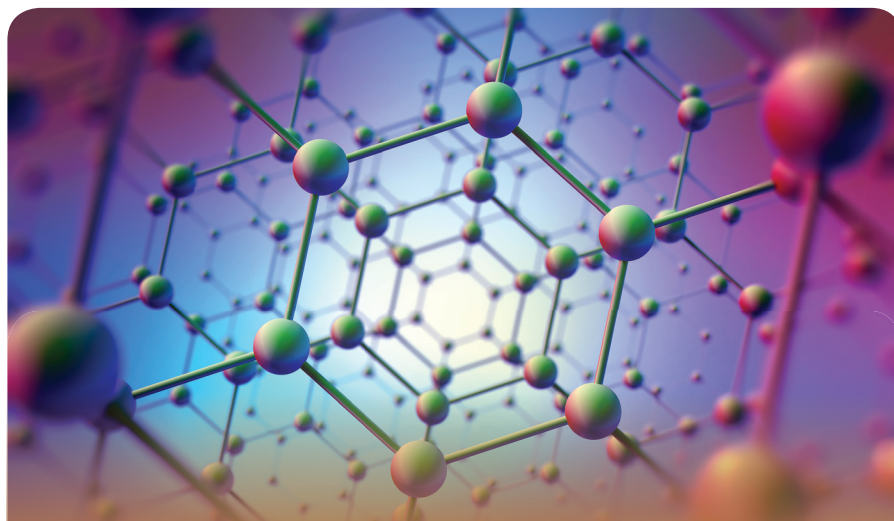




dr inż. TOMASZ JANKOWSKI (ORCID: 0000-0003-3620-9407)  
mgr inż. ADRIAN OKOŁOWICZ (ORCID: 0000-0002-2909-240X)  
Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy  
Kontakt: tojan@ciop.pl  
DOI: 10.54215/BP.2023.05.11.Jankowski

# Prototyp miernika aerozoli nanoobjektów – badanie weryfikacyjne w środowisku pracy

Fot. Yurchanka/Bigstockphoto



Stosowanie nanomateriałów może stanowić zagrożenie dla ludzkiego zdrowia. Z punktu widzenia zarządzania ryzykiem ważne jest posiadanie informacji ilościowych na temat stężenia aerozoli nanoobjektów w otaczającym środowisku. Z uwagi na wysoką cenę urządzeń klasy laboratoryjnej typu liczniki kondensacyjne lub liczniki elektrometryczne są one stosowane tylko do okresowych pomiarów stężenia liczbowego nanoobjektów. W związku z tym rośnie zapotrzebowanie na urządzenia, które umożliwiłyby monitorowanie stężenia aerozoli nanoobjektów, a jednocześnie byłyby na tyle tanie, żeby można je było instalować wszędzie tam, gdzie używa się nanomateriałów i gdzie aerozole nanoobjektów mogą powstawać w sposób spontaniczny. W artykule przedstawiono metody i rozwiązania techniczne pozwalające na wykonanie bezpośredniego pomiaru parametrów charakterystycznych dla nanoobjektów znajdujących się w powietrzu w obrębie stanowisk pracy, w tym opracowany przez autorów w ramach V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” niskokosztowy miernik aerozoli nanoobjektów. Zaprezentowano wyniki badań weryfikujących poprawność działania prototypu tego miernika w środowisku pracy związanym z obszarem nanotechnologii.

*Słowa kluczowe: miernik niskokosztowy, nanoobjekty, aerozole, ocena narażenia*

## Prototype of a nano-object aerosol meter – verification test in the work environment

The use of nanomaterials may pose a risk to human health. For risk management, it is important to have quantitative information on the concentration of nano-object aerosols in the surrounding environment. Due to the high price of laboratory-class devices, such as condensation counters or electrometric counters, they are used only for periodic measurements of the number concentration of nano-objects. Currently, there is a growing need for devices capable of monitoring the concentration of nano-object aerosols that are cheap enough to be installed where nanomaterials are used or aerosols can be spontaneously generated. The article presents methods and technical solutions for direct measurement of parameters characteristic of nano-objects workplaces in the air. One of the solutions is the prototype developed by the authors within the scope of the 5<sup>th</sup> stage of the National Programme “Improvement of safety and working conditions” a low-cost nano-object aerosol meter. The results of tests verifying the correct operation of the prototype of this meter in the work environment related to the area of nanotechnology are presented.

*Keywords: low-cost meter, nano-objects, aerosols, exposure assessment*

## Wstęp

Nanotechnologia, czyli zrozumienie i kontrolowanie materii o wymiarach od ok. 1 do 100 nm, ma coraz większy wpływ na codzienne życie ludzi zamieszkujących kraje uprzemysłowione. Procesy nanotechnologiczne (tj. takie, w których są stosowane nanomateriały, w szczególności w dziedzinie elektroniki, budownictwa, energetyki, transportu, medycyny, telekomunikacji, chemii, motoryzacji, włókiennictwa) można traktować jako źródło emisji pyłów o wymiarach nanometrycznych.

