



mgr KRZYSZTOF MAKOWSKI (ORCID: 0000-0001-9947-8693)  
 inż. OLIWIA OWCZAREK (ORCID: 0000-0003-0071-4591)  
 dr hab. inż. AGNIESZKA BROCHOCKA (ORCID: 0000-0003-3386-9629)  
 Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy  
 Kontakt: krmak@ciop.lodz.pl  
 DOI: 10.54215/BP.2023.08.16.Makowski

# Ocena skuteczności filtracji półmasek filtrujących wobec nanoaerozolu zredukowanego tlenku grafenu

Fot. ako photography/Bigstockphoto



W artykule przedstawiono wyniki badań skuteczności filtracji półmasek filtrujących klasy FFP2 i FFP3 wobec nanocząstek zredukowanego tlenku grafenu. Sprzęt ochrony układu oddechowego został wybrany spośród wielu produktów powszechnie dostępnych na rynku. Pomiar penetracji przeprowadzono z użyciem 0,02-proc. zawiesiny wodnej zredukowanego tlenku grafenu przy przepływie nanoaerozolu 95 l/min. Wartość penetracji odczytywano dla cząstek o wielkości do 100 nm. Przedstawione wyniki badań pokazują, że stosowana obecnie klasyfikacja półmasek filtrujących według normy EN 149:2001+A1:2009, oparta na standardowych aerozolach testowych, nie ma przełożenia na ochronę przed nanoaerozolami zredukowanego tlenku grafenu. W przypadku zbadanych półmasek filtrujących wartości penetracji nanocząstek zredukowanego tlenku grafenu dla większości próbek przekroczyły dopuszczalny zakres określony we wspomnianej normie. W związku z tym konieczne jest opracowanie wytycznych doboru sprzętu ochrony układu oddechowego przeznaczonych do stosowania w warunkach obecności nanocząstek, w tym zredukowanego tlenku grafenu.

**Słowa kluczowe:** zredukowany tlenek grafenu, tlenek grafenu, półmaska filtrująca, skuteczność filtracji, penetracja, nanocząstki grafenu, ochrona układu oddechowego

## Assessment of the filtration efficiency of the filtering half-masks against nano-aerosol of reduced graphene oxide

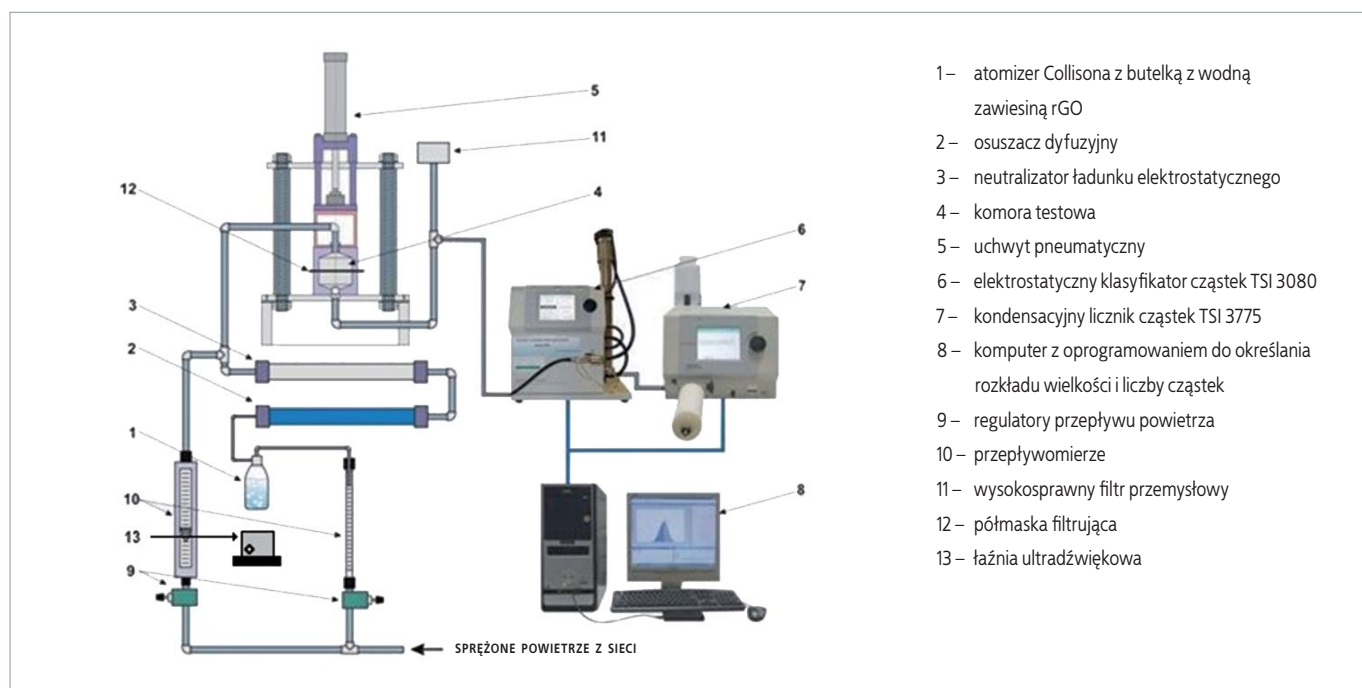
The article presents the assessment of filtration efficiency of filtering half mask FFP2 and FFP3 against nanoparticles of reduced graphene oxide. Respiratory protective devices were selected from among many commonly available on the market. Penetration measurements were carried out with a 0.02% water suspension of reduced graphene oxide at a nanoaerosol flow of 95 l/min. The penetration value was read for particles up to 100 nm in size. The presented research results show that the currently used classification of filtering respirators according to the EN 149:2001+A1:2009 standard, based on standard test aerosols, does not reflect the protection against reduced graphene oxide nanoaerosols. The penetration values against the graphene nanoparticles of the tested filtering half masks exceeded the admissible range of penetration according to the above-mentioned standard for most of the samples. Therefore, it is necessary to develop guidelines for the selection of respiratory protective equipment intended for use in the presence of nanoparticles, including reduced graphene oxide.

