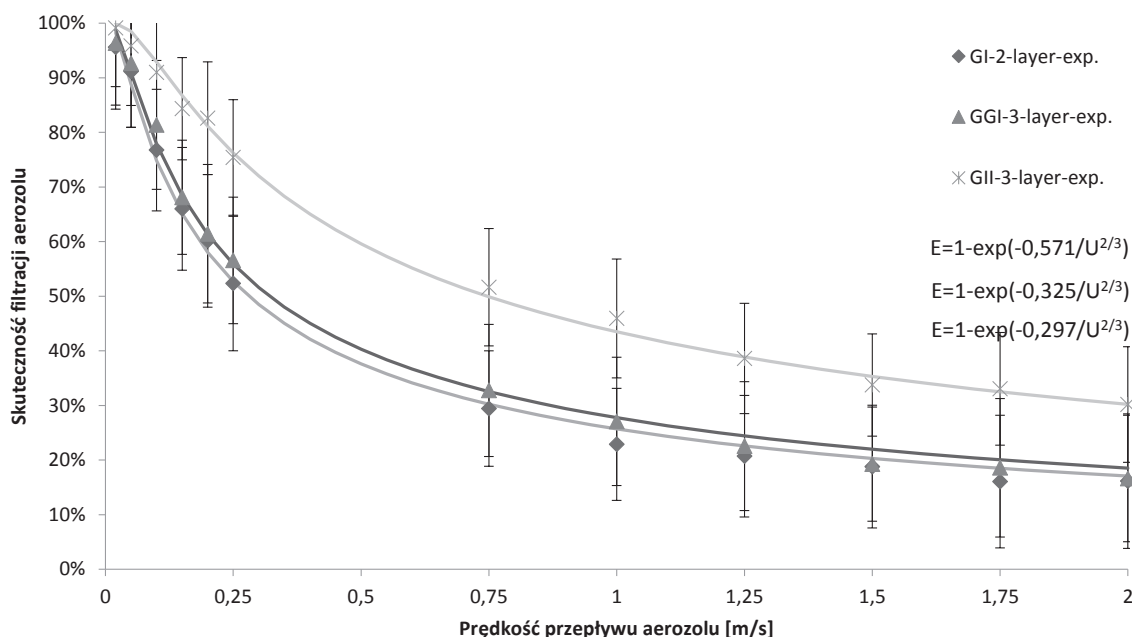
Ryc. 5. Porównanie zmian całkowitej skuteczności filtracji w funkcji prędkości przepływu aerozolu dla warstwowych kompozytów włókniny G otrzymanych na drodze eksperymentalnej i obliczonych dla równania 1 dla przepływu laminarnego i burzliwego

Fig. 5. Comparison of changes in total filtration efficiency as a function of aerosol velocity for multilayer "G" nonwoven composites obtained experimentally and calculated for equation 1 for laminar and turbulent flow

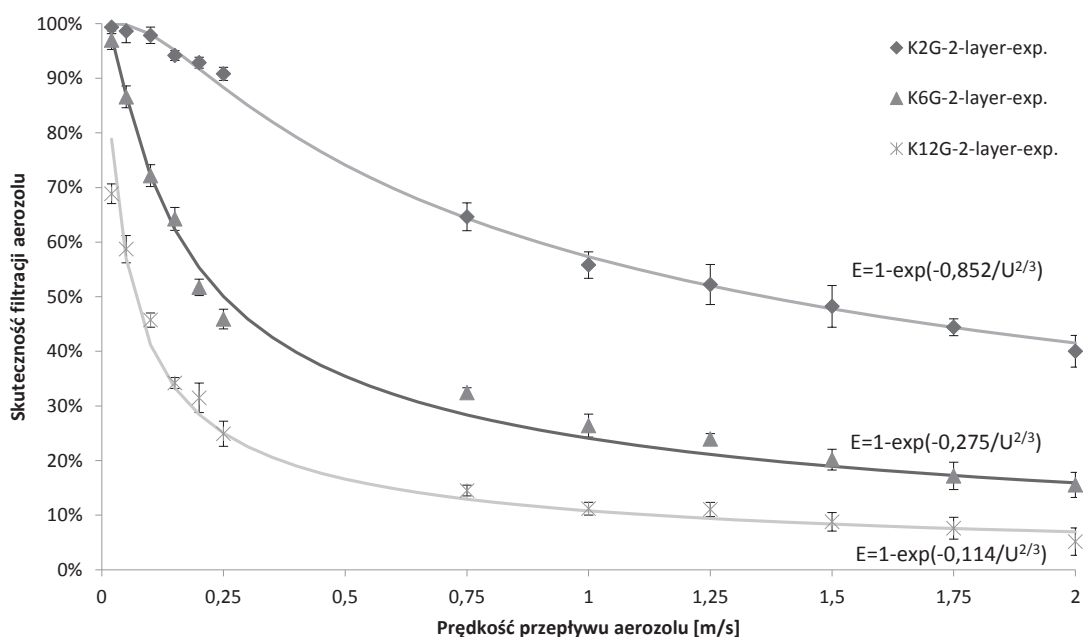


Ryc. 6. Porównanie zmian całkowitej skuteczności filtracji w funkcji prędkości przepływu aerozolu dla warstwowych kompozytów włókniny K2 otrzymanych na drodze eksperymentalnej i obliczonych dla równania 1 dla przepływu laminarnego i burzliwego

Fig. 6. Comparison of changes in total filtration efficiency as a function of aerosol velocity for multilayer "K2" nonwoven composites obtained experimentally and calculated for equation 1 for laminar and turbulent flow



Ryc. 7. Porównanie zmian całkowitej skuteczności filtracji w funkcji prędkości przepływu aerozolu dla warstwowych kompozytów włókniny GI otrzymanych na drodze eksperymentalnej i obliczonych dla równania 1 dla przepływu laminarnego i burzliwego
Fig. 7. Comparison of changes in total filtration efficiency as a function of aerosol velocity for multilayer "G" and "I" nonwoven composites obtained experimentally and calculated for equation 1 for laminar and turbulent flow



Ryc. 8. Porównanie zmian całkowitej skuteczności filtracji w funkcji prędkości przepływu aerozolu dla warstwowych kompozytów włókniny KG otrzymanych na drodze eksperymentalnej i obliczonych dla równania 1 dla przepływu laminarnego i burzliwego
Fig. 8. Comparison of changes in total filtration efficiency as a function of aerosol velocity for multilayer "K" and "G" nonwoven composites obtained experimentally and calculated for equation 1 for laminar and turbulent flow

INTERPRETACJA WYNIKÓW BADAŃ

Z analizy danych wynika, że zarówno dla obszaru przepływu laminarnego, jak i burzliwego zmiany skuteczności filtracji aerozolu przez warstwowe kompozyty włóknin wykazywały charakter funkcji wykładniczej:

$$E_{\text{calc}} = 1 - \exp\left(-a_2 \cdot \frac{1}{U^{2/3}}\right) \quad (3)$$

gdzie:

- E – całkowita skuteczność filtracji [%],
- U – prędkość liniowa powietrza [m/s],
- a_2 – stały współczynnik.

Względną standardową niepewność współczynników „a” (Δx_a) dla względnej różnicy współczynników wykładniczych (R_a) teoretycznych równań 1 i 2 oraz eksperymentalnego równania 3 charakteryzujących zmiany całkowitej skuteczności filtracji aerozolu w warstwowych kompozytach włóknin, obliczano na podstawie wzoru:

$$\Delta x_a = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n \left(\frac{a_i - a_j}{a_j}\right)^2}{n-1}} \quad (4)$$

gdzie:

- a_i – współczynnik wykładniczy funkcji określonej w teoretycznych równaniach 1 i 2 dla przepływu laminarnego i burzliwego [-],
- a_j – współczynnik wykładniczy funkcji określonej w eksperymentalnym równaniu 3 dla przepływu laminarnego i burzliwego [-],
- $R_a = \frac{a_i - a_j}{a_j}$ – względna różnica współczynników wykładniczych „a” teoretycznych i eksperymentalnych równań dotyczących zmian skuteczności filtracji aerozolu [%],
- n – numer pomiaru.

W tabelach 2. i 3. zestawiono wartości współczynników wykładniczych krzywych wyznaczone na podstawie równania 1., równania 2. i równania 3. dla warstwowych kompozytów włóknin podczas przepływu laminarnego i burzliwego.

Tabela 2. Porównanie wartości współczynników „a” z równania 1 i 3 dla homogenicznych kompozytów włóknin *spun-lace* i *melt-blown*
Table 2. Comparison of values of factors “a” for Eq. (1) and Eq. (3) for homogeneous “spun-lace” and “melt-blown” nonwoven composites

Typ kompozytu	Współczynnik, a_1	Współczynnik, a_2	Różnica
	Równanie (1)	Doświadczalny	R_a
G-1-layer (warstwowy)	0,01925180	0,01447013	33,0%
G-2-layer (warstwowy)	0,04050925	0,04065422	-0,4%
G-3-layer (warstwowy)	0,06131500	0,06333135	-3,2%
I-1-layer (warstwowy)	0,30210571	0,29238194	3,3%
I-2-layer (warstwowy)	0,56644933	0,54153236	4,6%
I-3-layer (warstwowy)	0,85144502	0,78866812	8,0%
K2-1-layer (warstwowy)	0,85613771	0,88656990	-3,4%
K2-2-layer (warstwowy)	1,64134485	1,52318774	7,8%
K2-3-layer (warstwowy)	2,86234941	2,77415708	3,2%

Tabela 3. Porównanie wartości współczynników „a” z równania 2 i 3 dla heterogenicznych kompozytów włóknin *spun-lace* i *melt-blown*
Table 3. Comparison of values of factors “a” for Eq. (2) and Eq. (3) for heterogeneous “spun-lace” and “melt-blown” nonwoven composites

Typ kompozytu	Współczynnik, a_1	Współczynnik, a_2	Różnica
	Równanie (2)	Doświadczalny	R_a
GI-2-layer (warstwowy)	0,30403316	0,29710776	2,3%
GGI-3-layer (warstwowy)	0,31208903	0,32500608	-4,0%
GII-3-layer (warstwowy)	0,55942087	0,57063466	-2,0%

cd. tab. 3 / Table. 3 cont.