Nanomateriał to materiał pochodzenia naturalnego wytworzony przypadkowo bądź celowo, zawierający cząstki, które występują pojedynczo, jako agregaty lub aglomeraty (ang. *nano-objects and their aggregates and agglomerates* – NOAA), z których 50% lub więcej w liczbowym rozkładzie wymiarów ma co najmniej jeden zewnętrzny wymiar w zakresie 1-100 nm (nanoskala) [1, 2]. Biorąc pod uwagę definicję nanomateriału, w środowisku pracy można rozpatrywać następujące trzy rodzaje źródeł emisji cząstek o nanowymiarach [3]:

- źródła związane z wytwarzaniem nanomateriałów różnymi metodami, m.in. z zastosowaniem techniki polegającej na łączeniu pojedynczych atomów i cząstek w większe nanostruktury oraz techniki związanej z rozbijaniem dużych kawałków materiału w celu wygenerowania z nich wymaganych nanostruktur;
- źródła przypadkowe, z których emitowane są cząstki o nanowymiarach (nazywane też cząstkami ultradrobnyymi) – np. podczas podgrzewania posiłków w kuchenke mikrofalowej, spalania oleju napędowego w silnikach Diesla;
- źródła naturalne, tzn. napływ NOAA wraz z powietrzem atmosferycznym (ich stężenia i wymiary mogą się znacznie różnić w zależności od pory dnia), w tym spowodowane zdarzeniami występującymi w znacznej odległości od badanego pomieszczenia (np. wybuchem wulkanu).

Barczo szybki rozwój nanotechnologii umożliwiał otrzymanie materiałów o wyjątkowych cechach fizycznych, chemicznych i biologicznych [3]. *Engineered nanomaterials* (ENMs) lub *manufactured nanomaterials* (MNM), czyli nanomateriały zaprojektowane do określonego celu lub funkcji i nanomateriały wyprodukowane specjalnie w celu

uzyskania wybranych właściwości lub składu, znalazły zastosowanie m.in. w medycynie, ochronie środowiska, sporcie, budownictwie, energetyce, transporcie, telekomunikacji, kosmetyce, a także w przemyśle chemicznym, samochodowym, elektronicznym i tekstylnym. Wiele nanomateriałów – takich jak: nanorurki węglowe, sadza techniczna, tlenek tytanu czy tlenek cynku – powstaje w procesach produkcji wielkotonażowej [4].

Skala produkcji i szerokie spektrum zastosowań nanomateriałów daje obraz grup zawodowych, które są potencjalnie narażone na ich działanie. Opracowywanie, wytwarzanie i wprowadzanie do obrotu produktów nanotechnologii wiąże się z wieloma nowymi zagrożeniami w środowisku pracy, których rozmiar trudno jest obecnie oszacować. Nanoskala wpływa na zmianę wielu właściwości fizykochemicznych materiałów w porównaniu z ich odpowiednikami o większych wymiarach. Świadomość tego oraz rozumienie roli parametrów nanomateriałów (m.in. wielkości cząstek, kształtu, rozpuszczalności, stanu aglomeracji, modyfikacji powierzchni) w inicjowaniu toksycznych skutków są bardzo istotne punktu widzenia identyfikacji zagrożeń związanych ze stosowaniem nanomateriałów [5].

Stosowanie nanomateriałów stanowi potencjalne zagrożenie dla ludzkiego zdrowia [6]. Nanocząstki lub cząstki ultradrobne mogą się przedostać do płuc i pęcherzyków płucnych człowieka (co uznano za główną drogę narażenia na nanocząstki [7]), a następnie do układu krążenia człowieka, a nawet przekroczyć barierę krew-mózg [8].

Celem artykułu jest przedstawienie metod umożliwiających przeprowadzenie bezpośredniego pomiaru stężenia masowego (na podstawie założonej gęstości właściwej nanomateriałów) i stężenia liczbowego NOAA w powietrzu stanowisk pracy, a zwłaszcza zaprezentowanie opracowanego w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym rozwiązania w postaci niskokosztowego miernika aerozoli nanoobjektów, wykorzystującego technologie stosowane w czujkach dymu ze źródłem radioaktywnym. W artykule przytoczono wyniki badań weryfikujących działanie prototypu tego miernika w środowisku pracy związanym z obszarem nanotechnologii.