**Keywords:** reduced graphene oxide, graphene oxide, filtering half mask, filtration efficiency, penetration, graphene nanoparticles, respiratory protection

## Wstęp

Nanomateriały odkryto w latach 90. ub.w. Te materiały o wielkości cząstki do 100 nm znalazły wiele zastosowań technologicznych – jako nanoprozki, nanopowłoki, nanowypełniacze, nanododatki i nanokapsuły [1, 2]. Wykorzystuje się je m.in. w medycynie, elektronice i przemyśle spożywczym. Z drugiej strony udowodniono negatywne oddziaływanie nanomateriałów na funkcjonowanie komórek organizmów żywych. Nanomateriały grafenowe wywołują efekty cytotoksyczne i genotoksyczne, co zostało potwierdzone w licznych badaniach *in vitro* i *in vivo*. Ze względu na nanorozmiary związki te łatwo przenikają przez błony komórkowe organizmów. Dodatkowo ich szkodliwość zwiększają ostre i chropowate krawędzie. Zredukowany tlenek grafenu czy inne materiały grafenowe mogą się dostać do organizmu człowieka drogą inhalacyjną, przez połknięcie, penetrację przez skórę, wstrzyknięcie lub implantację [3-5]. Szczególnie narażone na negatywne oddziaływanie związków grafenowych są osoby pracujące przy produkcji nanocząstek grafenu. Ważne jest zatem, aby skuteczność sprzętu ochrony układu oddechowego była dopasowana do warunków panujących w środowisku pracy. Problem w tym, że w obecnym stanie prawnym nie ma określonych wymagań wobec sprzętu ochrony układu oddechowego (SOUO) przed nanoaerozolami.

Celem artykułu jest przedstawienie wyników badań dotyczących oceny skuteczności filtracji półmasek filtrujących wobec nanocząstek zredukowanego tlenku grafenu (rGO). Obecnie brak jest zdefiniowanej metodyki badań sprzętu przeznaczonego do ochrony przed nanoaerozolami. W związku z tym producenci SOUO nie mają możliwości oceny skuteczności produktów przeznaczonych do ochrony przed nanocząstkami zawieszonymi w powietrzu. Z powodu braku usystematyzowania wymagań i metod badań wobec SOUO niemożliwe jest zapewnienie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa na stanowisku pracy w środowisku zapyłonym nanocząstkami grafenu. Jednakże do określenia konkretnych wytycznych konieczne jest zdefiniowanie metodyki badawczej, według której prowadzone będą wszystkie badania mające na celu ustalenie dla SOUO stopnia ochrony przed nanocząstkami rGO.



