

Stella Bujak-Pietrek

## NARAŻENIE NA NANOCZĄSTKI W ŚRODOWISKU PRACY JAKO ZAGROŻENIE DLA ZDROWIA. PROBLEMY OCENY EKSPOZYCJI ZAWODOWEJ

OCCUPATIONAL EXPOSURE TO NANOPARTICLES.  
ASSESSMENT OF WORKPLACE EXPOSURE

Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera, Łódź  
Zakład Psychologii Pracy

### STRESZCZENIE

Nanotechnologia, która jest obecnie jedną z najpopularniejszych gałęzi nauki, to technika umożliwiająca wytwarzanie oraz stosowanie struktur o wielkościach nanometrowych, a jej produkty znajdują zastosowanie niemalże we wszystkich dziedzinach życia. Nanocząstki, czyli struktury, których przynajmniej jeden wymiar nie przekracza 100 nanometrów ( $1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$ ), są wykorzystywane w mechanice precyzyjnej, elektronice, medycynie, kosmetyce, przemyśle farmaceutycznym i innych dziedzinach. Ze względu na małe wymiary nanostruktury wykazują zdecydowanie odmienne właściwości fizykochemiczne, nieznane dla tych samych materiałów występujących w skali makroskopowej. Intensywny rozwój nanotechnologii niesie za sobą, oprócz szerokiego spektrum możliwości aplikacji, również nowe, nieznane dotąd zagrożenia dla zdrowia człowieka. Technologia dotycząca nanocząstek rozwinęła się stosunkowo niedawno, stąd też większość zagadnień z nią związanych (zwłaszcza tych, które dotyczą ryzyka zdrowotnego i wpływu na środowisko) pozostaje dotychczas poza naszą wiedzą i jest w trakcie szeroko zakrojonych badań. Zarówno nanocząstki uwalniane w różnorodnych procesach technologicznych jako produkty uboczne, jak i nanocząstki celowo projektowane i wytwarzane mogą stanowić zagrożenie dla człowieka. Istotnym problemem dotyczącym oceny narażenia jest brak przepisów prawnych regulujących i określających standardy higieniczne, które obowiązywałyby przy produkcji i zastosowaniu nanocząstek. Nie zostały też dotychczas opracowane normy, zgodnie z którymi możliwe byłoby przeprowadzenie oceny ryzyka. Oddzielnym problemem badawczym jest właściwy dobór aparatury pozwalającej na pomiar w powietrzu cząstek o bardzo małych wymiarach, zarówno ich liczby w określonej objętości powietrza, jak i masy cząstek oraz ich powierzchni. W niniejszym artykule przedstawiono możliwości i zakres oceny narażenia na nanocząstki oraz opisano dostępną aparaturę służącą do zliczania i szacowania parametrów, które określają ekspozycję na najdrobniejsze cząstki. Med. Pr. 2010;61(2):183–189

Słowa kluczowe: nanocząstki, nanotechnologia, narażenie zawodowe, ocena ryzyka, skutki zdrowotne

### ABSTRACT

Nanotechnology is currently one of the most popular branch of science. It is a technology that enables designing, manufacturing and application of materials and structures of very small dimensions, and its products are applied in almost every field of life. Nanoparticles are the structures having one or more dimensions of the order of 100 nm or less. They are used in precise mechanics, electronics, optics, medicine, pharmacy, cosmetics and many other spheres. Due to their very small size, nanostructures have completely different and specific properties, unknown for the bulk of materials. Fast-growing nanotechnology provides a wide spectrum of applications, but it also brings about new and unknown danger to human health. Nanotechnology is the branch that has developed rather recently, and much information about health risk and its influence on the environment is beyond our knowledge. Nanoparticles, released in many technological processes, as well as manufactured nanoparticles can induce occupational hazards to workers. The lack of regulations and standards, compulsory in the manufacture and use of nanoparticles is a fundamental problem faced in the evaluation of exposure. Another problem is the choice of proper measurement equipment for surveying of very small particles — their number, mass and surface area in the workpost air. In this article, the possibility and scope of exposure assessment is discussed and a brief specification of available instrumentation for counting and assessing the parameters essential for classifying the exposure to nanoparticles is presented. Med Pr 2010;61(2):183–189

Key words: nanoparticles, nanotechnology, occupational exposure, risk assessment, health effects

Adres autorki: Zakład Środowiskowych Zagrożeń Zdrowia, Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera,  
ul. św. Teresy 8, 91-348 Łódź, e-mail: stellab@imp.lodz.pl

Nadesłano: 15 grudnia 2009

Zatwierdzono: 30 grudnia 2009

## WPROWADZENIE

Nanotechnologia, w obecnych czasach najszybciej rozwijająca się gałąź wiedzy, skupia szereg innych nauk, wśród których wymienić można biologię i inżynierię molekularną, fizykę czy chemię. Zajmuje się projektowaniem, wytwarzaniem i wykorzystaniem nanomateriałów i znajduje zastosowanie zarówno w technologiach przemysłowych, jak i życiu codziennym. Produkty nanotechnologii nazwane zostały nanocząsteczkami i definiowane są jako obiekty, których przynajmniej jeden wymiar nie przekracza 100 nm. Nanotechnologia daje możliwość rewolucyjnych rozwiązań w dziedzinie materiałów, które wykazują osobliwe właściwości ze względu na ich nanometrowe wielkości i możliwość kontrolowania na poziomie pojedynczych molekuł.