Typ kompozytu	Współczynnik, a_1	Współczynnik, a_2	Różnica
	Równanie (2)	Doświadczalny	R_c
K2G-2-layer (warstwowy)	0,87178674	0,85175945	2,4%
K6G-2-layer (warstwowy)	0,25455061	0,27540837	-7,6%
K12G-2-layer (warstwowy)	0,11366114	0,11442701	-0,7%

W celu weryfikacji zmian całkowitej skuteczności filtracji aerozolu w warstwowych kompozytach włóknin (wyznaczonych z teoretycznych równań 1, 2) określano względną standardową niepewność i względną różnicę współczynników „a” na podstawie wzoru 4.

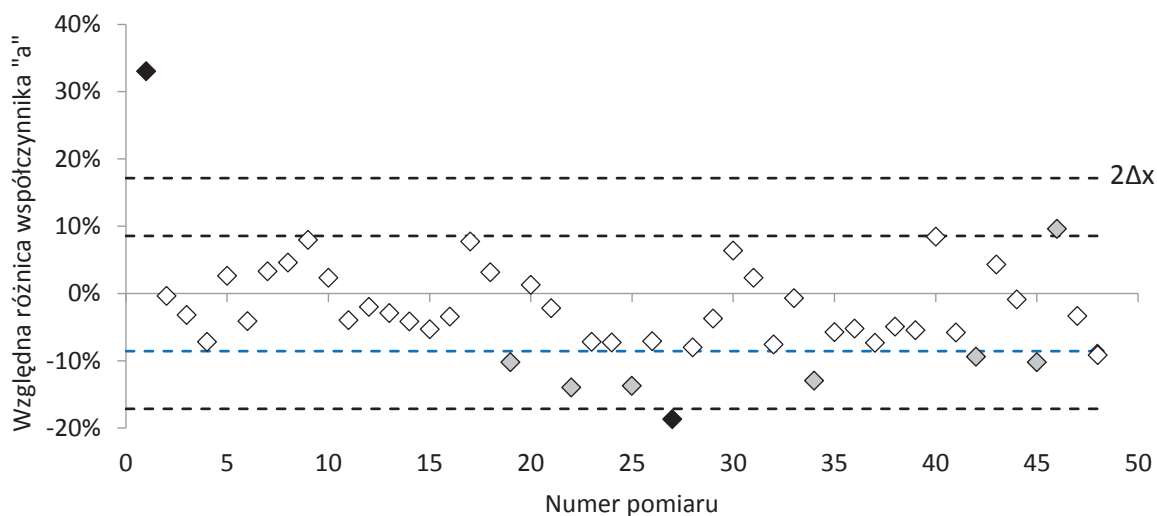
Na rycinie 9. podano parametry statystyczne porównania średnich wartości współczynników wykładniczych równań teoretycznych 1, 2 oraz eksperymentalnego równania 3 charakteryzujących zmiany całkowitej skuteczności filtracji aerozolu w kompozytach włóknin, tzn. względne wartości standardowej (1) i rozszerzonej (2) niepewności pojedynczego pomiaru przy założeniu, że średnia wartość różnicy współczynników wykładniczych „a” jest równa 0.

Teoretyczne równania określające zmiany całkowitej skuteczności filtracji aerozolu (równania 1, 2) mogą być stosowane dla większości badanych warstwowych kompozytów włókninowych z odchyleniem standardowym względem średniej (nie przekraczającym 10%).

W całym zakresie przepływu powietrza przez próbki kompozytów większość zmian całkowitej skuteczności filtracji aerozolu cieczy była niedoszacowana, lecz mieściła się w zakresie wartości względnej standardowej niepewności pojedynczego pomiaru wynoszącej $\pm 8,6\%$ (ryc. 9).

Podczas przepływu aerozolu cieczy warstwowe kompozyty włóknin wytworzone techniką *spun-lace* zarówno homogeniczne, jak i heterogeniczne charakteryzują się mniejszymi różnicami pomiędzy teoretycznymi i eksperymentalnymi wartościami współczynników wykładniczych krzywych charakteryzujących zmiany całkowitej skuteczności filtracji aerozolu (znaczniki bez wypełnienia, ryc. 9).

Średnia wartość względnej różnicy współczynników wykładniczych równań charakteryzujących zmiany całkowitej skuteczności filtracji aerozolu w kompozytach włóknin *spun-lace* wynosiła -0,9%, natomiast w kompozytach włóknin *melt-blown* -5,1%. Dodanie jako warstwy wstępnej włóknin *spun-lace* w heterogenicznych



Ryc. 9. Względna różnica wartości współczynników wykładniczych zmian całkowitej skuteczności filtracji aerozolu w kompozytach włóknin dla przepływu laminarnego i burzliwego

Fig. 9. Relative difference in exponential coefficients of changes in total aerosol filtration efficiency in nonwoven composites for laminar and turbulent flow

kompozytach włóknin *melt-blown* umożliwiało zmniejszenie średniej wartości $R_a = -3,6\%$.

Włókniny pneumatyczne otrzymywane metodą *melt-blown* odznaczały się przeważnie wartościami różnic współczynników wykładniczych „a” w zakresie pomiędzy wartością standardową i rozszerzonej niepewności pojedynczego

pomiaru (znaczniki z wypełnieniem koloru szarego, ryc. 9).

Najmniej stabilne zmiany całkowitej skuteczności filtracji aerozolu otrzymano dla jednowarstwowej włókniny G zbudowanej z włókien poliestrowych (znacznik z wypełnieniem koloru czarnego, ryc. 9, tab. 2).

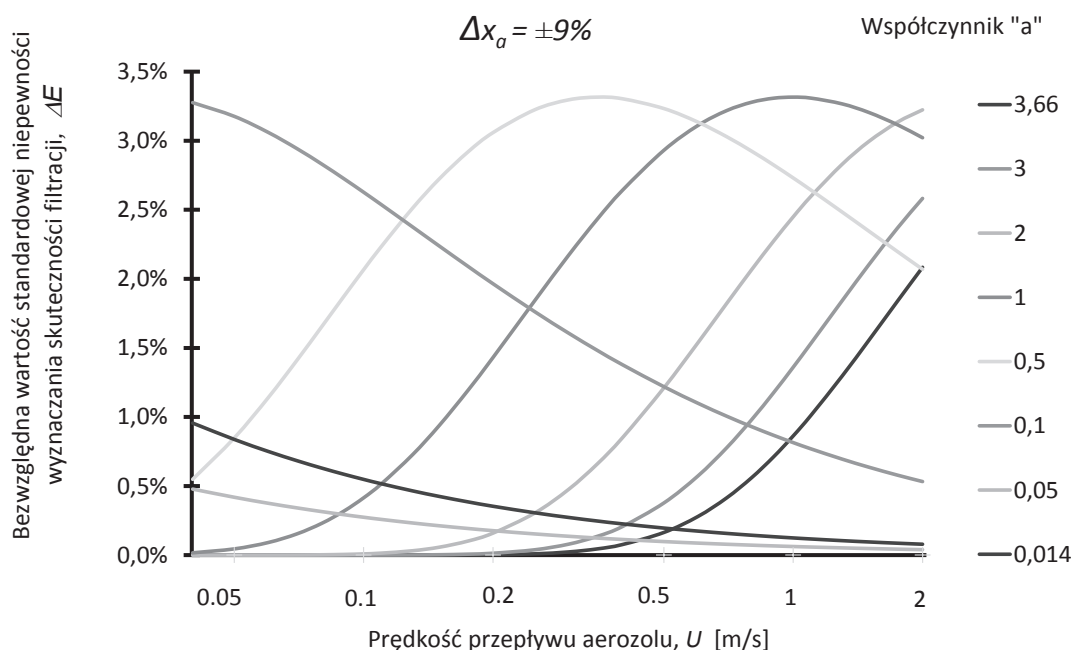
PODSUMOWANIE

Analiza wyników badań wykazała zależność skuteczności filtracji od parametrów strukturalnych badanych włóknin (przede wszystkim grubości) oraz takich parametrów procesowych, jak prędkość przepływu aerozolu testowego.

Zarówno dla obszaru przepływu laminarnego, jak i burzliwego zmiany skuteczności filtracji aerozolu cieczy przez warstwowe kompozyty włóknin wykazywały charakter funkcji wykładniczej.

Na podstawie danych przedstawionych na rycinie 10. teoretyczne równania określające

zmiany całkowitej skuteczności filtracji aerozolu mogą być stosowane dla większości badanych warstwowych kompozytów włókninowych przy względnej standardowej niepewności współczynnika „a₂” wynoszącej 8,6% oraz odpowiadającej jej bezwzględnej wartości standardowej niepewności wyznaczania skuteczności filtracji aerozolu (ΔE) nieprzekraczającej 3,5%.