- 1 – atomizer Collisona z butelką z wodną zawiesiną rGO
- 2 – osuszacz dyfuzyjny
- 3 – neutralizator ładunku elektrostatycznego
- 4 – komora testowa
- 5 – uchwyt pneumatyczny
- 6 – elektrostatyczny klasyfikator cząstek TSI 3080
- 7 – kondensacyjny licznik cząstek TSI 3775
- 8 – komputer z oprogramowaniem do określania rozkładu wielkości i liczby cząstek
- 9 – regulatory przepływu powietrza
- 10 – przepływomierz
- 11 – wysokosprawny filtr przemysłowy
- 12 – półmaska filtrująca
- 13 – łaźnia ultradźwiękowa

Rys. 1. Stanowisko do badania penetracji półmasek filtrujących przez nanocząstki zredukowanego tlenku grafenu (źródło: archiwum CIOP-PIB)

Fig. 1. Stand for testing the penetration of filtering half-masks by nanoparticles of reduced graphene oxide (source: CIOP-PIB archive)

Problemy związane z doбором odpowiedniego SOUO były zgłaszane do Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego (CIOP-PIB) przez producentów materiałów grafenowych oraz elektroniki wykorzystującej te materiały. Dlatego podjęto temat oceny skuteczności i metodyki badań SOUO wobec cząstek grafenu i jego pochodnych.

Najpopularniejszym SOUO, stosowanym przez pracowników do ochrony przed aerozolami (pyłem, dymem, mgłą), są półmaski filtrujące. Biorąc pod uwagę ich popularność, w artykule zaproponowano metodykę badawczą przeznaczoną do pomiarów penetracji oraz przedstawiono ocenę skuteczności filtracji półmasek filtrujących spełniających wymagania klasy FFP2 i FFP3 według normy EN 149:2001+A1:2009. W ramach badań

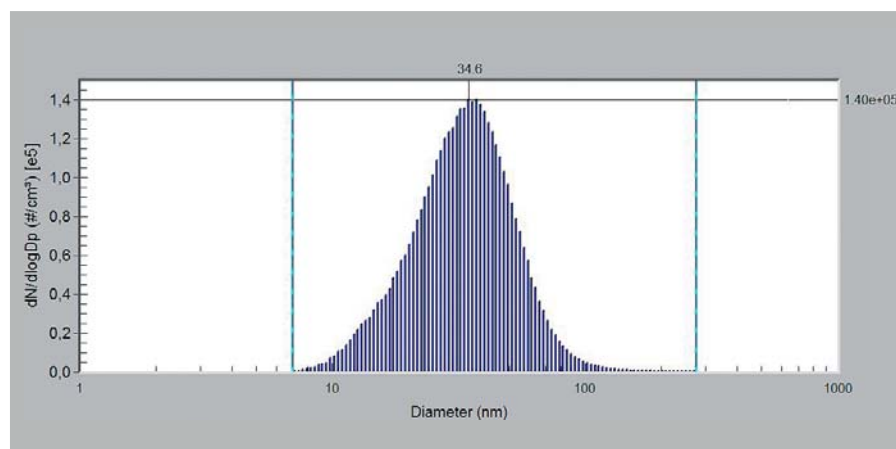
przewodzonych w CIOP-PIB wyznaczono rozkłady wymiarowe cząstek grafenu i jego pochodnych oraz scharakteryzowano różnice penetracji przez wybrane wiązki grafenowe. Z analizy pomiarów wynika, że najwyższą penetrację układów filtracyjnych wykazuje rGO. Na tej podstawie przeprowadzono badania skuteczności filtracji wobec nanocząstek rGO.

### Metodyka badania penetracji wobec nanoaerozolu rGO

Pomiary penetracji przez nanoaerozol rGO przeprowadzono zgodnie z metodyką badawczą opracowaną w ramach programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, realizowanego w CIOP-PIB.