Historia nanotechnologii zaczęła się w 1959 roku ogłoszeniem przez Richarda P. Feynmana, fizyka-noblistę, referatu zatytułowanego „There is plenty of room at the bottom” („Tam na dole jest mnóstwo miejsca”), w którym zasugerował, że możliwe będzie budowanie obiektów atom po atomie oraz przedstawił koncepcję miniaturyzacji i możliwości wynikające z nanotechnologii. Dopiero jednak odkrycie w latach 80. XX wieku skaningowego mikroskopu tunelowego, o zdolności rozdzielczej rzędu pojedynczych atomów, umożliwiło tworzenie i badanie nanostruktur. Możliwe stało się tworzenie studni, kropek czy drutów kwantowych. Z kolei dalsze badania doprowadziły do odkrycia nowych struktur w skali nanometrowej, tj. fullerenów i nanorurek węglowych. Obecnie nanotechnologia rozwija się w kierunku możliwości modyfikowania i tworzenia rzeczy i materiałów z atomową precyzją. Przewiduje się, że w przyszłości nanotechnologia będzie dziedziną znajdującą zastosowanie w każdej sferze życia.

Mimo że nanotechnologia jest stosunkowo młodą dziedziną nauki i techniki, to same nanocząstki nie są niczym nowym. Występują one dość powszechnie w środowisku, towarzysząc przede wszystkim procesom spalania i innym związanym z obróbką termiczną. Obecnie w środowisku nanocząstki są, ze względu na pochodzenie, klasyfikowane jako naturalne i antropogeniczne.

## NANOCZĄSTKI NATURALNE

Cząstki naturalne to te, które pojawiają się w powietrzu na skutek naturalnych procesów erozji, rozkładu czy utleniania minerałów bądź związków organicznych. Mogą one powstawać również podczas pożarów lasów czy wybuchów wulkanów. Zdecydowana więk-

szość nanocząstek powstaje jednak na skutek działalności człowieka i to zarówno jako produkty uboczne wielu procesów, jak i celowo wyprodukowane cząstki o wielkościach nanometrowych. Cząstki o rozmiarach nanometrowych, które nie zostały zaprojektowane i wyprodukowane celowo, określa się terminem 'ultrafine' — cząstki ultradrobne.

## NANOCZĄSTKI ANTROPOGENICZNE

### Środowisko komunalne

Cząstki ultradrobne, które występują w środowisku miejskim, to cząsteczki pochodzenia antropogenicznego, które są wytwarzane jako produkty uboczne w różnych procesach. Jednymi z najwykreszczonych procesów, w których powstają cząstki o wielkościach rzędu kilkudziesięciu nanometrów, są gotowanie i smażenie (1). Zasadniczym jednak źródłem zanieczyszczenia środowiska nanocząsteczkami są procesy spalania, wśród których możemy wymienić emisję z ciepłowni, elektrociepłowni czy chociażby z gospodarstw domowych (spalanie opału), oraz emisję spalin w ruchu ulicznym (samochodowym). W tym ostatnim przypadku emisja cząstek dotyczy spalin z silników diesla, gdzie powstają one na skutek niepełnego spalania oleju napędowego. Ponad 90% cząstek powstałych w wyniku spalania oleju napędowego ma średnicę aerodynamiczną mniejszą niż 1  $\mu\text{m}$  (2). W środowisku miejskim, gdzie poziom emisji jest niekiedy bardzo wysoki, może dochodzić do dużego narażenia osób na cząstki ultradrobne czy nanocząstki.

### Środowisko pracy

W wielu gałęziach przemysłu i na różnorodnych stanowiskach pracy, gdzie emitowane są różnego rodzaju pyły i dymy, również bardzo powszechne jest narażenie na cząstki o wielkościach nanometrowych. Narażenie na nanocząstki w środowisku pracy może dotyczyć osób zatrudnionych w odlewniach żeliwa (3,4), w przemyśle (wydobywczym, chemicznym, kosmetycznym, spożywczym), przy produkcji farb i materiałów występujących w postaci proszków. Procesy technologiczne, podczas których uwalniane są największe ilości nanocząstek, to przede wszystkim spawanie, wytapianie, zgrzewanie, wulkanizacja, lutowanie (5), a także spalanie paliw, czyli takie procesy, które nierozdzielnie łączą się z obróbką termiczną. Ich emisja może występować również podczas niektórych pyłotwórczych działań mechanicznych, takich jak polerowanie, cięcie czy szlifowanie (6).