## Metody i rozwiązania techniczne stosowane do badania NOAA w środowisku pracy

Nanomateriały są bardzo różnorodną grupą substancji, dlatego trudno jest sformułować ogólne stwierdzenia dotyczące ich bezpieczeństwa. Przez lata prowadzono badania nad wpływem celowo zaprojektowanych nanomateriałów na zdrowie ludzi, bazując na modelach *in vitro* [9]. W tego typu pracach trzeba uwzględnić, że dana substancja może wykazywać różną aktywność biologiczną w zależności od metody produkcji i przetwarzania [10]. Obecnie w Polsce nie ma ustalonych wartości

najwyższych dopuszczalnych stężeń (NDS) wobec nanocząstek. Nie ma również szczegółowych przepisów międzynarodowych dotyczących produkcji, postępowania oraz znakowania nanomateriałów zaprojektowanych. Istnieją jednak ogólne zasady i zalecenia dotyczące ochrony pracowników, zaproponowane przez Organizację Współpracy Gospodarczej i Rozwoju (OECD – Organization for Economic Co-operation and Development), Światową Organizację Zdrowia (WHO – World Health Organization) i Międzynarodową Organizację Normalizacyjną (ISO – International Standard Organization) [11-15]. W swoich zaleceniach WHO przyjęła wartości progowe dla nanomateriałów na podstawie stężenia liczbowego i gęstości właściwej NOAA, zaproponowane przez Radę Społeczno-Ekonomiczną (SER – Sociaal-Economische Raad), będącą organem doradczym holenderskiego rządu [16]. Są to wartości dopuszczalne, których przekroczenie powinno skutkować zastosowaniem odpowiednich środków kontroli narażenia. Próg dla cząstek metalicznych wynosi 20 000 cząstek/cm<sup>3</sup>, a dla tlenków metali, sadzy, fulerenów, dendrymerów, polistyrenu itp. – 40 000 cząstek/cm<sup>3</sup>. Są to jednak wartości tymczasowe, które mogą się zmieniać w miarę postępu wiedzy o toksyczności nanomateriałów.

W wymienionych dokumentach przywołanych jest kilka mierników cząstek umożliwiających przeprowadzenie bezpośredniego pomiaru stężenia masowego (na podstawie założonej gęstości właściwej nanomateriałów) i stężenia liczbowego NOAA w powietrzu w czasie rzeczywistym. Wzmiankowana jest także grawimetryczna metoda określania średniego stężenia masowego pyłu, która nie wymaga znajomości gęstości właściwej. Ponadto istnieje możliwość wykorzystania impaktorów kaskadowych w celu pobierania próbek pyłu z podziałem na klasy wielkości [17]. Każda z tych metod pomiaru ma jednak wady. Wśród wad metod licznikowych można wymienić względność (która może skutkować rozbieżnością wyników pomiarów prowadzonych za pomocą dwóch różnych przyrządów) i brak ujednoczonych metod kalibracji [14, 18]. Z kolei metody grawimetryczne charakteryzują się relatywnie niską dokładnością, zależną od czułości wagi i skuteczności filtra, długim czasem potrzebnym do uzyskania wyniku (zależnym od stosowanych procedur ważenia i kondycjonowania filtra, na którym zatrzymywane są cząstki) oraz wrażliwością na bodźce fizyczne (wstrząsy, wibracje).

W ramach działalności Europejskiego Komitetu Normalizacyjnego (CEN – European Committee for Standardization) w 2019 r. zainicjowano prace nad przygotowaniem strategii monitorowania jakości powietrza na stanowiskach pracy pod kątem określania stężenia NOAA za pomocą bezpośrednich pomiarów prowadzonych z wykorzystaniem niskokosztowych mierników. Na obecnym etapie tych prac postanowiono, że będą się one koncentrować na pomiarach stężenia NOAA za pomocą mierników pyłu stosowanych do pomiarów środowiskowych (ta decyzja była oparta na przeglądzie

dostępnych źródeł literaturowych oraz rynku niskokosztowych mierników pyłu). Na rynku brakuje bowiem tanich urządzeń do określania stężenia NOAA.

Jest kilka systemów przeznaczonych do określania stężenia drobnych aerozoli *in situ* i online. Najpopularniejsze są skaningowe analizatory wymiarowe cząstek (SMPS – *scanning mobility particle sizer*), łącznie analizatory ruchliwości w polu elektrycznym (DMA – *differential mobility analyzer*) z kondensacyjnymi licznikami cząstek (CPC – *condensation particle counter*), a także systemy wykorzystujące DMA w połączeniu z elektrometrami w postaci puszkii Faradaya oraz elektryczne impaktory niskociśnieniowe. Ponadto istnieją przenośne urządzenia zdolne do oceny narażenia na NOAA za pomocą pomiarów elektrometrycznych naładowanych cząstek [19] lub zmiany oscylacji płytki piezoelektrycznej [20].