Ryc. 10. Zmiany bezwzględnej standardowej niepewności wyznaczenia skuteczności filtracji aerozolu od standardowej niepewności współczynnika „a₂” dla różnych prędkości powietrza

Fig. 10. Changes in the absolute standard uncertainty of determining the effectiveness of aerosol filtration from the standard uncertainty factor “a₂” for different air velocities

INTRODUCTION

One of the most harmful agents for humans are aerosol particles present in the air. Taking action to eliminate the risk of air pollution in the workplace is determined by the requirements of European Union directives and regulations (Regulation ... 1997; 2002). In many technological processes, including high temperature processes, various types of oils are used as cooling agents. In mechanical processing, oils can be oxidised, contaminated with metal particles or combustion products, and new harmful substances can be generated. Liquid aerosols can also damage the electronic equipment used to operate machines and equipment. Exposure to liquid aerosols, in particular oil mist, may cause diseases such as chronic bronchitis, asthma, allergies and cancer among industrial workers.

In both Poland and the world, the primary workplace safety goal with oil-based coolants is to provide users with a workplace with protection against the risk of exposure to liquid aerosol particles. Currently, several scientific studies in the world and in Poland are conducted primarily in the field of assessment and elimination of the risk of aerosol particles in the human work environment using particle counting methods (Agranovski et

al., 2006; Clement and Dunnett, 2004; Mullins et al., 2003, 2004; Mullins and Kasper, 2005). Modern measuring techniques allow for the measurement of aerosol particle concentrations in a wide range of dimensions. The application of these methods allows for the optimisation of layered nonwoven composites used in mechanical processing with respect to the retention of dimensional fractions, starting with the nanometric dimensions.

In recent years, new solutions have been developed to eliminate or reduce the risk of human aerosol particles in the work environment (Albrecht et al., 2002; Gonzalez et al., 2016; Pośniak et al., 2020). Both in Poland and the world, layered nonwoven composites occupy a significant role among filtration materials used in mechanical ventilation systems (Brown, 1993; Charvet et al., 2017; Gac et al., 2018; Kamiński et al., 2020; Spurny, 1998).

Layered nonwoven composites make it possible not only to conveniently adjust the filter thickness, but also to select the appropriate structure in the filter cross-section to obtain the most efficient air purification from the polydisperse liquid aerosol (e.g. air filtration containing mineral oil mist).

LIQUID AEROSOL FILTRATION

Nonwoven composites are usually used as the last step in the process of purifying air from contaminants with liquid aerosols. These systems have an extensive cross-sectional structure and aerosol particles can be retained on the fibres within the structure.

One of the most important phenomena determining the optimal filtration properties of such composites is the interaction of aerosol particles with the filaments. The basic parameters describing the functioning of the nonwoven composite are flow resistance and fractional efficiency determined during the course of non-steady state of depth filtration, characterised by complex mechanisms of transport and retention of aerosol particles (Podgórski and Jackiewicz, 2008a; Spurny, 1998; Willeke and Baron, 2001). The method of movement

and retention of aerosol particles in the filter media is dependent on the simultaneous operation of several processes, including: evaporation from the airflow, recoil condensation, fibre condensation and drainage (Agranovski and Braddock 1998; Conder and Liew, 1989; Earnest, 2000; Leith 1999, 2000; Payet et al., 1992; Raynor and Ziebold, 2000).

According to the classical theory of filtration of liquid aerosols through filter nonwoven media, the movement of aerosol particles in the filtration layers may occur as a result of molecular diffusion, particle inertia, direct attachment, gravitational effect and electrostatic forces. The mechanisms of aerosol particle deposition are presented in Figure 1.

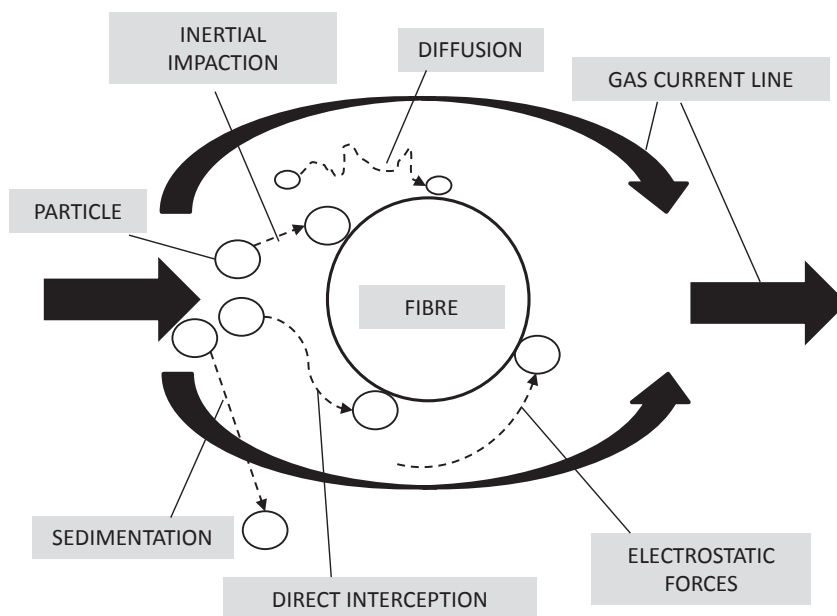


Fig. 1. Mechanisms of aerosol particles deposition

The filtration process of liquid aerosols differs from dust. Liquid aerosol particles do not form branches of dendrites, but penetrate into the free spaces between the filter elements. The process of liquid aerosol filtration under conditions of use is of a transient nature. This process changes both the filtering properties of the nonwoven composites and their structure over time. One of the most important phenomena in such systems is the interaction of liquid aerosol particles with filaments.

On the basis of the research of *Raynor and Leith* (1999), it was shown that the method of movement and retention of liquid aerosol particles in filter media is dependent on the simultaneous operation of several processes. The droplets moving along the filtration systems may evaporate in a flow of air. Research by *Raynor and Leith* (2000) confirmed the occurrence of the evaporation of liquid aerosol particles from filter materials with different structural parameters. Droplets removed from the air stream may accumulate and move into the lower layers of the filtration system as a result of drainage. At the same time, the evaporated aerosol particles can re-condense and condense on the fibres of the filter material.

The literature-based approach to predicting the effectiveness of filtration concerns first of all

the determination of the deposition efficiency on a single fibre.

The first models are based on the determination of unit efficiencies for individual deposition mechanisms of liquid aerosols in the initial filtration state for a non-charged filter. In turn, models describing the transient state of liquid aerosol filtration are based on the assumption that the particles uniformly fill the free spaces within the air filter structure (*Conder and Liew*, 1989; *Gougeon et al.*, 1996; *Payet et al.*, 1992). Nevertheless, the above-mentioned models do not include, among others, the observed decrease in the amount of liquid retained in the air filter structure during the filtration process. In addition, these models inaccurately describe changes in flow resistance and filtration efficiency when the liquid aerosol particles are trapped on the air filters.

Frising et al. (2005) created a model in which the filtering system was divided into several theoretical layers. The authors of the publication consider that the liquid aerosol particles during deposition in the air filter structure form a tube that shields the surface of a monofilament. As a result of such liquid aerosol deposition, the fibre diameter in the nonwoven composites increases. In turn, *Mullins and Kasper* (2006) have found in the course of experimental and theoretical studies that it is not

possible to form a film on a single fibre without the regular distribution of liquid aerosol particles on it. On the basis of the presented research results, the liquid aerosol particles irregularly deposited on the surface of the fibres and in the places where they intersected.

Qian et al. (2009) applied the numerical fluid mechanics (CFD) method to investigate the effect of air velocity, packing density and particle diameter on air flow resistance and particle capture efficiency. In this model, however, a realistic air filter structure was not used, but rather a series of parallel cylinders similar to those of Kuwabara (1959). In addition, there are large discrepancies between the theoretical and computational results for equations for Brownian motion of particles smaller than 500 nm. Using the Lattice-Boltzmann network gas method, Gac and Gradoń (2012) worked on the modelling of droplet movement with a diameter comparable to the fibre diameter. The simulations show the existence of two characteristic phenomena related to the heterogeneity of the surface of the fibre. An increase in the contact angle associated with the existence of 'gas cushions' has been observed between surface unevenness; this speeds up the movement of the liquid aerosol particles through the fibre. The second phenomenon is to engage the contact line on the unevenness of the surface, which leads to the elongation of the droplets and, as a consequence, the slowing of their movement relative to the motion on the smooth surface.

In King and Mullins (2011), the motion of small droplets of liquid in the filter was investigated, as well as their capture by fibres, the transformation of aerosol particles into a film of liquid on the fibres by coalescing mechanism, the disintegration of these coatings into smaller agglomerates, and the drainage of the filter. The model developed by Chavret et al. (2010) determines the filtration efficiency for individual particle sizes and not only for total penetration. In addition, the original approach is to take into account the fibre size distribution in the air filter instead of using the average diameter of the fibre to be used. As a result of the research, it was found that at the beginning of the filtration process, the flow resistance values are low and increasing slowly as there is little accumulation of liquid aerosol particles in the filter structure and there is no disturbance in the

air flow. Then, there is an exponential increase in the airflow resistance due to the accumulation of liquid in the filter and the formation of connections between the fibres. At the end of the flow resistance, the values are constant, which means there is a balance between the liquid flow at the filter input and the drain outlet.