Oddzielną grupę stanowią tzw. nanocząstki projektowane, czyli struktury o rozmiarach rzędu kilku lub najwyżej kilkudziesięciu nanometrów, wytwarzane celowo i stosowane w procesach nanotechnologicznych. Z uwagi na bardzo szybki rozwój nanotechnologii coraz większym zagrożeniem może stać się ekspozycja na nanocząstki projektowane. Narażeni na nie mogą być pracownicy zatrudnieni przy ich produkcji czy obróbce, ale również osoby użytkujące wspomniane nanoproducty.

## WŁAŚCIWOŚCI I RYZYKO ZDROWOTNE

Nanocząstki ze względu na bardzo małe rozmiary mają specyficzne właściwości, zdecydowanie inne niż cząstki zbudowane z tych samych atomów, ale o większych rozmiarach. Mają one relatywnie niską masę, zmienioną reaktywność, wykazują tendencję do szybkiej aglomeracji, a także mogą mieć o kilkaset stopni Celsjusza niższe temperatury topnienia. Efekty te są związane z bardzo dużym stosunkiem powierzchni do objętości nanocząstki. Unikatowe właściwości nanocząstek stwarzają szerokie możliwości ich stosowania praktycznie w każdej dyscyplinie nauki i techniki, a dopracowanie metod wytwarzania tych struktur umożliwi produkcję i stosowanie nanomateriałów na szeroką skalę.

Liczba branż i gałęzi gospodarki, które zajmują się wytwarzaniem nanocząstek bądź ich zastosowaniem, jest coraz większa. Wśród struktur, które są produktami nanotechnologii możemy wymienić tworzywa sztuczne, sztuczne włókna, fulereny, nanorurki, nanokapsułki, liposomy, dendrymery i wiele innych. Produkty te wykorzystywane są w wielu dyscyplinach związanych z elektroniką, mechaniką, medycyną i innymi gałęziami przemysłu. Znajdują zastosowanie w takich materiałach, jak produkty o właściwościach biobójczych, jako opatrunki, powłoki, fugi, zaprawy klejące czy polimery.

Paradoksalnie, te same właściwości nanocząstek, które decydują o możliwościach ich szerokiego wykorzystania, mogą wywoływać negatywne efekty w organizmie człowieka. Z tego powodu coraz częstszym zagrożeniem pojawiającym się na stanowiskach pracy jest narażenie na produkty nanotechnologii, czyli nanocząstki projektowane, a ryzyko związane z narażeniem dotyczy zarówno cząsteczek uwalnianych jako produkty uboczne podczas różnorodnych procesów technologicznych, jak i nanocząstek projektowanych, chociaż może w mniejszym stopniu.

Toksyczność tych struktur zależy od wielu czynników, wśród których należy wymienić przede wszystkim właściwości fizyczne i chemiczne (w tym ich rozmiar, skład chemiczny i rozpuszczalność). Cytotoksyczność niezwiązana ze składem chemicznym może wynikać z zależności od powierzchni możliwości adhezji nanocząstek na komórkach oraz ich wnikań do wnętrza komórek. Ponadto, na efekt zdrowotny może wpływać stężenie nanocząstek w powietrzu stanowiska pracy oraz czas narażenia pracownika. Istotnym czynnikiem wydaje się też droga narażenia, czyli sposób, w jaki nanocząstki mogą dostać się do organizmu człowieka. Ekspozycja na nanocząstki podczas ich wytwarzania i użytkowania może zachodzić poprzez układ oddechowy, kontakt skórny bądź drogą pokarmową.

Układ oddechowy jest główną drogą, którą emitowane do środowiska cząstki mogą dostać się do organizmu i z łatwością osiągnąć najdrobniejsze oskrzela i pęcherzyki płucne. Nanocząstki w układzie oddechowym mogą powodować zupełnie odmienne efekty zdrowotne niż większe cząstki. Ponadto badania eksperymentalne wskazują na zdolność penetracji tych struktur do innych narządów i tkanek, co może skutkować określonymi efektami zdrowotnymi w strukturach odległych od drogi wdychania nanocząstek (7). Badania toksykologiczne i epidemiologiczne pokazują, że drobne cząstki stałe (poniżej 1000 nanometrów, niespełniające jeszcze kryteriów dla nanocząstek), uwalniane do środowiska w różnych procesach technologicznych czy też jako produkty spalania (np. w silnikach Diesla) mogą być niebezpieczne dla zdrowia człowieka i wywoływać różne efekty biologiczne.