Jonizacyjne czujki dymu są szeroko stosowanymi urządzeniami przeciwpożarowymi, obecnymi na rynku od początku lat 50. ub.w. Ich główną przewagą nad miernikami optycznymi jest szybsza reakcja na pożar, w którym cząstki powstałe w wyniku spalania są stosunkowo małe – o wymiarach od kilku nanometrów do jednego mikrometra. W takiej czujce niewielka ilość materiału radioaktywnego (zazwyczaj ameryku-241) jest umieszczona na środku dysku, który stanowi dodatnią elektrodę. Na górnej części dysku znajdują się materiał izolacyjny i pływająca elektroda (zwana też kolektorem), która jest elektrycznie izolowana od innych elementów i podłączona do obwodu elektronicznego zdolnego do pomiaru potencjału elektrostatycznego. Objętość pod elektrodą pływającą określa się jako komorę odniesienia, natomiast objętość nad nią, ograniczoną od góry elektrodą ujemną – jako komorę aktywną. Cząstki alfa (identyczne z jądrami helu-4) emitowane z materiału radioaktywnego jonizują powietrze, powodując powstawanie jonów dodatnich i ujemnych. Z uwagi na mniejszą objętość ich stężenie jest znacznie wyższe w komorze odniesienia niż w komorze aktywnej, dlatego na powierzchni pływającej elektrody występuje różnica potencjału elektrostatycznego. Jeśli cząstki stałe dostaną się do komory aktywnej, część obecnych w komorze jonów przyczepi się do ich powierzchni i zmieni potencjał elektrostatyczny mierzony na pływającej elektrodzie. W przypadku czujki dymu ta zmiana jest porównywana z wartością progową i służy do uruchomienia alarmu.

Zastosowanie zmodyfikowanych czujek dymu do wykrywania cząstek stałych zostało wcześniej zaproponowane przez kilku autorów. Litton i in. zastosowali optyczne i jonizacyjne czujki dymu do pomiaru stężenia aerozoli mikrometrycznych i submikrometrycznych [21]. Pomysł ten został następnie podjęty przez Edwardsa i in. [22]. W badaniach porównawczych dwóch typów mierników wykazano, że miernik jonizacyjny był blisko pięć razy bardziej czuły na obecność drobnych cząstek w porównaniu z miernikiem fotoelektrycznym. Dolną granicę wykrywalności drobnych cząstek oszacowano na poziomie 17 µg/m<sup>3</sup>. Ponadto

stwierdzono, że oprócz stężenia cząstek również parametry środowiskowe, takie jak temperatura, wilgotność względna i ciśnienie, będą miały wpływ na wartość sygnału wyjściowego. Dahl i in. zaproponowali zastosowanie zmodyfikowanej jonizacyjnej czujki dymu jako niskokosztowego miernika nanocząstek [23]. W celu wyeliminowania wpływu warunków otoczenia na sygnał wyjściowy przeprowadzono pomiary powietrza filtrowanego i nieoczyszczonego. Dolną granicę wykrywalności dla cząstek 100 nm oszacowano na poziomie 15 000 cząstek/cm<sup>3</sup>. Testowany miernik wykazał liniową odpowiedź na zmianę stężenia aerozolu kalibracyjnego (KCl – chlorku potasu), dymu ze świecy oraz dymów spawalniczych.

## Niskokosztowy miernik aerozoli nanoobjektów w środowisku pracy

W Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym opracowano prototyp niskokosztowego miernika realizującego pomiar stężenia nanoobjektów w strumieniu aerozolu (fot. 1), do czego wykorzystano technologie spotykane w czujkach dymu.



Fot. 1. Prototyp niskokosztowego miernika nanoobjektów w powietrzu  
Photo 1. A prototype of a low-cost nanoobject meter in the air

Miernik bazuje na zmodyfikowanej przez producenta jonizacyjnej czujce dymu Polon-Alfa, model DIO-40. Czujka zawiera źródło promieniowania i działa na zasadzie zmniejszenia prądu jonizacji w komorze pomiarowej wskutek zmniejszenia się ruchliwości nośników prądu – jonów. Prąd jonizacji jest wynikiem zjonizowania powietrza przez źródło promieniotwórcze w dwóch połączonych komorach, normalnie znajdujących się w stanie równowagi. Czujka ma wbudowany cyfrowy układ samoregulacji, utrzymujący stałą czułość przy postępującym zabrudzeniu komory pomiarowej.

Wariant miernika składa się z dwóch dróg powietrznych: pierwszej dla powietrza przefiltrowanego przez wysokoskuteczny filtr (poziom odniesienia) i drugiej dla powietrza zawierającego nanoobjekt (rys. 1).