Chavret et al. (2010) observed that minimal filtration efficiency was achieved for particles of 100 nm diameter. For the aerosol particles of less than 100 nm, the efficiency of filtration and its decrease for larger particles have been observed. In the study of Mead-Hunter et al. (2012), it was confirmed that the distribution of the liquid in the filter structure is heterogeneous. The liquid aerosol particles tend to accumulate on the intersections of individual fibres and other streaks in the structure, while on the surface of the fibres mainly responsible for the retention of liquid aerosol particles, only thin films of liquid are formed. Hence, it is important to limit the amount of liquid in the spaces between the fibres to avoid increasing the airflow resistance. The formation of thin film coatings on the fibres results in reduced or completely eliminated reflection of liquid aerosol particles on the flat fibre surfaces (Kasper et al., 2010). In addition, thin films of the liquid or the presence of aerosol particles on the fibres increase the diameter of the fibres, which affects the effectiveness of their further deposition.

The individual particles of the liquid aerosol forming the liquid film on the fibres have a cylindrical shape and are characterised by a small contact angle (Mullins et al., 2011). Bredin and Mullins (2012) investigated the effects of interference (interruptions in the generation of liquid aerosols) of airflows on the effectiveness of liquid aerosol filtration through various layered nonwoven filters. It turned out that in all of the examined filters there was a significant second stage of liquid aerosol particle loading, despite the fact that they had already reached the equilibrium state for continuous flow. The air filters showed a significant increase in flow resistance and degree of saturation until reaching the second equilibrium state. The authors attributed the second equilibrium state to the overlapping mechanism of the liquid within the filter structure during breaks and to additional clogging of the previously free spaces between the fibres.

In the study of *Mead-Hunter et al. (2013)* they applied numerical fluid mechanics for the comprehensive evaluation of nanometer-sized liquid aerosol filtration. It was found that the minimum filtration efficiency was within the range of mean particle diameters of 200 to 500 nm. *Muller et al. (2014)* found that the increase in liquid aerosol retention capacity was mainly due to the absorption of particles on the film of liquid produced earlier on the fibres. While the particles are absorbed by the liquid film, neither the filtration efficiency nor the airflow resistance increase significantly. No transport of particles to the back of the fibre was observed, which would increase the durability of the fibre-like joints.

According to the authors of individual studies on changes in the efficiency of liquid aerosol filtration, there is a need to bridge the gap between the experimental and theoretical work.

In accordance with the relationship (*Brown, 1993*), the total efficiency of liquid aerosol filtration can be determined for a given homogeneous (with the same structure in the cross-section) filter material (E_{total}) as:

$$E_{total} = 1 - \exp\left(-\frac{4 \cdot E \cdot L \cdot \alpha}{\pi \cdot d_{wl} \cdot (1 - \alpha)}\right) = 1 - \exp\left(-a_1 \cdot \frac{1}{U^{2/3}}\right) \quad (1)$$

where:

- L – thickness of the nonwoven fabric (m),
- E – efficiency of deposition of aerosol particle on a single fibre (-),

- α – packing density (kg/m^3),
- d_{wl} – average fibre diameter (m),
- U – linear velocity of aerosol (m/s),
- a_1 – constant factor (-).

The overall efficiency of liquid aerosol filtration (E_{total}) in heterogeneous multilayer composites (compositions with different configurations of 'x', 'y' and 'z' nonwovens) for both laminar and turbulent flow can be written as:

$$E_{total} = (E_x + E_y - E_x \cdot E_y) + E_z - E_{xy} \cdot E_z \quad (2)$$

where:

- $E_x = 1 - \exp(-a_{1,x} \cdot U^{-2/3})$ is efficiency of aerosol filtration in nonwoven fabric 'x' (%),
- $E_y = 1 - \exp(-a_{1,y} \cdot U^{-2/3})$ is efficiency of aerosol filtration in nonwoven fabric 'y' (%),
- $E_z = 1 - \exp(-a_{1,z} \cdot U^{-2/3})$ is efficiency of aerosol filtration in nonwoven fabric 'z' (%),
- $a_{1,x}$ – exponential factor of function for nonwoven 'x' (-),
- $a_{1,y}$ – exponential factor of function for nonwoven 'y' (-),
- $a_{1,z}$ – exponential factor of function for nonwovens 'z' (-), U is linear velocity of aerosol (m/s).

TEST MATERIALS

Five commercially available nonwoven fabrics made of synthetic polyester (PES) fibres with the use of 'spun-lace' technique (marked with the symbols G, I) and of polypropylene (PP) fibres with the use of called 'melt-blown' technique (marked with the symbols K2, K6, K12) were chosen. The nonwoven fabrics varied considerably from one another by structural parameters, such as: thickness (method according to PN-EN ISO 9073-2:2002), surface unit mass (analytical balance Sartorius type R160P,

Sartorius GmbH), fibre packing density (calculation method), average fibre diameter (system for the processing and analysis of microscopic images MULTISCANBASE, Computer Scanning Systems II) and porosity (Capillary Flow Porometer Model 4.900, Porous Materials, Inc.). 'Spun-lace' and 'melt-blown' nonwovens and layered composites were characterised by the range of structural parameters, as shown in Table 1.

Table 1. Structural characteristic of the spun-lace and melt-blown nonwovens and layered composites

Type of nonwoven and composites, sample name	Thickness, $\bar{L}\bar{s}, m \cdot 10^3$	Surface mass, $Mp, g/m^2$	Packing density, $\alpha\bar{s}, kg/m^3$	Total porosity, $\epsilon\bar{s}, \%$	Average fibre diameter, $d\bar{s}, \mu m$
G-1-layer <i>spun-lace</i> PES	5,31	282			
G-2-layer <i>spun-lace</i> PES	11,1	614	53,1	96,0	54,8±2,0
G-3-layer <i>spun-lace</i> PES	16,1	913			
I-1-layer <i>spun-lace</i> PES	2,16	532			
I-2-layer <i>spun-lace</i> PES	4,25	1106	247	81,6	16,5±0,6
I-3-layer <i>spun-lace</i> PES	6,51	1645			
K2-1-layer <i>melt-blown</i> PP	2,55	68,0			
K2-2-layer <i>melt-blown</i> PP	4,90	140	26,6	97,1	2,9±0,2
K2-3-layer <i>melt-blown</i> PP	8,54	210			
G1-2-layer <i>spun-lace</i> PES	7,00	828	118	91,2	
GGI-3-layer <i>spun-lace</i> PES	11,0	1141	104	92,2	54,8±2,0 16,5±0,6
GII-3-layer <i>spun-lace</i> PES	9,50	1365	144	89,3	
K2-G-2-layer <i>melt-blown</i> PP	7,76	372	47,9	95,9	2,9±0,2 54,8±2,0
K6-G-2-layer <i>melt-blown</i> PP	6,95	374	53,8	95,5	6,7±0,6 54,8±2,0
K12-G-2-layer <i>melt-blown</i> PP	6,54	385	58,9	95,1	12,4±0,4 54,8±2,0

The nonwoven fabrics of ‘spun-lace’ type were characterised by a structure in which the effect of fibres bonding into the fixed product was obtained as a result of water jets striking the web. Water jets of defined geometrical dimensions were pumped out of the nozzles under a given pressure. As a result of this, the fibres strongly knot about one another, the friction force between the fibres is increased and the material thickness grows to the required value, giving in effect a nonwoven fabric with the physical and chemical properties needed for the desired purpose.

The production of nonwoven fabrics with the ‘melt-blown’ method consisted in extruding molten polymer into elementary fibres of diversified thickness and length. The ‘melt-blown’ technique is a technology of direct, one-process production of nonwovens directly from a polymer; this process usually produces nonwovens made of fibres with a diameter of 0.5 μm to 30 μm . These nonwovens are characterised by significant air permeability, high filtration efficiency and low flow resistance.

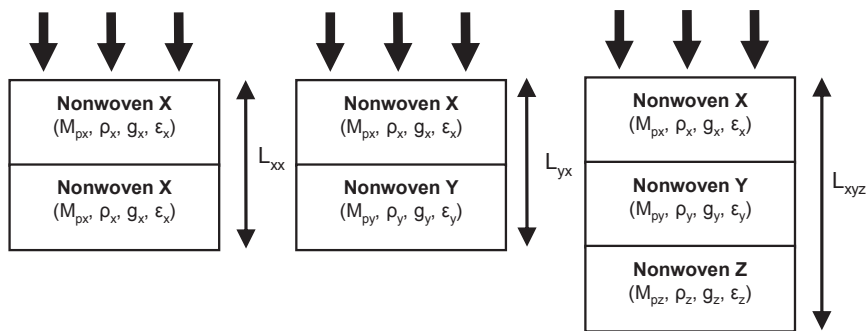


Fig. 2. Example diagram of a two-stage and three stage composition of spun-lace and melt-blown nonwovens

As part of the research, it was proposed to examine the filtration properties of multi-stage filtration composites consisting of the nonwoven fabrics described above. The filtration composites created mixed one-stage, two-stage and three-stage

compositions consisting of chosen nonwovens of various morphology. An example of a two- and three-layer composite of 'spun-lace' and 'melt-blown' nonwovens is shown in Figure 2.