Wiele doniesień wskazuje, że najpoważniejszymi efektami zdrowotnymi wynikającymi z narażenia zawodowego czy środowiskowego na takie cząstki są choroby układu oddechowego i układu krążenia (8–10). Ponadto ekspozycja na bardzo drobne cząstki może prowadzić do takich szkodliwych efektów zdrowotnych, jak podrażnienia oczu i dróg oddechowych, zaburzenia w funkcjonowaniu śródbłonna naczyń, wrażliwość na infekcje dróg oddechowych, przewlekłe choroby płuc, a nawet nowotwory (11).

Badania skutków zdrowotnych narażenia na „projektowane” nanocząstki o wymiarach poniżej 100 nanometrów ograniczone są w zasadzie wyłącznie do badań eksperymentalnych na zwierzętach i liniach komórkowych (12,13). Narażenie na nanocząstki drogą oddechową może być przyczyną postępujących procesów zwłóknieniowych nawet po pojedynczym czy

krótkotrwałym narażeniu (11,14,15). Eksperymenty wskazują, że różnego typu nanocząstki projektowane mogą przemieszczać się z płuc do układu krążenia i poprzez naczynia do różnych organów i układów, w tym również do mózgu (16). Transport nanocząstek do obszarów innych niż układ oddechowy jest istotny z punktu widzenia efektów, jakie mogą pojawić się w narządach stanowiących cel drugorzędowy. W odniesieniu do mechanizmów komórkowych badania eksperymentalne wskazują, że zasięg, w jakim procesy te zachodzą, zależy od kilku czynników, wśród których wymienić należy rozpuszczalność cząstek w płynach biologicznych, rozmiar cząstek lub agregatów, które tworzą, rodzaj tkanki docelowej oraz integralność śródbłonna (17).

Badania toksykologów skupiają się na mechanizmach działania nanocząstek w organizmie, jednak dotychczas nie ma szczegółowych informacji dotyczących wpływu tych cząsteczek na komórki i struktury komórkowe. Stres oksydacyjny spowodowany produkcją wolnych rodników jest zasadniczym mechanizmem, poprzez który nanocząstki mogą przyczyniać się do wywoływania niekorzystnych objawów zdrowotnych (18–21,12). Odpowiedź w postaci stresu oksydacyjnego może pojawiać się z różną szybkością w zależności od rodzaju nanocząstek, przy czym cząstki metali przejściowych znacznie ten proces przyspieszają (22). Wolne rodniki powodują uszkodzenia struktur biologicznych w procesach peroksydacji lipidów, utleniania białek oraz poprzez oksydacyjne uszkodzenia DNA. Stres oksydacyjny może indukować również reakcję zapalną w komórkach poprzez m.in. aktywację czynników transkrypcyjnych, takich jak NF- $\kappa$ B czy białka AP1 (23–25). W badaniach *in vitro* obserwowano istotny spadek poziomu zredukowanego glutationu, spadek aktywności dysmutazy ponadtlenkowej oraz wzrost produktów peroksydacji lipidów (26).

## ELEMENTY OCENY NARAŻENIA NA NANOCZĄSTKI W ŚRODOWISKU PRACY

W celu ochrony przed narażeniem zawodowym pracowników ekspozowanych na nanoaerazol opracowane są procedury i urządzenia do monitorowania ich stanowisk pracy. Oszacowanie ryzyka zdrowotnego osób narażonych na działanie nanocząstek wiąże się z określeniem stopnia ekspozycji indywidualnej pracowników na te cząsteczki w warunkach pracy. Nie wiadomo jednak, co ma większy wpływ na pojawienie się efektów zdrowotnych u osób narażonych na nano-

cząstki — liczba cząstek czy też może ich masa. Z tego powodu istnieje kilka metod pomiaru narażenia, które określają stężenie liczbowe (stosunek liczby cząstek danego przedziału ich wielkości do całkowitej liczby cząstek fazy rozproszonej), stężenie masowe (stosunek masy cząstek z określonego przedziału ich wymiarów do całkowitej liczby cząstek frakcji rozproszonej (27)) czy pole powierzchni cząstek wchodzących w skład nanoaerozolu. Masa może nie stanowić dobrego wskaźnika oceny narażenia na nanocząstki. Stężenie liczbowe nanocząstek, w przeciwieństwie do stężenia masowego, jest w większości przypadków dość wysokie. Całkowita masa frakcji ultrafine pyłu może stanowić mniej niż 1% całkowitej jego puli, natomiast liczba tych cząsteczek może sięgać 80% ogółu cząstek wchodzących w skład pyłu. Jedna cząsteczka o średnicy 10  $\mu$ m ma taką samą masę jak miliard cząstek o średnicy 10 nm. Ponadto, nie masa cząsteczek występujących w powietrzu, ale ich liczba i rozmiar są parametrami, które w przypadku efektów zdrowotnych mają dużo istotniejsze znaczenie. Prace z ostatnich lat wykazały, że o toksyczności cząstek i potencjalnym efekcie zdrowotnym u człowieka może decydować nie tyle liczba nanocząstek w objętości powietrza, ile właśnie ich powierzchnia. Badania na zwierzętach dla tego ostatniego parametru wykazały zależność „dawka–efekt” (28,29).