Obie drogi są rozdzielone elektrozaworem, który w trakcie pomiaru otwiera się i zamyka, umożliwiając przepływ powietrza raz jednym, a raz drugim kanałem. W pojedynczym cyklu pomiarowym urządzenie mierzy sygnał wyjściowy ze zmodyfikowanej czujki, będący różnicą pomiędzy napięciem zasilania a napięciem wyjściowym z komory pomiarowej, dla powie-



trza przefiltrowanego, a następnie dla powietrza zawierającego nanoobjekt. Stężenie liczbowe aerozoli nanoobjektów w 1 cm<sup>3</sup> analizowanego powietrza jest proporcjonalne do kwadratu różnicy między tymi sygnałami mierzonymi po łączeniu pompy, w nieruchomym powietrzu. Po kalibracji urządzenie pozwala na określenie tego stężenia.

Miernik jest również wyposażony w impaktor, który ma za zadanie usunąć ze strumienia aerozolu cząstki większe od 350 nm ze skutecznością 50% podczas przepływu (zapewnianego przez pompę) wynikającego z charakterystyki i budowy układu. Cząstki o wystarczająco dużych rozmiarach (i tym samym dużej masie) mają wystarczającą dużą bezwładność, żeby osadzić się wewnątrz impaktora, uderzając w rdzeń w jego wnętrzu. Mniejsze cząstki poruszają się w strumieniu aerozolu i omywają rdzeń, by docelowo trafić do komory pomiarowej miernika.

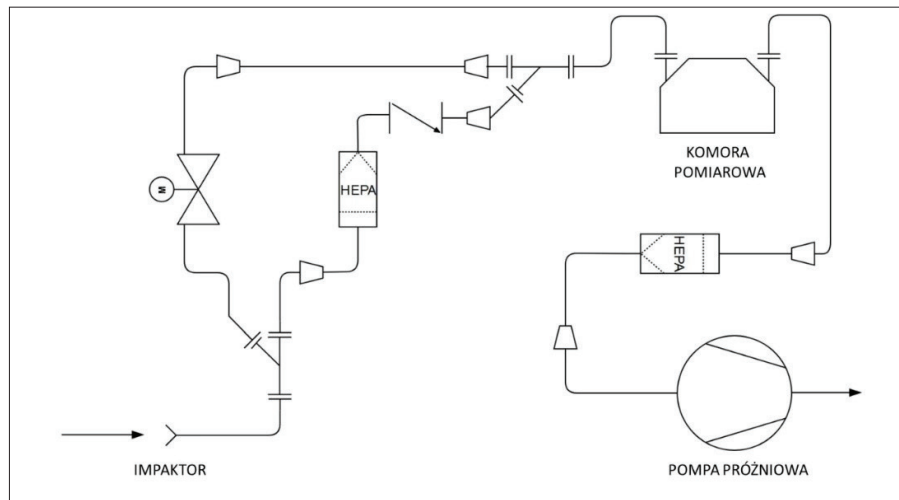
## Metoda badań

Poprawność działania prototypu niskokosztowego miernika aerozoli nanoobjektów w środowisku o zmiennych parametrach sprawdzono w rzeczywistych warunkach panujących w zakładzie przemysłowym, w którym potencjalnie występuje emisja aerozoli nanoobjektów. Otrzymane wyniki porównywano i korelowano z urządzeniem referencyjnym, tj. ze spektrometrem aerozoli MINI-WRAS 1371, wybranym ze względu na szeroki zakres badawczy wielkości cząstek – od 10 nm do 35 μm. Urządzenie łączy dwie metody pomiarowe: pierwsza polega na wykrywaniu cząstek o wielkości od 10 nm do 193 nm na podstawie odczytów z elektrometru, a druga – na wykrywaniu cząstek o wielkości od 0,253 μm do 35 μm na podstawie pomiarów natężenia światła rozproszonego. Połączenie tych dwóch metod pozwala na określenie rozkładu rozmiaru cząstek aerozolu na przestrzeni 41 klas rozmiarów w zakresie pomiarowym urządzenia. Pojedynczy pomiar trwa minutę. Podczas większości badań rejestrowano również parametry powietrza: temperaturę, wilgotność względną i ciśnienie atmosferyczne – za pomocą termohigrobarometru LB-706B (LAB-EL).

## Wyniki badań

W ramach badań przeprowadzono testy stacjonarne niskokosztowego miernika aerozoli nanoobjektów na stanowisku pracy operatora celi laserowej w zakładzie przemysłowym, odnosząc je do urządzenia referencyjnego. Rejestrowano również warunki środowiskowe z użyciem termohigrobarometru. Miejsce umieszczenia miernika przy źródle emisji aerozoli nanoobjektów na stanowisku pracy operatora celi laserowej w trakcie pomiarów pokazano na fot. 2.