EXPERIMENTAL SETUP AND METHOD

Tests were made in terms of oil mist emission and the relationship between changes of efficiency of liquid aerosol filtration and:

- structural parameters of multistage filtration systems, and especially:
 - thickness of the filtration layer in multilayer filtration composites,
 - the way of arranging filtration layers in multilayer filtration composites,
- process parameters of mechanical working simulated by:
 - liquid aerosol's velocity through the multilayer filtration composite.

As part of the research, the characteristics at the initial stage of changes of fractional efficiency were determined during the filtration process for multilayer composites of nonwoven fabric with various thickness and diversified structure in the cross-section.

The filtration efficiency of the selected layered filtration composites was tested with the bis (2-ethylhexyl) sebacic acid (DEHS) aerosol test.

The choice of test aerosol for simulating the emission of pollutants during mechanical working with the use of oil coolants was made on the basis of the EN 1822-1:2019 standard.

A diagram of the set-up for the testing of multilayer filtration composite properties is presented in Figure 3. The air is sucked in from the environment and it flows through electrical duct heater (7) DH-100/03 where it is heated to the required temperature with the use of thermostat TK-1 (8). A liquid aerosol of a specified concentration and dimensional distribution is produced in atomising generator AGF 2.0 iP (3). The size distribution of the DEHS aerosol particles is shown in Figure 4.

Using an in-line pump, the generated liquid aerosol particles are fed at a constant rate to the VKL-10 dilution system (5), reducing the aerosol concentration. The system enables a tenfold dilution of the aerosol by mixing with purified compressed air (6). Then, the mixture of test aerosol and air is fed to the test stand by means of a dosing unit (9).

The liquid aerosol's flow is forced by a duct fan VENT-100L (21) with a suppressor (20), with a continuous controller of rotational speed due to which a steady change of air volume stream value in the measurement system is possible. Moreover, the air volume stream in the measurement system is regulated by valves (4) integrated with the set of flow meters (19) and a control damper (18).

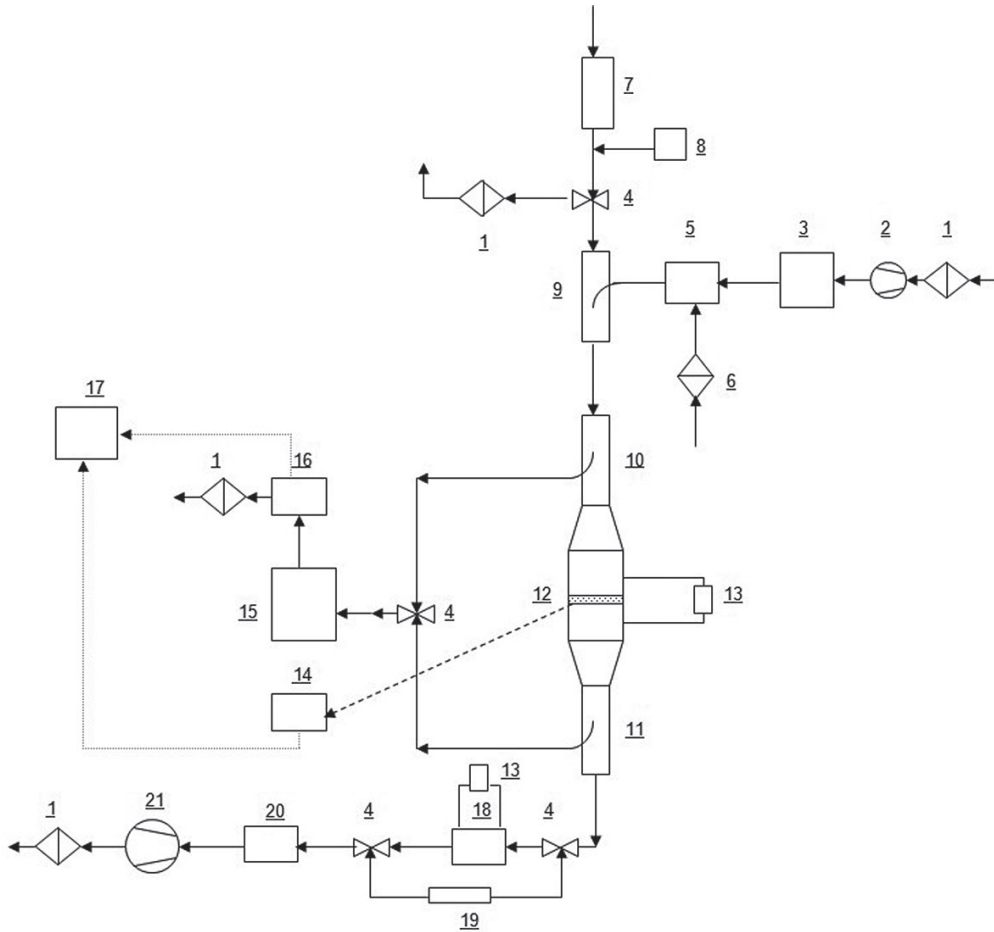


Fig. 3. Experimental setup (experimental setup was built as part of a research project carried out at the Institute)

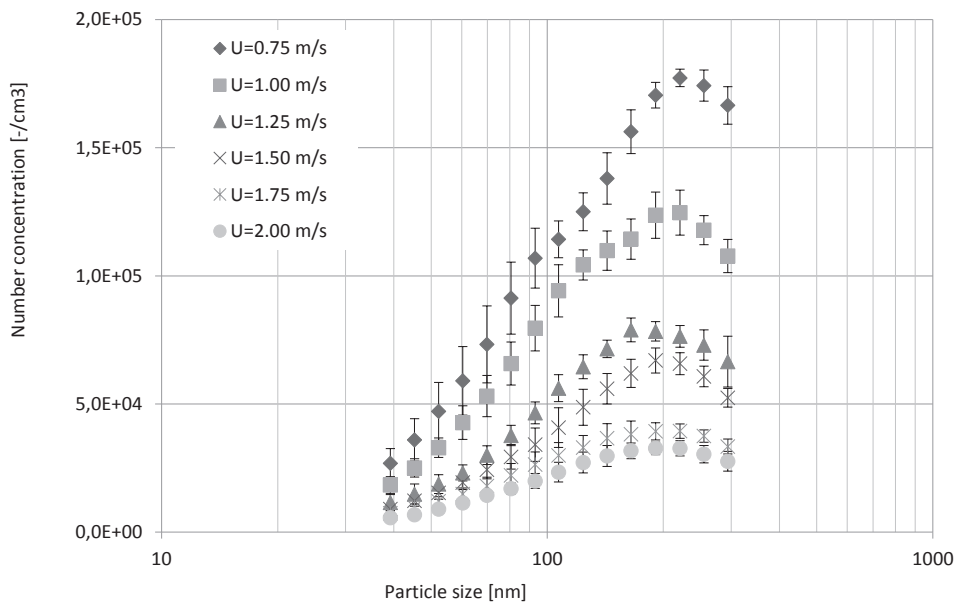


Fig. 4. Size distribution of DEHS aerosol particles

A sample of multilayer filtration composite is placed in the lower part of the measurement fixture (12) that is a central part of the liquid aerosol sampling unit. The filtration material is pressed by the upper movable part of the holder to its lower part with the use of spacer rings.

In the liquid aerosol sampling unit before (10) and after (11) the measuring holder (12), probes with replaceable heads with internal intake diameters in the range of 0.5 to 6.0 mm were used.

The initial flow resistance through the sample of multilayer filtration composite of known structural parameters should be measured before applying the liquid aerosol to the measuring system. Initial flow resistance testing is performed after the measuring system, including the electronic differential micro manometer (13), has reached stability. The measurement is made at various values of air flow speed through the measuring fixture. The air flow is forced by a duct fan (21) that is located downstream from the measuring fixture (12), and the speed value is regulated by means of valves (4) integrated with

the set of flow meters (19) and the control damper (18). For each nonwoven fabric sample, six measurements of pressure differences are carried out before and after the tested filtration material. Then liquid aerosol particles are produced and fed to the measurement system at a constant velocity. During the flow of liquid aerosol, changes in flow resistance on each sample of multilayer filtration composite are determined.

The filtration efficiency in the function of particle sizes for a given sample in the multilayer filtration composite is determined on the basis of the test aerosol particles' numerical concentration measurement before and after the tested filtration material. Three samples of liquid aerosol are taken before and after the tested filtration material with the use of probes (10, 11) designed for isokinetic sampling, and then the particles are counted with the use of a condensation particle counter (16) in the range of diameters from 40 to 300 nm (Long Differential Mobility Analyser (LDMA), Model 3080L) (15).

RESULTS

Studies of the fractional efficiency changes during the process of filtration of liquid aerosols were performed for nonwovens and the multilayer filtration composites consisting of nonwoven fabrics made with the use of a 'spun-lace' technique (marked with the symbols G, I), and with the use of a 'melt-blown' technique (marked with the symbols K2, K6 and K12). Due to the wide range of process and structural parameters, the results of tests for the single nonwovens and two- or three-layer filtration composites consisting of nonwoven fabrics K, G and I are presented below.

The changes in total filtration efficiency depending on the velocity of the aerosol flow

through the layered nonwoven composites are shown in Figures 5 to 8. The figures compare the overall filtration efficiency changes (calculated from the aerosol filtration theory) with the total aerosol filtration efficiency values of the multilayer nonwoven composites obtained experimentally. The experimental results of the study of variations in the efficiency of aerosol filtration by multilayer nonwoven composites with waveforms according to the applicable equation (1) for the laminar and turbulent flow area were tested.