Nanocząstki stanowią bardzo małą frakcję w całkowitej masie aerozolu i z tego względu nie mogą być oznaczane metodami wagowymi. Ponadto są one zdecydowanie za małe, by określić je metodami instrumentalnymi, w których wykorzystywane jest rozszczepienie światła. Komercyjnie dostępne instrumenty do oznaczania nanocząstek mogą mierzyć ich stężenie liczbowe i masowe, a także powierzchniowe, ale przeważnie oprócz cząstek o rozmiarach nanometrowych mierzą one również cząstki większe.

## STĘŻENIE LICZBOWE NANOCZĄSTEK

Jedną z metod umożliwiających oznaczenie stężenia ilościowego nanocząstek w powietrzu jest technika bazująca na powiększaniu rozmiaru cząsteczek w atmosferze nasyconych par do wielkości mierzalnej w układzie laserowego licznika optycznego. Najszerze zastosowanie ma tutaj kondensacja pary alkoholu (najczęściej butanolu) na cząsteczkach. Kondensacyjny licznik cząstek (condensation particle counter — CPC) może oznaczać cząstki o wielkościach mieszczących się w zakresie 3–3000 nm.

Urządzenie to może być zasilane sieciowo lub za pomocą akumulatora, dlatego może służyć do określenia źródła emisji nanocząstek. W aparatach tego typu próbka aerozolu przechodzi przez saturator, którego ciepło powoduje parowanie cieczy służącej do kondensacji. Powietrze i para są kierowane do kondensera, w którym następuje ochłodzenie strumienia i dochodzi do przesylenia par. Pary te kondensują na cząstkach obecnych w strumieniu próbki powietrza, w wyniku czego cząstki ulegają powiększeniu do rozmiarów, które mogą być zliczane przez licznik laserowy.

Pomiar stężenia liczbowego nanocząstek z zastosowaniem kondensacyjnego licznika cząstek odbywa się w czasie rzeczywistym. Urządzenie to występuje w dwóch wersjach: stacjonarnej i przenośnej. W wersji przenośnej licznik zasilany jest na baterie, dzięki czemu jest doskonale dostosowany do pomiarów w środowisku pracy, co jest niewątpliwą zaletą tego urządzenia.

Innym urządzeniem, dzięki któremu można bezpośrednio oznaczyć stężenie liczbowe nanocząstek, jest klasyfikator zróżnicowanej ruchliwości cząstek DMPS (differential mobility particle sizer) lub skaningowy klasyfikator cząstek SMPS (scanning mobility particle sizer). Jest to układ składający się z kondensacyjnego licznika cząstek (CPC) i analizatora ich zróżnicowanej ruchliwości — DMA (differential mobility analyzer). Ma on możliwość detekcji w czasie rzeczywistym stężenia liczbowego, a ponadto selekcjonuje cząstki według rozmiaru, dając obok stężenia również rozkład wielkości cząstek nanoaerozolu.

W układzie tym cząstki aerozolu są obdarzone ładunkami, a następnie frakcjonowane zgodnie z ich ruchliwością w polu elektrycznym. Strumień powietrza jest wstępnie kondycjonowany, tzn. przechodzi przez np. impaktor, cyklon, w którym usuwane są cząsteczki większe, o rozmiarach mikrometrowych. Następnie próbka trafia do klasyfikatora elektrycznego, gdzie cząstki zostają obdarzone ładunkami elektrycznymi i zgodnie z ich ruchliwością elektryczną są rozdzielane (klasyfikowane) w analizatorze DMA. Wielkość ładunku zależy od wielkości cząstek, dlatego też jedynie cząstki o ściśle określonych rozmiarach mogą przejść przez DMA. W dalszej kolejności próbka powietrza zawierająca już tylko cząsteczki o znanej wielkości jest kierowana do licznika CPC.