Warunki środowiskowe w zakładzie przemysłowym utrzymywały się na stałym poziomie przez cały czas trwania pomiaru (rys. 2). Spadek liczbowego stężenia aerozoli nanoobjektów (rys. 3) oraz różnicy sygnałów wyjściowych

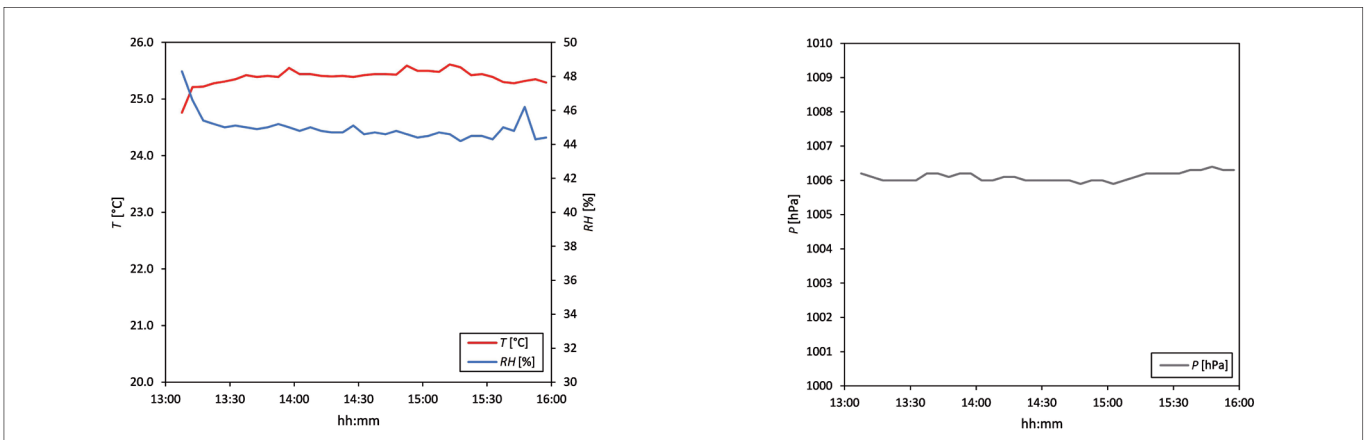


Rys. 1. Schemat połączeń tras powietrznych niskokosztowego miernika

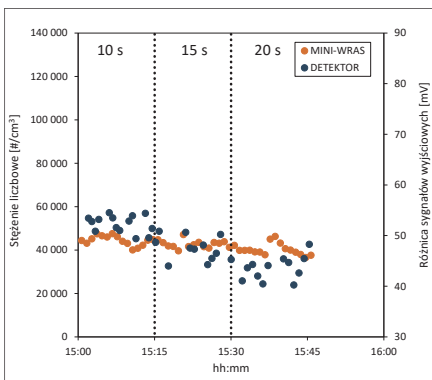
Fig. 1. Connection diagram of the air routes of the low-cost meter



Fot. 2. Miejsce pomiarów stacjonarnych na stanowisku pracy operatora celi laserowej  
 Photo 2. Place of stationary measurements at the laser cell operator's workplace

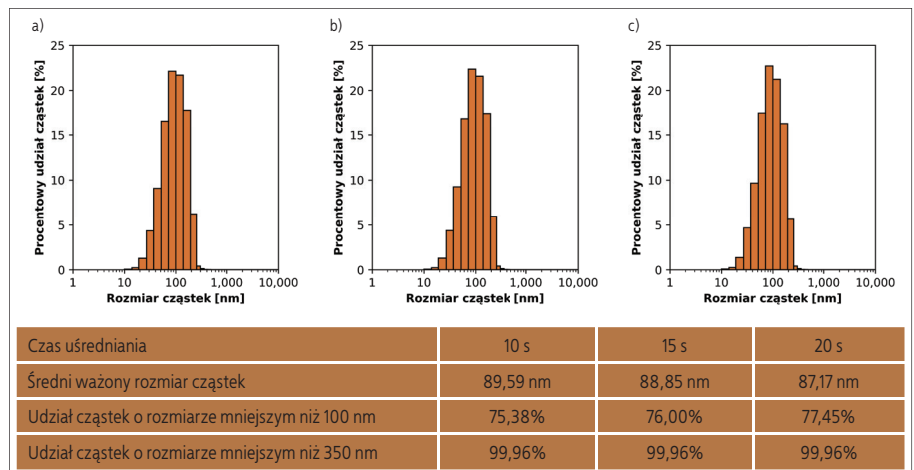


Rys. 2. Temperatura (T) i wilgotność względna powietrza (RH) oraz ciśnienie (P) podczas badań w zakładzie przemysłowym  
 Fig. 2. Temperature (T) and relative air humidity (RH), and pressure (P) during tests in an industrial plant