Stanowisko badawcze przedstawiono na rys. 1. Sprężone powietrze zasilające układ było kierowane

nie jednocześnie przez dwa przepływomierze (10). Powietrze z pierwszego przepływomierza zasilalo atomizer Collisona (1), generujący aerosol. Butelka z wodną zawiesiną rGO podczas wykonywania pomiarów była wystawiona na oddziaływanie ultradźwięków (13). Żądaną wartość przepływu powietrza ustawiano za pomocą regulatorów (9). Wytworzony aerosol przechodził przez osuszacz dyfuzyjny (2) i neutralizator (3) ładunku elektrostatycznego, a następnie – po zmieszaniu z powietrzem o przepływie 95 l/min z drugiego przepływomierza – był kierowany do komory testowej (4). Po przejściu wygenerowanych kropelek z cząstkami rGO przez osuszacz i neutralizator oraz po wymieszaniu z dodatkowym powietrzem otrzymywano osuszone cząstki rGO, pozbawione wody z zawiesiny. Półmaski filtrujące (12) umieszczano w uchwycie pneumatycznym (5). Nanocząstki rGO przechodzące przez komorę testową rejestrowano za pomocą elektrostatycznego klasyfikatora cząstek TSI 3080 (6) i kondensacyjnego licznika cząstek TSI 3775 (7). Urządzenia pomiarowe TSI sprężone z komputerem z odpowiednim oprogramowaniem (8) pozwoliły na określenie rozkładu wielkości i liczby cząstek. Zakres pomiarowy zastosowanego wyposażenia pomiarowego wynosił od 7 nm do 270 nm i był podzielony na 90 klas. Powietrze zanieczyszczone aerozolem zredukowanego tlenku grafenu przed uwolnieniem do otoczenia przechodziło przez wysokosprawny filtr przemysłowy (11). W celu analizy penetracji nanocząstek (zgodnie z ich definicją) wyniki rozpatrywano do 100 nm. W badaniach wykorzystano aerosol uzyskany z 0,02-proc. wodnej zawiesiny rGO – rozkład wymiarowy osuszonych cząstek rGO przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Rozkład wymiarowy cząstek aerozolu zredukowanego tlenku grafenu wytworzonego z zawiesiny na bazie wody o stężeniu 0,02%  
Fig. 2. Dimensional distribution of particles of a reduced graphene oxide aerosol made from a water-based suspension with a concentration of 0.02%

## Obiekt badań

Badaniom poddano powszechnie dostępne półmaski filtrujące o klasie ochrony FFP2 i FFP3, klasyfikowane według wymagań normy EN 149:2001+A1:2009. Półmaski filtrujące to najpowszechniej wybierany SOUO. Służą one do ochrony przed aerozolami w fazie stałej i ciekłej. Wybrane półmaski filtrujące klasy FFP2 zestawiono w tab. 1, natomiast w tab. 2 – półmaski filtrujące klasy FFP3. Wytypowane modele spełniały kryterium klasy ochrony FFP2 lub FFP3 oraz kryterium dostępności na rynku, a ponadto różniły się konstrukcją (kształtem, rodzajem uszczelki, sposobem mocowania do twarzy użytkownika). W dalszej części artykułu zastosowano numerację próbek według tab. 1 i 2.

## Wyniki badań i ich analiza

Półmaski filtrujące przedstawione w tab. 1 i 2 poddano działaniu aerozolu rGO o stężeniu 0,02%. Pomiary wykonano na pięciu próbkach każdego modelu półmaski. Uśrednione wartości procentowe penetracji przy danej wielkości cząstki dla każdego modelu badanej półmaski filtrującej zaprezentowano na rys. 3 i 4.

Półmaski filtrujące oznaczone jako 1, 3 i 5 osiągnęły skuteczność filtracji na poziomie 94%, co odpowiada wymaganiom dla półmasek filtrujących klasy FFP2 według normy EN 149:2001+A1:2009. Ich skuteczność filtracji wynosi ponad 96% dla każdej rejestrowanej wielkości cząstki. W przypadku półmasek filtrujących oznaczonych numerami 2 i 4 wartość penetracji przekracza poziom maksy-

malny (6%) i wynosi odpowiednio 7,54% oraz 7%. Wspomniane półmaski mają minimalną skuteczność filtracji na poziomie 92%. Półmaska oznaczona jako 2 zawiera w swej konstrukcji dwie włókniny filtrujące, przy czym jedna z nich jest włókniną igłowaną, odpowiadającą za zatrzymywanie dużych cząstek. Z kolei półmaska oznaczona numerem 4 jest zbudowana tylko z jednej warstwy włókniny filtracyjnej i trzech warstw włókniny osłonowej.

Badania pokazały, że nie wszystkie półmaski filtrujące o klasie ochrony FFP2 tak samo skutecznie zatrzymują cząstki rGO. Trzy z pięciu badanych półmasek filtrujących zachowało wymagania klasy ochrony FFP2 na poziomie 6% wobec nanocząstek rGO.