Skaningowy klasyfikator cząstek SMPS daje możliwość prowadzenia pomiarów w czasie rzeczywistym i szybkiego uzyskania wyników (cały pomiar trwa 60 sekund). Dodatkowo urządzenie to umożliwia

prowadzenie pomiarów w szerokim zakresie stężeń ( $1-1 \times 10^8$  cząstek  $\text{cm}^{-3}$ ) i rozmiarów (0,002–1  $\mu\text{m}$ ) z wysoką rozdzielczością i dokładnością. Wyżej opisany klasyfikator występuje tylko w wersji stacjonarnej, dlatego nie znajduje zastosowania w przypadku prowadzenia pomiarów na stanowiskach pracy i może służyć jedynie do eksperymentalnych badań laboratoryjnych.

## STĘŻENIE MASOWE CZĄSTEK

Oznaczanie stężenia masowego jest obecnie najpowszechniej wykonywanym pomiarem emisji pyłów na stanowiskach pracy, jednak stosowana metoda grawimetryczna nie jest wystarczająca w odniesieniu do cząstek ultradrobnych. Z uwagi na niedoskonałą sprawność filtrowania i znikomą masę nanocząstek względem ich liczby metoda ta nie może być powszechnie stosowana w oznaczaniu stopnia ekspozycji na te cząsteczki.

Do pomiaru stężenia masowego cząstek ultradrobnych może służyć monitor stężenia aerozolu w powietrzu. Jest to fotometr laserowy, który mierzy w czasie rzeczywistym stężenie aerozolu, uwzględniając frakcje o określonych wymiarach cząsteczek. Zasada działania tego urządzenia opiera się na pomiarze tłumienia światła laserowego rozproszonego na cząstkach obecnych w badanej próbce powietrza. Strumień powietrza jest zasysany do aparatu, a następnie przechodzi przez komorę pomiarową. Zakres pracy aparatu wynosi 0,001–400  $\text{mg}/\text{m}^3$  i jest dostosowany do prowadzenia pomiarów w pomieszczeniach czystych, takich jak biura czy laboratoria, a także takich, w których występuje bardzo duże zanieczyszczenie pyłem przemysłowym. Dostępne są modele stacjonarne i przenośne tego urządzenia.

## POLE POWIERZCHNI NANOAEROZOLU

Innym sposobem określenia wielkości narażenia na nanocząstki w powietrzu atmosferycznym lub środowiska pracy jest wyznaczenie pola ich powierzchni. W przeciwieństwie do masy czy nawet liczby nanocząstek ich powierzchnia jest czynnikiem odgrywającym kluczową rolę w ich toksyczności. Pole powierzchni jest parametrem wysoce skorelowanym z ekspozycją na nanoaerozol.

Istnieje kilka technik pomiarowych pozwalających na oszacowanie pola powierzchni nanoaerozolu. Pierwszym urządzeniem zaprojektowanym w tym celu był epiphaniometer. Zasada jego działania wykorzystuje

pomiar szybkości przyłączania radioaktywnych jonów do powierzchni nanocząstek. Próbkę powietrza jest przepuszczana przez zamkniętą komorę, wewnątrz której obecne są krótko żyjące atomy  $^{211}\text{Pb}$ , których źródłem jest  $^{227}\text{Ac}$ . Atomy  $^{211}\text{Pb}$  przyłączają się do cząsteczek aerozolu, które następnie zbierane są na filtrze i zliczane przez detektor cząstek  $\alpha$ . Mierzony sygnał jest proporcjonalny do pola powierzchni cząsteczek aerozolu (30). Ze względu na wykorzystanie w tym urządzeniu radioaktywnego źródła nie znalazło ono jednak powszechnego zastosowania jako narzędzie do oceny czystości powietrza w miejscu pracy.

Alternatywna metoda wyznaczenia pola powierzchni aerozolu oparta jest na pomiarze rozkładu wielkości jego cząstek. Na tej podstawie szacuje się pole powierzchni, zakładając odpowiedni kształt i geometrię cząstek. Rozkład wielkości można uzyskać dzięki zastosowaniu SMPS.

Aktualnie dostępne są urządzenia umożliwiające pomiar pola powierzchni cząstek odkładających się w płucach. Służy do tego monitor cząstek aerozoli o średnicach 10–1000 nm. Monitor nie mierzy całkowitej powierzchni aktywnej cząstek zawieszonych w powietrzu, wskazuje jedynie pole powierzchni tych frakcji cząstek, które odkładają się w płucach, w rejonie tchawiczo-oskrzelowym lub docierają do bezrzęskowej części dróg oddechowych — pęcherzyków płucnych. Aparat oblicza powierzchnię cząstek pyłów, wyrażając ją w  $\mu\text{m}^2$  na  $\text{cm}^3$ , w zakresie stężeń: 1–2500  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  dla frakcji tchawiczo-oskrzelowej i 1–10 000  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  dla pęcherzykowej.