Rys. 3. Zmiany stężenia liczbowego cząstek oraz różnicy sygnałów wyjściowych w czasie (pomiar stacjonarny) dla czasu uśredniania 10 s, 15 s i 20 s

Fig. 3. Changes in the number concentration of particles and the difference of output signals over time (stationary measurement) for averaging times of 10 s, 15 s and 20 s



Rys. 4. Rozkłady rozmiarów cząstek aerozolu podczas badań dla czasu uśredniania: a) 10 s, b) 15 s, c) 20 s

Fig. 4. Aerosol particle size distributions during tests for averaging times of: a) 10 s, b) 15 s, c) 20 s

niskokosztowego miernika był spowodowany rozpoczęciem pomiarów na godzinę przed drugą zmianą roboczą. Od godziny 14:00 w hali została ograniczona produkcja, dlatego po tym czasie odnotowywano niższe wartości liczbowego stężenia aerozoli nanoobjektów. Również w tym przypadku trend zmian różnicy sygnałów wyjściowych miernika był podobny do trendu zmian liczbowego stężenia aerozoli nanoobjektów w zakładzie przemysłowym. W przypadku pomiaru stacjonarnego nie stwierdzono znacznego wpływu zmian czasu uśredniania na poprawę dokładności otrzymywanych wyników, co mogło wynikać zarówno z niższego liczbowego stężenia aerozoli nanoobjektów w hali (ok. 40 000 cząstek/cm<sup>3</sup>) w porównaniu z początkową sytuacją, jak i z bliskości granicy zakresu pomiarowego czujki jonizacyjnej zastosowanej w niskokosztowym mierniku. W przypadku różnicy sygnałów wyjściowych proponowana dolna granica wynosi 45 mV. Poniżej tej wartości w każdym przypadku obserwowano wzrost rozrzutu wyników uzyskiwanych z niskokosztowego miernika.

Na rys. 4 przedstawiono liczbowe rozkłady rozmiarów cząstek aerozolu dla różnych czasów uśredniania miernika.

## Podsumowanie

Zagrożenia związane z nanoobjektami wynikają zarówno z ich specyficznych właściwości fizykochemicznych, jak i z faktu, że w przeciwieństwie do aerozoli cząstek mikrometrycznych nie powodują one załamania światła widzialnego, przez co pracownicy mogą nie mieć świadomości narażenia. Dlatego też na stanowiskach pracy, gdzie nanomateriały są wykorzystywane jako substraty lub mogą powstawać w wyniku awarii lub procesów spontanicznych, powinno się stosować mierniki monitorujące poziom stężenia aerozoli nanoobjektów. Dostępne na rynku mierniki, działające na zasadzie pomiaru ruchliwości w polu elektrycznym, są niestety kosztowne, przez co ich stosowanie jest ograniczone do okresowo przeprowadzanych pomiarów kontrolnych. Rozwiązanie zaproponowane w artykule jest wielokrotnie tańszym miernikiem, który można wykorzystać do ciągłego monitoringu obecności aerozoli nanoobjektów na stanowiskach pracy w obszarze nanotechnologii.

Na podstawie przeprowadzonych badań potwierdzono, że opracowany przez autorów w ramach V etapu programu wieloletniego miernik aerozoli nanoobjektów, którego zasada działania i budowa opierają się na zmodyfikowanej jonizacyjnej czujce dymu, jest w stanie wykrywać w powietrzu NOAA o rozmiarze mniejszym niż 350 nm (99,96%) i określać ich stężenie (po odpowiedniej kalibracji) w zakresie od 10 000 do 400 000 cząstek/cm<sup>3</sup>. Biorąc pod uwagę wyniki pomiarów oraz dolne granice zakresów pomiarowych miernika referencyjnego MINI-WRAS (3000 cząstek/cm<sup>3</sup>) i prototypu niskokosztowego miernika (45 mV), sporządzono zależność liczbowego stężenia aerozoli nanoobjektów od różnicy sygnałów wyjścio-

wych miernika. Krzywa najlepszego dopasowania jest krzywą drugiego stopnia i została wybrana ze względu na lepsze odwzorowanie zarówno bardzo niskich, jak i bardzo wysokich stężeń liczbowych. Charakteryzowała się również większym współczynnikiem korelacji niż krzywa liniowa.