Półmaski filtrujące oznaczone jako 1 i 3, wykazujące penetrację do 6%, to półmaski czaszowe zawierające w konstrukcji dwie warstwy włókniny

Tabela 1. Badane półmaski filtrujące o klasie ochrony FFP2

Table 1. Tested filtering half masks with protection class FFP2

Numer próbki	Charakterystyka półmaski	Klasa półmaski według EN 149:2001+A1:2009
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>półmaska filtrująca czaszowa, zgrzewana</li> <li>z zaworem wydechowym</li> <li>dwie taśmy nagłowia, przytwierdzone zszywką przy zgrzewie, brak regulacji</li> <li>brak uszczelki wewnętrznej</li> <li>zewnętrzny metalowy zacisk nosowy</li> <li>dwie warstwy włókniny filtrującej</li> <li>dwie warstwy włókniny osłonowej</li> </ul>	<p><b>FFP2</b> penetracja do 6% <b>NR</b> do jednorazowego użycia <b>D</b> odporna na zatkanie</p>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>półmaska filtrująca płaska, składana, zgrzewana</li> <li>z zaworem wydechowym</li> <li>dwie taśmy nagłowia, przytwierdzone do półmaski na plastikowych elementach, ograniczona regulacja</li> <li>wewnętrzna uszczelka nosowa</li> <li>zewnętrzny plastikowy zacisk nosowy (w środku zacisku dwa metalowe druciki)</li> <li>dwie warstwy włókniny filtrującej</li> <li>dwie warstwy włókniny osłonowej</li> </ul>	<p><b>FFP2</b> penetracja do 6% <b>NR</b> do jednorazowego użycia <b>D</b> odporna na zatkanie</p>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>półmaska filtrująca czaszowa, zgrzewana</li> <li>z zaworem wydechowym</li> <li>dwie taśmy nagłowia, umieszczone na płaskich elementach, ograniczona regulacja</li> <li>brak uszczelki wewnętrznej</li> <li>bez zacisku nosowego</li> <li>dwie warstwy włókniny filtrującej</li> <li>dwie warstwy włókniny osłonowej</li> </ul>	<p><b>FFP2</b> penetracja do 6% <b>NR</b> do jednorazowego użycia <b>D</b> odporna na zatkanie</p>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>półmaska filtrująca czaszowa, zgrzewana</li> <li>bez zaworu wydechowego</li> <li>dwie taśmy nagłowia, umieszczone na plastikowych elementach, ograniczona regulacja</li> <li>wewnętrzna uszczelka nosowa</li> <li>zewnętrzny plastikowy zacisk nosowy (w środku zacisku dwa metalowe druciki)</li> <li>jedna warstwa włókniny filtrującej</li> <li>trzy warstwy włókniny osłonowej</li> </ul>	<p><b>FFP2</b> penetracja do 6% <b>NR</b> do jednorazowego użycia <b>D</b> odporna na zatkanie</p>
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>półmaska filtrująca płaska, zgrzewana</li> <li>bez zaworu wydechowego</li> <li>dwie taśmy nagłowia, przytwierdzone zszywkami do półmaski, brak regulacji</li> <li>wewnętrzna uszczelka nosowa</li> <li>zacisk nosowy umieszczony pod włókniną osłonową półmaski</li> <li>cztery warstwy włókniny filtrującej</li> <li>dwie warstwy włókniny osłonowej</li> </ul>	<p><b>FFP2</b> penetracja do 6% <b>NR</b> do jednorazowego użycia <b>D</b> odporna na zatkanie</p>

filtracyjnej oraz dwie warstwy włókniny osłonowej. Półmaska filtrująca oznaczona numerem 5 jest sprzętem o płaskiej konstrukcji. Składa się aż z czterech warstw włókniny filtracyjnej i dwóch warstw włókniny osłonowej. Charakteryzuje się najwyższym wynikiem skuteczności filtracji wśród badanych półmasek klasy FFP2. W przypadku półmasek oznaczonej numerem 5 najwyższy wynik penetracji, o wartości 2,27%, odnotowano dla cząstek o wielkości 31,1 nm. Ogólnie wartości penetracji są indywidualne dla każdego modelu.