Zasada pomiaru opiera się na wyznaczeniu pola powierzchni cząstek uprzednio obdarzonych ładunkiem. Próbkę aerozolu, pobierana dzięki zintegrowanej pompie, trafia do wnętrza urządzenia przez cyklon z punktem odcięcia 1  $\mu\text{m}$  (1000 nm). Cząstki aerozolu przechodzą przez jonizator, gdzie uzyskują ładunek od dodatnio naładowanych jonów, a następnie przez pułapkę jonową, która zbiera nadmiar jonów i cząstki nieposiadające ładunku odpowiadającego warunkom dla badanych frakcji, a tym samym działa jak selektywny próbnik dla elektrometru. Mierzony przez elektrometr ładunek jest proporcjonalny do pola powierzchni cząstek. Pomiar wykonany monitorem cząstek wyodrębniające frakcje tchawiczo-oskrzelową i pęcherzykową korelują z modelami opisującymi przedostawanie się aerozoli do dróg oddechowych, opisanymi przez Międzynarodową Komisję Ochrony Radiologicznej (International Commission on Radiological Protection) (31).

## PODSUMOWANIE

Technologie dotyczące obiektów o rozmiarach mieszczących się w zakresie kilkudziesięciu nanometrów są stosunkowo nowe, jednak w ostatnich czasach bardzo popularne i rozwijają się z dużą dynamiką. Gwałtowny rozwój nanotechnologii przyczynia się do wykorzystania jej produktów w coraz szerszym zakresie, obejmującym niemal wszystkie dziedziny. Wstępne badania naukowe dostarczyły informacji na temat niektórych niekorzystnych aspektów oddziaływania nanocząstek na organizmy, a bezpieczeństwo stosowania nanotechnologii i jej produktów jest znane w bardzo niewielkim stopniu. W związku z powyższym problem oceny narażenia i określenie ryzyka zdrowotnego związanego z ekspozycją na nanocząstki zasługuje na dalsze, szczegółowe badania. Powinien być on tematem szeroko zakrojonych prac z dziedziny higieny pracy, które obejmują ustalenie metodyki oraz opracowanie wytycznych obowiązujących przy ocenie narażenia.

## PIŚMIENNICTWO

1. Dennekamp M., Howarth S., Dick C.A.J., Cherie J.W., Donaldson K., Seaton A.: Ultrafine particles and nitrogen oxides generated by gas and electric cooking. *Occup. Environ. Med.* 2001;58:511–516
2. Jankowska E., Pośniak M.: Występowanie pyłów w powietrzu otaczającym człowieka. *Bezpiecz. Pr. Nauka Prakt.* 2006;5:16–19
3. Evans D.E., Heitbrink W.A., Slavin T.J., Peters T.M.: Ultrafine and respirable particles in automotive grey iron foundry. *Ann. Occup. Hyg.* 2008;52:9–21
4. Cheng Y.H., Chao Y.C., Wu C.H., Tsai C.J., Uang S.N., Shih T.S.: Measurements of ultrafine particle concentrations and size distribution in an iron foundry. *J. Hazard. Mater.* 2008;158(1):124–130
5. Brouwer D.H., Gijsberg J.H.J., Lurvink M.W.M.: Personal exposure to ultrafine particles in the workplace: exploring sampling techniques and strategies. *Ann. Occup. Hyg.* 2004;48:439–453
6. Zimmer A.T., Maynard A.D.: Investigation aerosol produced by a high-speed hand-held grinder using various substrates. *Ann. Occup. Hyg.* 2002;46:663–672
7. Oberdörster G., Sharp Z., Atudorei V., Elder A., Gelein R., Lunts A. i wsp.: Extrapulmonary translocation of ultrafine carbon particles following whole-body inhalation exposure of rats. *J. Toxicol. Environ. Health* 2002;65:1531–1543
8. Gwinn M.R., Vallyathan V.: Nanoparticles: health effects — pros and cons. *Environ. Health Perspect.* 2006;114:1818–1825