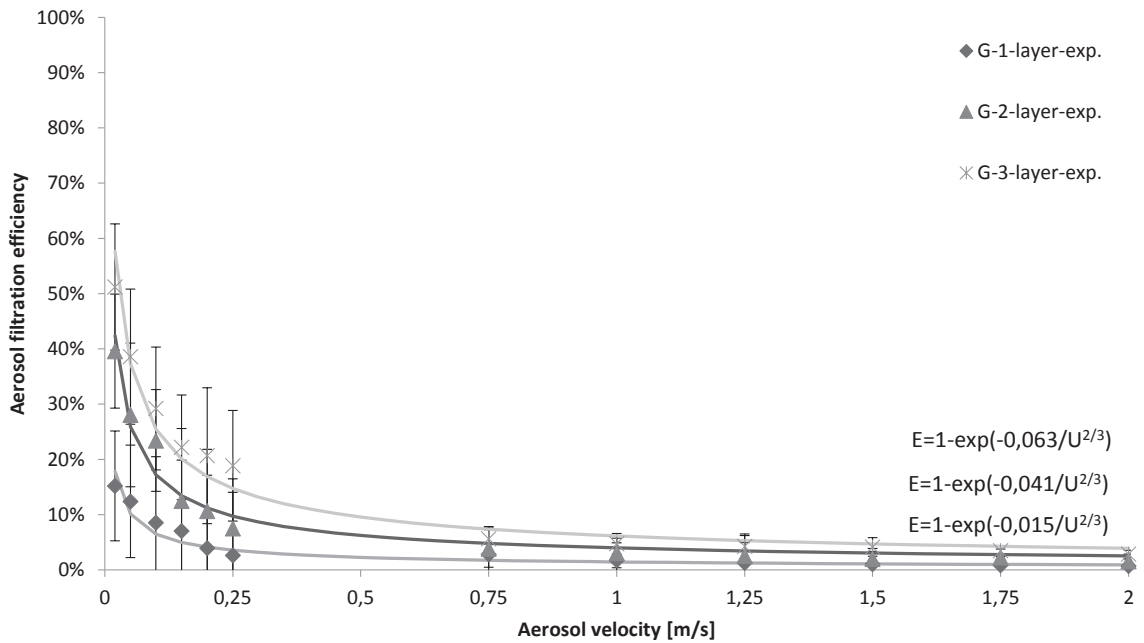


Fig. 5. Comparison of changes in total filtration efficiency as a function of aerosol velocity for multilayer 'G' nonwoven composites obtained experimentally and calculated for equation 1 for laminar and turbulent flow

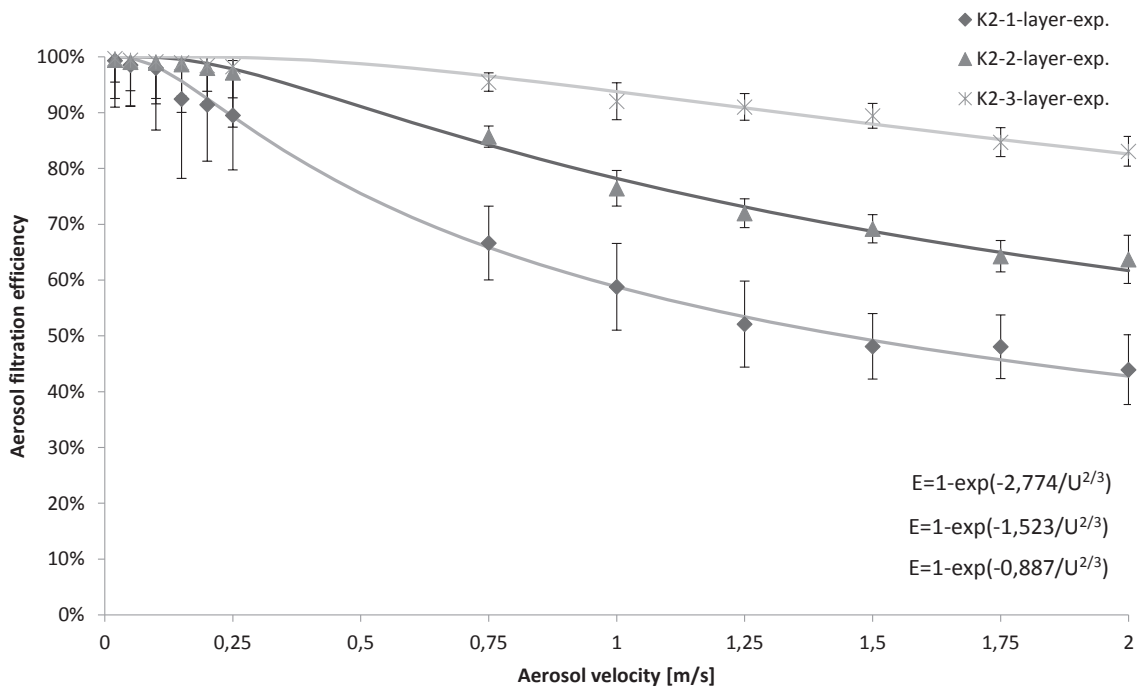


Fig. 6. Comparison of changes in total filtration efficiency as a function of aerosol velocity for multilayer 'K2' nonwoven composites obtained experimentally and calculated for equation 1 for laminar and turbulent flow

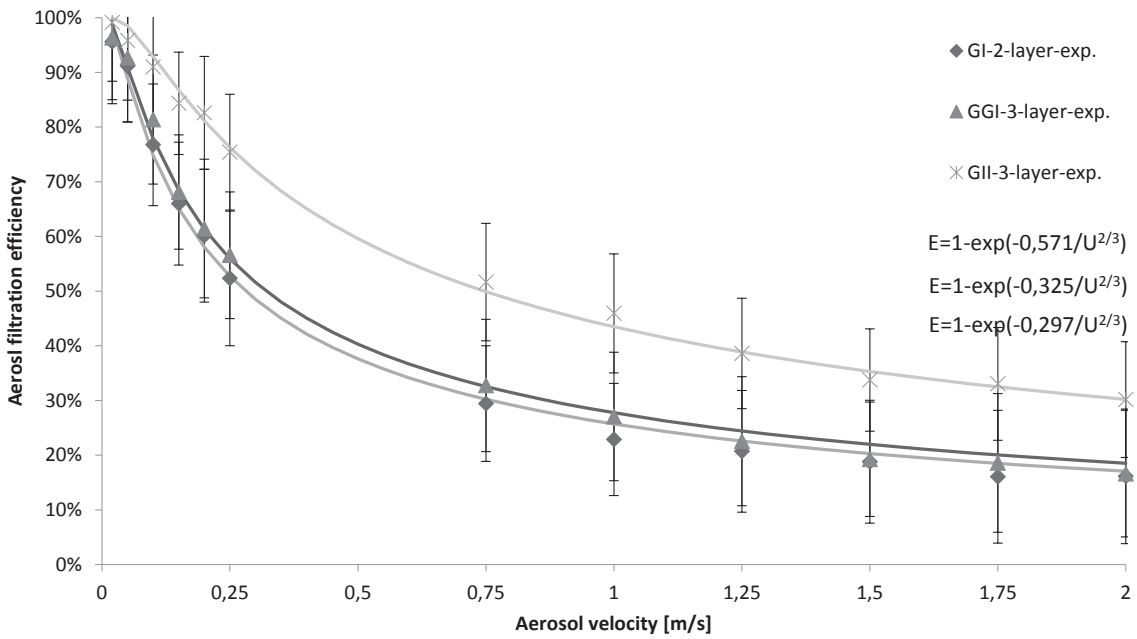


Fig. 7. Comparison of changes in total filtration efficiency as a function of aerosol velocity for multilayers 'G' and 'I' nonwoven composites obtained experimentally and calculated for equation 1 for laminar and turbulent flow

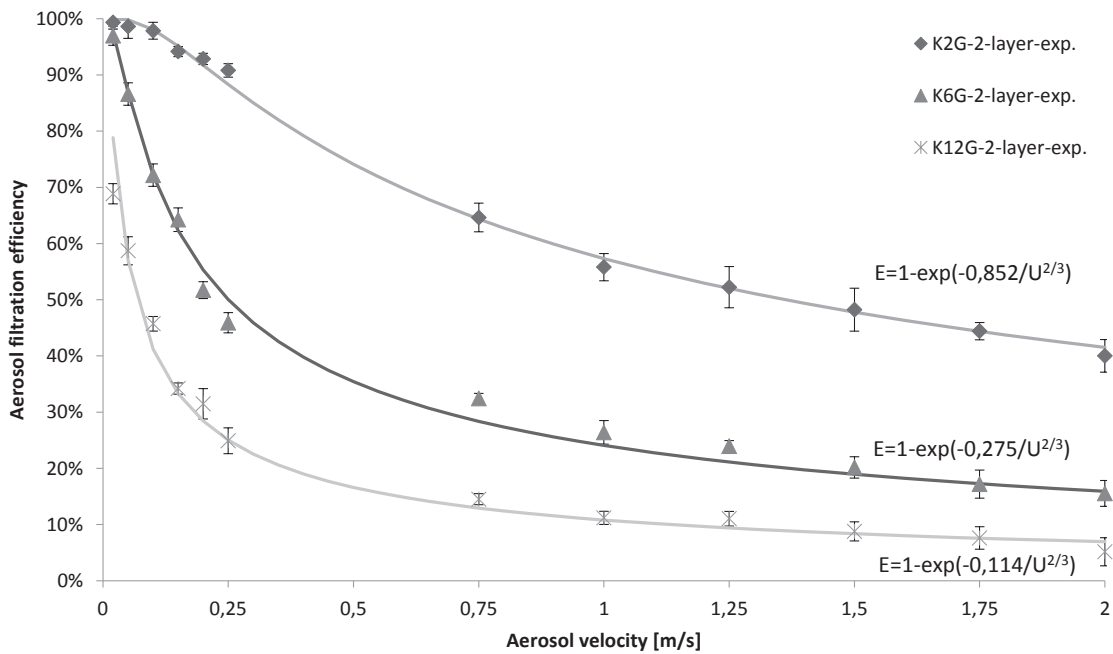


Fig. 8. Comparison of changes in total filtration efficiency as a function of aerosol velocity for multilayers 'K' and 'G' nonwoven composites obtained experimentally and calculated for equation 1 for laminar and turbulent flow

INTERPRETATION OF RESULTS

The data analysis shows that for both the laminar flow area and the turbulent change of the aerosol filtration efficiency through the multilayer nonwoven composites, the character of the exponential function is shown as:

$$E_{total} = 1 - \exp\left(-a_2 \cdot \frac{1}{U^{2/3}}\right) \quad (3)$$

where:

- E – total efficiency of filtration (%),
- U – linear velocity of aerosol (m/s),
- a_2 – constant factor.