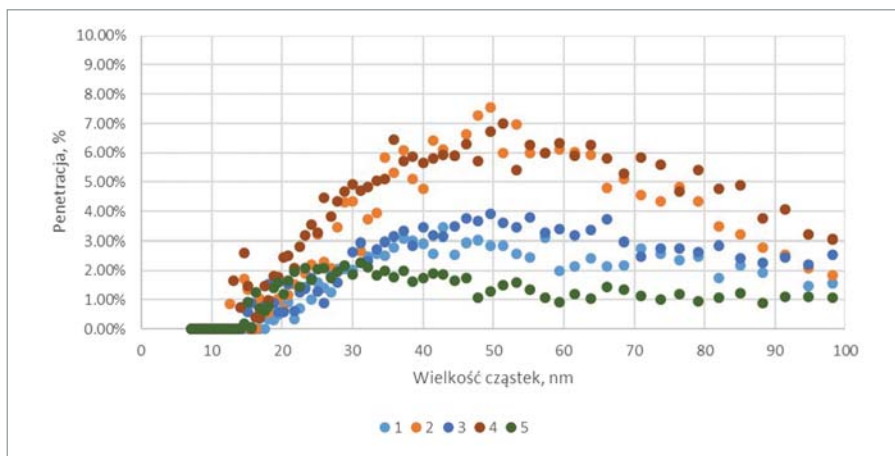
Na rys. 3 można zaobserwować, że dla pozostałych półmasek (oznaczonych numerami 1-4) najwyższe wartości penetracji odpowiadają cząstkom o wielkości od 45 nm do 55 nm.

Według normy EN 149:2001+A:2009 wszystkie półmaski klasy FFP3 powinny mieć skuteczność filtracji na poziomie minimum 99% wobec aerozoli standardowych. W przypadku zbadanych półmasek filtrujących klasy FFP3 wynik penetracji przez nanocząstki rGO jest w każdym przypadku wyższy niż 1%. Oznacza to, że żadna z wybranych

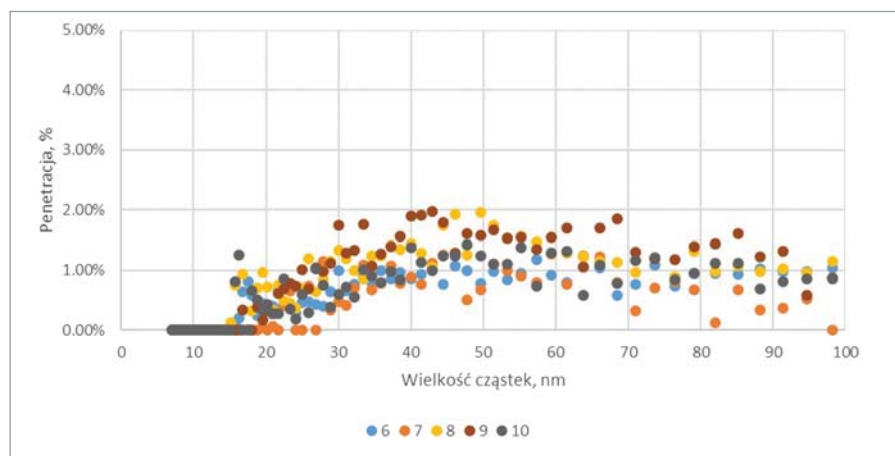
półmasek nie osiąga skuteczności filtracji na poziomie 99% wobec standardowych aerozoli na najwyższym poziomie ochrony wobec nanocząstek rGO. Jak pokazano na rys. 4, największą skuteczność filtracji, nie niższą niż 98%, wykazuje półmaska oznaczona jako 6. Najwyższa wartość penetracji dla tego typu półmasek wynosi 1,17%. Omawiana półmaska filtrująca to półmaska czaszowa składająca się z czterech warstw włókniny filtracyjnej i trzech warstw włókniny osłonowej. Pomiary penetracji w przypadku półmasek filtrujących klasy

Tabela 2. Badane półmaski filtrujące o klasie ochrony FFP3  
Table. 2. Tested filtering half masks with protection class FFP3