9. Gilmour S.P., Ziesenis A., Morrison E.R., Vickers M.A., Drost E.M., Ford I. i wsp.: Pulmonary and systemic effects of short-term inhalation to ultrafine carbon black particles. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 2004;195:35–44
10. Radomski A., Jurasz P., Alonso-Escolano D., Drews M., Morandi M., Malinski T. i wsp.: Nanoparticle induced platelet aggregation and vascular thrombosis. *Br. J. Pharmacol.* 2005;146:882–893
11. Schulte P.A., Schaubauer-Berigan M.K., Mayweather C., Gareci C.L., Zumwalde R., McKernan J.L.: Issues in development of epidemiologic studies of workers exposed to engineered nanoparticles. *J. Occup. Environ. Med.* 2009;51(3):323–335
12. Hussain S.M., Hess K.L., Gearhart J.M., Geiss K.T., Schlager J.J.: *In vitro* toxicity of nanoparticles in BRL3A rat liver cells. *Toxicol. In Vitro* 2005;19:975–983
13. Warheit D.B., Sayez C.M., Reed C.M., Swain K.A.: Health effects related to nanoparticle exposures: Environmental, health and safety considerations for assessing hazards and risks. *Pharmacol. Ther.* 2008;120:35–42
14. Shvedova A.A., Kisin E.R., Mercer R., Murray A.R., Johnson V.J., Potapovich A.I. i wsp.: Unusual inflammatory and fibrogenic pulmonary responses to single walled carbon nanotubes in mice. *Am. J. Physiol. Lung Cell. Mol. Physiol.* 2005;289:L698–L708
15. Shvedova A.A., Kisin E.R., Murray A.R., Johnson V.J., Gorelik O., Arepalli S.: Inhalation vs. aspiration of singlewalled carbon nanotubes in C57BL/6 mice: inflammation, fibrosis, oxidative stress, and mutagenesis. *Am. J. Physiol. Lung Cell. Mol. Physiol.* 2008;295: L552–L565
16. Oberdörster G., Sharp Z., Atudorei V., Elder A., Gelein R., Kreyling W. i wsp.: Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhal. Toxicol.* 2004;16:437–445
17. Elder A., Gelein R., Silva V., Feikert T., Opanashuk L., Carter J. i wsp.: Translocation of inhaled ultrafine manganese oxide particles to the central nervous system. *Environ. Health Perspect.* 2006;114:1172–1178
18. Donaldson K., Stone V., Seaton A., MacNee W.: Ambient particle inhalation and the cardiovascular system: potential mechanisms. *Environ. Health Perspect.* 2001;109,Supl. 4:523–527
19. Donaldson K., Stone V.: „Currents hypotheses on the mechanisms of toxicity of ultrafine particles. *Ann. Ist. Super. Sanita* 2003;39:405–410
20. Park E.J., Choi J., Park Y.K., Park K.: Oxidative stress induced by cerium oxide nanoparticles in cultured BEAS-2B cells. *Toxicology* 2008;245:90–100
21. Li N., Xia T., Nel A.E.: The role of oxidative stress in ambient particulate matter induced lung diseases and its implications in the toxicity of engineered nanoparticles. *Free Radic. Biol. Med.* 2008;44:1689–1699
22. Donaldson K.: The toxicity of airborne nanoparticles. W: Mark D. [red.]. *Nanomaterials — a risk to health at work? First International Symposium on Occupational Health Implications of Nanoparticles. Report of presentations at plenary and workshop sessions and summary of conclusions. 12–14 października 2004, Buxton, Wielka Brytania. Health and Safety Laboratory, Buxton 2004, ss. 30–34*
23. Muhlfeld C., Rothen-Rutishauser B., Blank F., Vanhecke D., Ochs M., Gehr P.: Interactions of nanoparticles with pulmonary structures and cellular responses. *Am. J. Physiol Lung Cell. Mol. Physiol.* 2008;249:L817–L829
24. Aillon K.L., Xie Y., El-Gendy N., Berkland C.J., Forrest M.L.: Effects of nanomaterial physicochemical properties on *in vivo* toxicity. *Adv. Drug Deliv. Rev.* 2009;61:457–466
25. Murray A.R., Kisin E., Leonard S.S., Young S.H., Kommineni C., Kagan V.E. i wsp.: Oxidative stress and inflammatory response in dermal toxicity of single-walled carbon nanotubes. *Toxicology* 2009;257:161–171
26. Arora S., Jain J., Rajwade J.M., Paknikar K.M.: Cellular response induced by silver nanoparticles. *In vitro studies. Toxicol. Lett.* 2008;179:93–100
27. PN-ISO 4225/AK:1999 Jakość powietrza. Zagadnienia ogólne. Terminologia. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 1999
28. Driscoll K.E., Carter J.M., Howard B.W., Hassenbein D.G., Pepelko W., Baggs R.B. i wsp.: Pulmonary inflammatory, chemokine, and mutagenic responses in rats after subchronic inhalation of carbon black. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 1996;136(2):372–380
29. Oberdörster G.: Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 2001;74(1):1–8
30. Shi J.P., Harrison R.M., Evans D.: Comparison of ambient particle surface area measurement by epiphaniometer and SMPS/APS. *Atmos. Environ.* 2001;35:6193–6200
31. International Commission on Radiological Protection: Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. *Annals of the ICRP* 24 (1–3). Elsevier Science, Oxford 1994
32. Maynard A.D.: Estimating aerosol surface area from number and mass concentration measurements. *Ann. Occup. Hyg* 2003;47:123–144
33. Ramachandran G., Paulsen D., Watts W., Kittelson D.: Mass, surface area and number metrics in diesel occupational exposure assessment. *J. Environ. Monit.* 2005;7:728–735