The relative standard uncertainty of the coefficients ‘a’ (Δx_a) for the relative difference in the exponential coefficients (R_a) of the theoretical equation (1) and (2), and the experimental equation (3) characterising variations in the overall efficiency of aerosol filtration in the layered composite nonwovens were calculated from equation as:

$$\Delta x_a = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n \left(\frac{a_i - a_j}{a_j}\right)^2}{n-1}} \quad (4)$$

where:

- a_i – the exponential factor of the function defined in the theoretical equations (1) and (2) for laminar and turbulent flow (-),
- a_j – the exponential factor of the function defined in the experimental

equation (3) for laminar and turbulent flow (-),

- $R_a = \frac{a_i - a_j}{a_j}$ – relative difference of exponential coefficients ‘a’ of theoretical and experimental equations for changes in aerosol filtration efficiency (%),
- n – number of measurement.

Tables 2 and 3 show the values of the exponential coefficients of the curves determined from equations (1), (2) and (3) for laminated nonwoven composites during laminar and turbulent flow.

The relative standard uncertainty and relative difference of coefficients ‘a’ in accordance with formula 4 was determined to verify changes in the total aerosol filtration efficiency of the multilayer composites of nonwovens determined from the theoretical equations (1) and (2). Figure 9 presents the statistical parameters of the comparison of the mean exponential coefficients of the theoretical equations (1) and (2) and the experimental equation (3) characterising the changes in the total efficiency of the aerosol filtration in the nonwoven composites, i.e. the relative values of the standard ($\Delta\chi$) and the extended ($2\Delta\chi$). The average value of the exponential difference ‘a’ is 0.

Theoretical equations for changes in total aerosol filtration efficiency (equations (1) and (2)) can be used for most of the multilayer nonwoven composite materials tested with a standard deviation of not more than 10%.

Table 2. Comparison of values of factors “a” for Eq. (1) and Eq. (3) for homogeneous “spun-lace” and “melt-blown” nonwoven composites

Type of nonwoven composite	Coefficient a_1	Coefficient a_2	Difference
	Eq. (1)	Experiment	R_a
G-1-layer (layered)	0,01925180	0,01447013	33,0%
G-2-layer (layered)	0,04050925	0,04065422	-0,4%
G-3-layer (layered)	0,06131500	0,06333135	-3,2%
I-1-layer (layered)	0,30210571	0,29238194	3,3%
I-2-layer (layered)	0,56644933	0,54153236	4,6%
I-3-layer (layered)	0,85144502	0,78866812	8,0%
K2-1-layer (layered)	0,85613771	0,88656990	-3,4%
K2-2-layer (layered)	1,64134485	1,52318774	7,8%
K2-3-layer (layered)	2,86234941	2,77415708	3,2%

Table 3. Comparison of values of factors "a" for Eq. (2) and Eq. (3) for heterogeneous "spun-lace" and "melt-blown" nonwoven composites

Type of nonwoven composite	Coefficient, a_1	Coefficient, a_2	Difference,
	Eq. (2)	Experiment	R_a
GI-2-layer (layered)	0,30403316	0,29710776	2,3%
GGI-3-layer (layered)	0,31208903	0,32500608	-4,0%
GII-3-layer (layered)	0,55942087	0,57063466	-2,0%
K2G-2-layer (layered)	0,87178674	0,85175945	2,4%
K6G-2-layer (layered)	0,25455061	0,27540837	-7,6%
K12G-2-layer (layered)	0,11366114	0,11442701	-0,7%

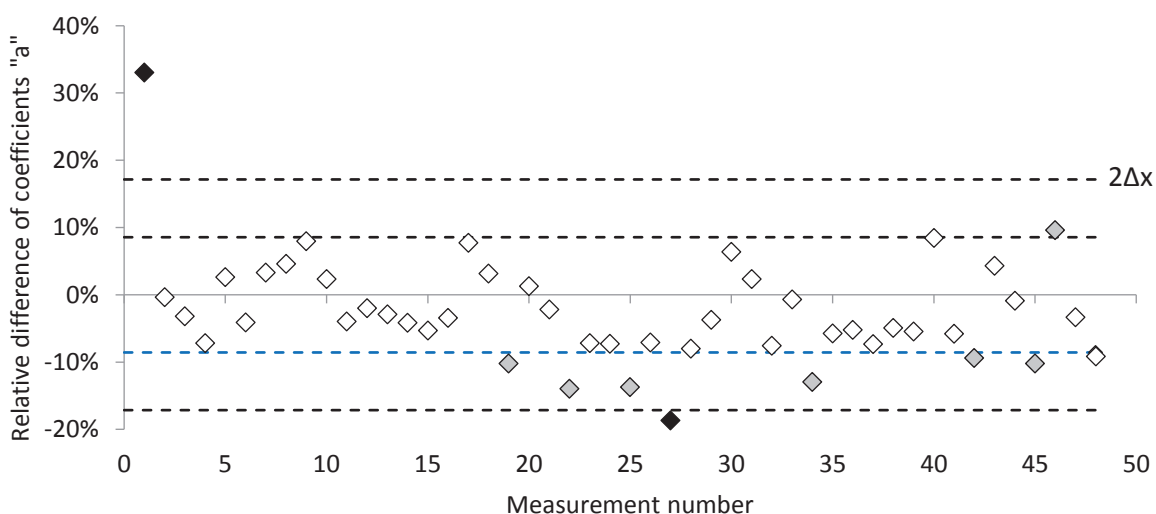
In the entire airflow range of the composite samples, most of the changes in total liquid aerosol filtration efficiency were underestimated, but were within the range of the standard uncertainty of a single measurement of $\pm 8.6\%$ (Fig. 9).

During aerosol flow, homogeneous and heterogeneous 'spun-lace' nonwoven composites are characterised by smaller differences between the theoretical and experimental values of the exponential coefficients of curves characterising changes in the overall efficiency of aerosol filtration (markers without fill, Fig. 9).

The mean value of the relative difference in the exponential coefficients of the equations for changes in the overall efficiency of aerosol filtration

in 'spun-lace' composites was -0.9% , while in 'melt blown' composites -5.1% . Adding 'spun-lace' nonwoven fabric in heterogeneous 'melt-blown' nonwoven composites made it possible to reduce the mean $R_a = -3.6\%$.

The 'melt-blown' nonwovens were typically characterised by the values of the difference coefficients 'a' in the range between the standard value and the expanded uncertainty of the single measurement (markers with a grey fill, Fig. 9). The least stable changes in total aerosol filtration efficiency were obtained for a single nonwoven G made of polyester fibres (markers with a black fill, Fig. 9, Table 2).

**Fig. 9.** Relative difference in exponential coefficients of changes in total aerosol filtration efficiency in nonwoven composites for laminar and turbulent flow

CONCLUSIONS

The analysis of the test results demonstrated the dependence of the filtration efficiency on the structural parameters of the tested nonwoven fabrics (mainly thickness) and on such process parameters as the test aerosol flow velocity.

Both for the laminar flow area and the turbulent change in the liquid aerosol filtration efficiency through multilayer nonwoven composites, they exhibited the character of an exponential function.

According to the data presented in Figure 10, the theoretical equations determining the changes in the total aerosol filtration efficiency can be used for most of the multilayer nonwoven composites tested with a relative standard uncertainty factor 'a₂' and the corresponding absolute standard value of the uncertainty for determining the effectiveness of aerosol filtration (ΔE) not exceeding 3.5%.