Numer próbki	Charakterystyka półmasek	Klasa półmasek według EN 149:2001+A1:2009
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>półmaska filtrująca czaszowa, zgrzewana</li> <li>z zaworem wydechowym</li> <li>dwie taśmy nagłowia, przytwierdzone zszywką przy zgrzewie, brak regulacji</li> <li>wewnętrzna uszczelka na całym obwodzie półmasek mającej przylegać do twarzy użytkownika</li> <li>zewnątrzny metalowy zacisk nosowy</li> <li>cztery warstwy włókniny filtrującej</li> <li>trzy warstwy włókniny osłonowej</li> </ul>	<p><b>FFP3</b> penetracja do 1%</p> <p><b>NR</b> do jednorazowego użycia</p>
7	<ul style="list-style-type: none"> <li>półmaska filtrująca płaska, składana, zgrzewana</li> <li>z zaworem wydechowym</li> <li>dwie taśmy nagłowia, przytwierdzone do półmasek na plastikowych elementach, ograniczona regulacja</li> <li>wewnętrzna uszczelka nosowa</li> <li>zewnątrzny plastikowy zacisk nosowy (w środku zacisku dwa metalowe druciki)</li> <li>cztery warstwy włókniny filtrującej</li> <li>trzy warstwy włókniny osłonowej</li> </ul>	<p><b>FFP3</b> penetracja do 1%</p> <p><b>NR</b> do jednorazowego użycia</p>
8	<ul style="list-style-type: none"> <li>półmaska filtrująca czaszowa, zgrzewana</li> <li>z zaworem wydechowym</li> <li>dwie taśmy nagłowia, na plastikowych elementach, ograniczona regulacja</li> <li>wewnętrzna uszczelka nosowa</li> <li>zewnątrzny plastikowy zacisk nosowy (w środku zacisku dwa metalowe druciki)</li> <li>cztery warstwy włókniny filtrującej</li> <li>dwie warstwy włókniny osłonowej</li> </ul>	<p><b>FFP3</b> penetracja do 1%</p> <p><b>NR</b> do jednorazowego użycia</p> <p><b>D</b> odporna na zatkanie</p>
9	<ul style="list-style-type: none"> <li>półmaska filtrująca czaszowa, zgrzewana</li> <li>z zaworem wydechowym</li> <li>dwie taśmy nagłowia, przyszyte do półmasek w okolicach zgrzewu, regulacja długości taśm zapewniająca odpowiednie dopasowanie do obwodu głowy użytkownika</li> <li>wewnętrzna uszczelka nosowa</li> <li>zewnątrzny plastikowy zacisk nosowy (w środku zacisku dwa metalowe druciki)</li> <li>trzy warstwy włókniny filtrującej</li> <li>dwie warstwy włókniny osłonowej</li> </ul>	<p><b>FFP3</b> penetracja do 1%</p> <p><b>NR</b> do jednorazowego użycia</p> <p><b>D</b> odporna na zatkanie</p>
10	<ul style="list-style-type: none"> <li>półmaska filtrująca płaska, zgrzewana</li> <li>bez zaworu wydechowego</li> <li>dwie taśmy nagłowia, umieszczone w tunelach z materiału półmasek, regulacja długości taśm zapewniająca odpowiednie dopasowanie do obwodu głowy użytkownika</li> <li>wewnętrzna uszczelka nosowa</li> <li>zewnątrzny plastikowy zacisk nosowy (w środku zacisku dwa metalowe druciki)</li> <li>trzy warstwy włókniny filtrującej</li> <li>dwie warstwy włókniny osłonowej</li> </ul>	<p><b>FFP3</b> penetracja do 1%</p> <p><b>NR</b> do jednorazowego użycia</p>



Rys. 3. Wykres penetracji półmasek filtrujących o klasie ochrony FFP2 przez nanoaerazol zredukowanego tlenku grafenu  
Fig. 3. Graph of penetration of filtering half masks with protection class FFP2 by nanoaerosol of reduced graphene oxide



Rys. 4. Wykres penetracji półmasek filtrujących o klasie ochrony FFP3 przez nanoaerazol zredukowanego tlenku grafenu  
Fig. 4. Graph of penetration of filtering half masks with protection class FFP3 by nanoaerosol of reduced graphene oxide

FFP3 oscylują wokół podobnych wartości. Badany sprzęt trzeciej klasy ochrony posiadał w konstrukcji minimum trzy warstwy włókniny filtracyjnej.