Obecnie prowadzone są prace na rzecz komercjalizacji opracowanego prototypu miernika aerozoli nanoobjektów. Stały kontakt ze środowiskiem profesjonalistów i użytkowników aparatury pomiarowej w obszarze nanotechnologii potwierdził możliwość komercjalizacji i wdrożenia produktu. W tym celu CIOP-PIB opracował plan wdrażania obejmujący m.in. podjęcie działań ukierunkowanych na sprzedaż licencji miernika aerozoli nanoobjektów.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] BHARDWAJ V., KAUSHIK A. Biomedical Applications of Nanotechnology and Nanomaterials. *Micromachines*. 2017, 8: 298.
- [2] JEEVANANDAM J. i in. Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 2018, 9: 1050-1074.
- [3] POŚNIAK M. (red.). *Emerging Chemical Risks in the Working Environment*. CRC Press/Taylor & Francis Group, 2020, doi: 10.1201/9781003051152.
- [4] BOVERHOF D.R. i in. Comparative assessment of nanomaterial definitions and safety evaluation considerations. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 2015, 73: 137-150.
- [5] ISO/TS 80004-2:2015. *Nanotechnologies – Vocabulary – Part 2: Nano-objects*.
- [6] ZAPÓR L., OBERBEK P. Nanomaterials in the Work Environment. [W:] M. Pośniak (red.), *Emerging Chemical Risks in the Work Environment*, wyd. 1. Boca Raton: CRC Press, 2020, s. 5-73, doi: 10.1201/9781003051152.
- [7] Risk assessment of products of nanotechnologies. Brussels: Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks, European Commission, 2009.
- [8] AL-SID-CHEIKH M. i in. Uptake, Whole-Body Distribution, and Depuration of Nanoplastics by the Scallop *Pecten maximus* at Environmentally Realistic Concentrations. *Environmental Science & Technology*. 2018, 52: 14480-14486, doi: 10.1021/acs.est.8b05266.
- [9] GEISER M. i in. Evaluating adverse effects of inhaled nanoparticles by realistic in vitro technology. *Nanomaterials*. 2017, 7: 49.
- [10] SHIN S., SONG I., UM S. Role of physicochemical properties in nanoparticle toxicity. *Nanomaterials*. 2015, 5: 1351.
- [11] ISO/TS 12901-1:2012. *Nanotechnologies – Occupational risk management applied to engineered nanomaterials – Part 1: Principles and approaches*.
- [12] ISO/TS 12901-2:2014. *Nanotechnologies – Occupational risk management applied to*

engineered nanomaterials – Part 2: Used of the control banding approach.

[13] Environment, Health and Safety Publications, Harmonized tiered approach to measure and assess the potential exposure to airborne emissions of engineered nano-objects and their agglomerates and aggregates at workplaces. Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials. No. 55, ENV/JM/MONO(2015)19. OECD, 2015.

[14] Strategies, techniques and sampling protocols for determining the concentrations of manufactured nanomaterials in air at the workplace. Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials. No. 82, ENV/JM/MONO(2017)30. OECD, 2017.

[15] WHO guidelines on protecting workers from potential risks of manufactured nanomaterials. World Health Organization, 2017.

[16] VAN BROEKHUIZEN P., DORBECK-JUNG B. Exposure limit values for nanomaterials – capacity and willingness of users to apply a precautionary approach. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2013, 10: 46-53.

[17] KUMSANLAS N. i in. A Cascade Air Sampler with Multi-nozzle Inertial Filters for PM0.1. *Aerosol and Air Quality Research*. 2019, 19: 1666-1677.

[18] LEVIN M. i in. Can we trust real time measurements of lung deposited surface area concentrations in dust from powder nanomaterials? *Aerosol and Air Quality Research*. 2016, 16: 1105-1117.

[19] KUULA J. i in. Applicability of Optical and Diffusion Charging-Based Particulate Matter Sensors to Urban Air Quality Measurements. *Aerosol and Air Quality Research*. 2019, 19: 1024-1039.

[20] WASISTO H.S. i in. Handheld personal airborne nanoparticle detector based on microelectromechanical silicon resonant cantilever. *Microelectronic Engineering*. 2015, 145: 96-103.

[21] LITTON C.D., SMITH K.R., EDWARDS R. Combined optical and ionization measurements techniques for inexpensive characterization of micrometer and submicrometer aerosols. *Aerosol Science and Technology*, 2004, 38: 1054-1062.

[22] EDWARDS R. i in. An inexpensive dual-chamber particle monitor: laboratory characterization. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2006, 56: 789-799.

[23] DAHL A., GUDMUNDSSON A., BOHGARD M. A low cost nanoparticle monitor for screening measurements in indoor environments. *Indoor Air*, 2008.

*Opracowano i wydano na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (projekt nr II.PB.21 pt. „Opracowanie metody detekcji aerozoli nanoobjektów na stanowiskach pracy z wykorzystaniem czujników jonizacyjnych”). Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.*