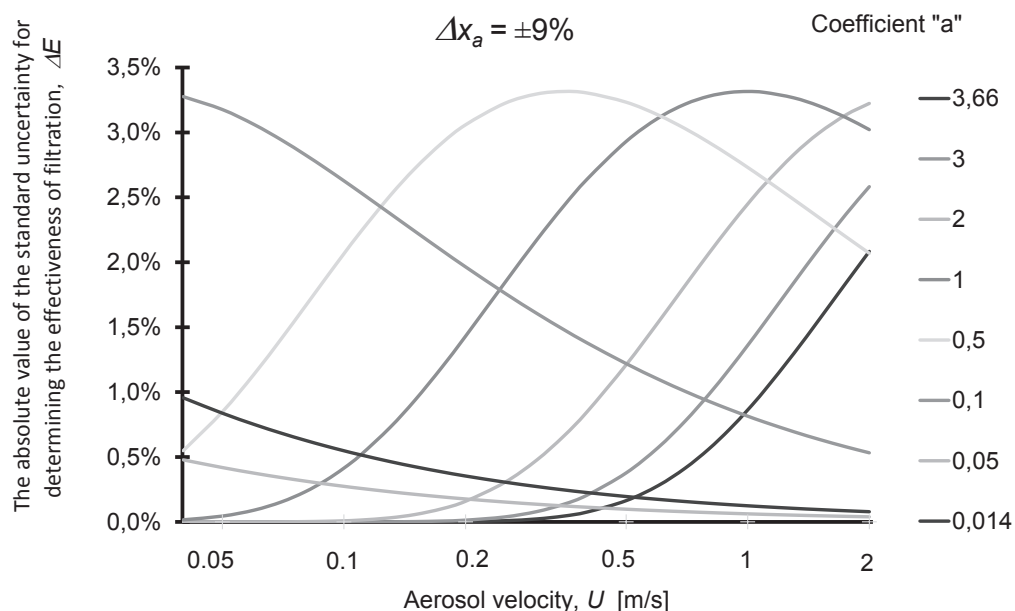


Fig. 10. Changes in the absolute standard uncertainty of determining the effectiveness of aerosol filtration from the standard uncertainty factor 'a₂' for different air velocities

PIŚMIENICTWO / REFERENCES

Agranovski I.E., Boskovic L., Altman I.S. i in. (2006). Filtration of particles with different shapes on fibrous filters. Proceedings book of the Seventh International Aerosol Conference, 10-15 september 2006, St. Paul, Minnesota, USA, 328–329.

Agranovski I.E., Braddock (1998). Filtration of Liquid Aerosols on Wettable Fibrous Filters. *AIChE J.* 44(12), 2775–2783.

Albrecht W., Fuchs H., Kittelmann W. (2002). Nonwoven fabrics: raw materials, manufacture, applications, characteristics, testing processes. Wiley-VCH, Weinheim.

Bredin A., Mullins B.J. (2012). Influence of flow-interruption on filter performance during the filtration of liquid aerosols by fibrous filters. *Sep. Purif. Technol.* 90, 53–63.

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

Charvet A., Gonthier Y., Gonze E. i in. (2010). Experimental and modeled efficiencies during the filtration of a liquid aerosol with a fibrous medium. *Chem. Eng. Sci.* 65, 1875–1886.

Charvet A., Thomas D. (2017). Filtration of Liquid Aerosols, in: Thomas, D., Charvet, A., Bardin-Monnier, N., Appert-Collin, J.-C. (Eds.), *Aerosol Filtration*. Elsevier, 161–188.

Clement C.F., Dunnett S.J. (2004). A study of the effect of deposition on fibrous filter efficiency. *J. Aerosol Sci. II*, 771–772.

- Conder J.R., Liew T.P. (1989). Fine mist filtration by wet filters-II: efficiency of fibrous filters. *J. Aerosol Sci.* 20(1), 45–57.
- Earnest G.S. (2000). Fundamental study of filter loading with liquid aerosols, PhD Thesis, University of Minnesota.
- EN 1822-1:2019 High efficiency air filters (EPA, HEPA and ULPA). Part 1: Classification, performance testing, marking.
- Frising T., Thomas D., Bemmer D., Contal P. (2005). Clogging of fibrous filters by liquid aerosol particles: Experimental and phenomenological modeling study. *Chem. Eng. Sci.* 60, 2751–2762.
- Gac J.M., Gradoń L. (2012). Modeling of axial motion of small droplets deposited on smooth and rough fiber surfaces. *Coll. Surf. A.* 414, 259–266.
- Gac J., Jackiewicz-Zagórska A., Werner Ł., Jakubiak S. (2018). Numerical modeling of solid deposits reorganization during consecutive solid-liquid aerosol filtration. Influence on the dynamics of filtration efficiency. *J. Aerosol Sci.* 119 [https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2018.02.008].
- González L.F., Joubert A., Andrès Y., Liard M., Renner C., Coq L. Le (2016). Filtration performances of HVAC filters for PM10 and microbial aerosols — Influence of management in a lab-scale air handling unit. *Aerosol Sci. Technol.* 50, 555–567 [https://doi.org/10.1080/02786826.2016.1167833].
- Gougeon R., Boulaud D., Renoux A. (1996). Comparison of data from model fiber filters with diffusion, interception and inertial deposition models. *Chem. Eng. Comm.* 151, 19–39.
- Kamiński M., Gac J.M., Sobiech P., Kozikowski P., Jakubiak S. (2020). Filtration of aerosols containing graphite nanoparticles or their mixture with water droplets on single and multi-layer fibrous filters. *Sep. Purif. Technol.* 237, 116378 [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116378].
- Kasper G., Schollmeier S., Meyer J. (2010). Structure and density of deposits formed on filter fibers by inertial particle deposition and bounce. *J. Aerosol Sci.* 4, 1167–1182.
- King A., Mullins D.J. (2011). A new computational fluid dynamics solver to simulate capture, coalescence and drainage in coalescing filter media. [In:] 24th Annual Conference, American Filtration and Separations Society, Louisville, USA.
- Kuwabara S. (1959). The forces experienced by randomly distributed parallel circular cylinders or spheres in a viscous flow at small Reynolds numbers. *J. Phys. Soc. Japan*, 14(4), 527–532.
- Mead-Hunter R., Braddock R.D., Kampa D., Merkel N., Kasper G., Mullins B.J. (2012). The relationship between pressure drop and liquid saturation in oil-mist filters - predicting filter saturation using a capillary based model. *Sep. Purif. Technol.* 104, 12–129.
- Mead-Hunter R., King A.J.C., Kasper G., Mullins B.J. (2013). Computational fluid dynamics (CFD) simulation of liquid aerosol coalescing filters. *J. Aerosol Sci.* 61, 36–49.
- Mullins B.J., Agranovski I. E., Braddock R. D. (2003) Particle bounce filtration of particles on wet and dry filters. *Aerosol Sci. and Technol.* 37, 1–14.
- Mullins B.J., Agranovski I. E., Braddock R. D. (2004) Simultaneous capture of two types of aerosol (water/oil and solid/water) on fibrous filters. *J. Aerosol Sci.* II, 1239–1240.
- Mullins B.J., Braddock R.D., Agranovski I.E. (2011). Modelling droplet motion and interfacial tension in filters collecting liquid aerosols. *Mathematics and Computers in Simulation* 81 (2011) 1257–1271.
- Mullins B.J., Kasper G. (2006). Filtration of oil mists – Real-time measurement of filter saturation and drainage. Proceedings book of the International Aerosol Conference, Minneapolis, USA, 338–339.
- Müller T.K., Meyer J., Thébault E., Kasper G. (2014). Impact of an oil coating on particle deposition and dust holding capacity of fibrous filters. *Powder Technology* 253, 247–255.
- Payet S., Boulaud D., Madelaine G., Renoux A. (1992). Penetration and Pressure Drop of a HEPA Filter During Loading with Submicron Liquid Particles. *J. Aerosol Sci.* 23(7), 723–735.
- Podgórski A., Jackiewicz A. (2008a). Filtration of aerosol particles in polydisperse fibrous filters. I – Models formulation. Proceedings book of abstracts of EAC 2008, Saloniki, Grecja, 2008.
- Podgórski A., Jackiewicz A. (2008b). Modele filtracji nano-aerologii w polidispersyjnych filtrach włókninowych [Models of nanoaerosol filtration in polydisperse nonwoven filters]. *Inż. Ap. Chem.* 6, 41–42.
- Pośniak M., Zapór L., Oberbek P., Miranowicz-Dzierżawska K., Skowroń J., Jankowski T. (2020). Emerging chemical risks in the working environment. CRC Press / Taylor & Francis Group.
- Qian F., Zhang J., Huang Z. (2009). Effects of the operating conditions and geometry parameter on the fibrous filter. *Chem. Eng. Technol.* 32(5), 789–797.
- Raynor P.C., Leith D. (1999). Evaporation of accumulated multicomponent liquids from fibrous filters. *Ann. Occup. Hyg.* 43(3), 181–192.
- Raynor P.C., Leith D. (2000). The Influence of Liquid on Fibrous Filter Performance. *J. Aerosol Sci.* 31(1), 19–34.
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 30 października 2002 r. w sprawie minimalnych wymagań dotyczących bezpieczeństwa i higieny pracy w zakresie użytkowania maszyn przez pracowników podczas pracy (DzU 2002, nr 191, poz. 1596 z póź. zm.) [Polish legal act].
- Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy (DzU 1997, nr 129, poz. 844 z późniejszymi zmianami) [Polish legal act].
- Spurny K.R. (1998). Advances in aerosol filtration. Lewis Publishers.

Willeke K., Baron P.A. (2001). Aerosol measurement. Principles, Techniques and Applications. John Wiley & Sons, Inc.

Ziebold S.A. (2000). Demystifying mist eliminator selection. Chemical Engineering Magazine 5, 94–102.

Adres do korespondencji/Contact details:

dr inż. TOMASZ JANKOWSKI
e-mail: tojan@ciop.pl
Centralny Instytut Ochrony Pracy
– Państwowy Instytut Badawczy,
00-701 Warszawa, Czerniakowska 16
POLAND