Porównując otrzymane wyniki penetracji w odniesieniu do poszczególnych klas półmasek filtrujących, można stwierdzić, że trzy z pięciu półmasek filtrujących klasy FFP2 osiągnęły skuteczność wobec nanocząstek na poziomie klasy drugiej, określonej w normie EN 149:2001+A1:2009 wobec aerozoli standardowych. Mimo że wszystkie badane półmaski filtrujące o klasie ochrony FFP3 mają skuteczność filtracji niższą niż 99%, to nadal wykazują lepsze parametry ochronne niż półmaski filtrujące FFP2. Wynika to z układu włókien filtracyjnych zastosowanych w konstrukcji półmasek. Półmaski filtrujące oznaczone jako 1 (FFP2) i 6 (FFP3) to półmaski zakupione od tego samego producenta. Z przeprowadzonych badań wynika, że na wartość penetracji nie wpływają elementy zewnętrzne konstrukcji półmasek filtrujących. Głównym czynnikiem decydującym o skuteczności filtracji jest budowa morfologiczna włókniny filtracyjnej zastosowana w półmasce.

## Wnioski

Przeprowadzone badania dowodzą, że półmaski filtrujące przeznaczone do ochrony przed

zagrożeniami stwarzanymi przez nanocząstki rGO w większości nie osiągają skuteczności ochrony wobec aerozoli standardowych, określonej dla klas FFP2 i FFP3. Obecne wymagania nie są więc wystarczające w przypadku nanoaerozolu rGO. W celu skutecznej ochrony przed nanocząstkami konieczne jest zdefiniowanie specyficznych zasad doboru SOUO w tym zakresie. Wartość penetracji wobec rGO zależy od wielkości cząstki i jest indywidualna dla każdego typu półmasek filtrujących – głównie z powodu różnej liczby warstw filtrujących stosowanych w tego typu SOUO. Im więcej jest warstw włókniny filtrującej, tym jej masa powierzchniowa jest większa, im większa jest powierzchnia filtrująca, tym większa skuteczność filtracji [6, 7]. Producenci półmasek filtrujących powinni przeprowadzać badania skuteczności filtracji dla nanocząstek i na tej podstawie określać wielofunkcyjność sprzętu ochronnego. Półmaski filtrujące klasy FFP2 i klasy FFP3, bez dodatkowych oznaczeń świadczących o przystosowaniu do filtracji nanocząstek, nie powinny być wykorzystywane w środowisku, w którym występuje zanieczyszczenie nanocząstkami rGO. Ze względu na układ włókien w badanym SOUO zaleca się stosowanie półmasek filtrujących klasy FFP3.

Na podstawie prowadzonych badań i realizacji zadania, którego jednym z wyników jest niniejszy artykuł, opracowano broszurę zawierającą wytyczne dotyczące ochrony układu oddechowego przez zagrożeniami grafenem i jego pochodnymi. Broszura jest dostępna na stronie internetowej CIOP-PIB:



## BIBLIOGRAFIA

- [1] ŚWIĄTEK-PROKOP J. Nanomateriały – zalety i zagrożenia. Częstochowa: Akademia im. Jana Długosza w Częstochowie, 2012, s. 47-54.
- [2] MARCANO D.C. i in. Improved Synthesis of Graphene Oxide. ACS Nano. 2010, 8(4): 4806-4814.
- [3] SONGFENG P., HUI-MING C. Carbon. Science Direct. 2012, 50(9): 3210-3228.
- [4] CHOI W. i in. Synthesis of graphene and its applications a review. Critical Review in Solid State and Materials Sciences. 2010, 35(1): 52-71.
- [5] SINGH Z. Applications and toxicity of graphene family nanomaterials and their composites. Nanotechnology, Science and Applications. 2016, 9: 15-28.
- [6] BROCHOCKA A., MAKOWSKI K. Półmaski filtrujące do ochrony układu oddechowego przed aerozolami zawierającymi nanocząstki. Przemysł Chemiczny. 2014, 93(1): 93-98.
- [7] BROCHOCKA A. Construction of Filtering Respiratory Protective Devices. [W:] K. Majchrzycka (red.), Nanoaerosols, Air Filtering and Respiratory Protection. Boca Raton: CRC Press, 2020, s. 73-122.

Opracowano i wydano na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2021-2022 w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rozwoju, Pracy i Technologii (do 12 sierpnia 2021 r.) oraz Ministerstwa Rodziny i Polityki Społecznej (od 12 sierpnia 2021 r.); (zadanie nr 3.SP.02.pt. „Opracowanie metodyki oceny skuteczności i zasad doboru sprzętu ochrony układu oddechowego do stosowania podczas produkcji grafenu płatkowego oraz jego form pochodnych”). Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.