

dr inż. **Andrzej ZBROWSKI**<sup>1</sup>

## MONITOROWANIE NANOCZĄSTEK W PROCESACH WYTWARZANIA I UŻYTKOWANIA

### Monitoring of nanoparticles in the processes of production and maintenance

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono problemy wynikające z rozwoju nanotechnologii, jako źródło ryzyka oraz zagrożeń zdrowotnych i środowiskowych. Rosnąca produkcja i użycie nanomateriałów w sposób nieunikniony prowadzą do ich akumulacji w środowisku, która może mieć groźne implikacje dla człowieka i ekosystemu. Obecność nanocząstek w środowisku niesie poważne, dotychczas jeszcze nie w pełni zidentyfikowane i stwierdzone negatywne skutki zarówno w stosunku do zdrowia ludzkiego, jak i środowiska naturalnego. Cząstki średnicy 30 nm bezproblemowo wnikają do żywych komórek, tym samym mogą powodować trudne do określenia (przy obecnym stanie wiedzy) skutki uboczne. Rozwiązania pozwalające na wykorzystanie nanocząstek w przemyśle pojawiły się całkiem niedawno, zatem nie ma jeszcze wyczerpujących, długofalowych badań wpływu nanocząstek na życie i zdrowie ludzi. W tym celu niezbędny jest dynamiczny rozwój instrumentarium badawczego umożliwiającego wykrywanie nanocząstek i analizę procesów wywołanych ich oddziaływaniem. Coraz bardziej powszechna obecność nanomateriałów w produktach codziennego użytku wymaga stworzenia odpowiednich prawnych i technologicznych regulacji, by w skuteczny sposób zabezpieczyć konsumenta przed nieświadomym stosowaniem produktów zawierających niebezpieczne dla zdrowia nanomateriały, w tym i nanocząstki. Dokładna ocena ryzyka generowanego obecnością nanocząstek wymaga stosowania efektywnych analitycznych metod określania ich mobilności, reaktywności, katalityczności, ekotoksyczności i trwałości. W technikach tych konieczne jest uniknięcie zakłóceń pochodzących od nanocząstek obecnych w środowisku w sposób naturalny. W artykule wykazano potrzebę monitorowania nanocząstek w procesach wytwarzania i użytkowania. Zaprezentowano dostępne techniki monitorowania nanocząstek w środowisku. Przedstawiono ich podstawowe wymagania oraz zalety i ograniczenia. Omówiono trzy podstawowe etapy procesu monitoringu nanocząstek: pobieranie i przygotowanie próbki, separację nanocząstek oraz ich identyfikację. Wskazano kierunki rozwoju prac badawczych związanych z doskonaleniem metod monitorowania obecności nanocząstek.

#### Summary

The article discusses health and environmental issues accompanying the development of nanotechnologies. The growing production and use of nanomaterials inevitably leads to their accumulation in the environment, which in the future may have harmful effects on the human health and the ecosystem. The negative influence of the presence of nanoparticles on environmental quality and human health has not been fully identified and investigated yet. Particles with 30 nm in diameter can freely penetrate into living organisms and therefore result in serious side effects, which at the current state of the art are difficult to be defined. Solutions allowing for the industrial application of nanoparticles are still pretty new, which means that the results of studies on their influence on human health and life are not comprehensive. Therefore, it is extremely important to boost the development of tools that enable the detection of nanoparticles and the analysis of processes they evoke. The more widespread presence of nanomaterials in everyday goods calls for the introduction of legal and technological regulations that will protect the consumer against the use of products containing nanomaterials and nanoparticles which cause health hazards. A thorough assessment of risk stemming from the presence of nanoparticles requires the use of effective analytical methods for the determination of their mobility, reactivity, catalyticity, eco toxicity and life. In such techniques it is necessary to avoid any interferences that come from nanoparticles naturally present in the environment. The article shows the importance of the monitoring of nanoparticles and describes currently available techniques for the monitoring of nanoparticles in the environment. Their basic requirements as well as advantages and drawbacks are presented. Moreover, the three stages of the nanoparticle monitoring process, that is sampling and sample preparation; separation of nanoparticles; and identification of nanoparticles, are discussed. The authors also show future R&D directions aiming at the improvement of methods for the monitoring of the presence of nanoparticles.

**Słowa kluczowe:** nanotechnologia, monitoring, nanomateriały, bezpieczeństwo środowiskowe;

**Keywords:** nanotechnology, monitoring, nanomaterials, environmental safety;

<sup>1</sup> Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy.

## Wprowadzenie

Rozwój nanonauki i nanotechnologii w znaczący sposób wpłynie na zmiany w produkcji przemysłowej i gospodarce [1]. Obecność nanocząstek w środowisku może mieć poważne skutki zarówno dla zdrowia ludzkiego, jak i dla środowiska naturalnego [2]. Nanotechnologia niesie ze sobą ryzyko zagrożeń zdrowotnych i środowiskowych [3] wynikające ze wzrastającego użycia nanocząstek w aplikacjach przemysłowych. Dokładna ocena ryzyka generowanego obecnością nanocząstek wymaga stosowania efektywnych analitycznych metod określenia ich mobilności, reaktywności, ekotoksyczności i trwałości [4]. Obecnie w wielu produktach komercyjnych już powszechnie wykorzystywane są nanomateriały występujące również jako produkty uboczne lub odpady. Stanowiska pracy, na których wytwarzane są nanomateriały, stanowią najbardziej prawdopodobne miejsca ujawniania skutków oddziaływania nanocząstek na organizm ludzki. Szacuje się, że np. we Włoszech liczba pracowników poddawanych ekspozycji nanocząstek w miejscu pracy przekracza 350 000 [5]. Źródłem emisji są procesy topienia i oczyszczania metali, spawania, spalania oraz dymy [6], [7]. Źródłem nanocząstek są także procesy eksploatacji, których nanozanieczyszczenia pochodzą np. z niekompletnego spalania oleju napędowego<sup>2, 3</sup>. Rosnąca produkcja i użycie nanomateriałów w sposób nieunikniony prowadzą do ich akumulacji w środowisku, która może mieć groźne implikacje dla człowieka i ekosystemu. Współczesne systemy wykrywania nie są w stanie rozróżnić źródeł emisji nanocząstek<sup>4, 5, 6</sup>.

Skuteczny monitoring nanocząstek w środowisku wymaga zastosowania metod analitycznych zdolnych do wykrywania nanogramowych lub piktoqramowych ilości w jednym litrze powietrza. Konieczne jest uniknięcie zakłóceń pochodzących od nanocząstek obecnych w środowisku w sposób naturalny [8], [9].

## Zagrożenie zdrowia

Zastosowanie nanocząstek oprócz wymiernych korzyści niesie również trudne do oszacowania przy

obecnym stanie wiedzy ryzyko zagrożenia zdrowia. Nanotechnologia coraz częściej stosowana jest w przypadku produktów konsumpcyjnych, leków oraz wyrobów budowlanych. Różnego rodzaju substancje chemiczne w postaci projektowanych nanocząstek nanorurek, nanopłytek, nanowirów, czy nanowłókien są stosowane w różnych gałęziach krajowych przedsiębiorstw, coraz częściej w małych i średnich zakładach pracy. Małe rozmiary pozwalają na niezauważalne przez człowieka pokonywanie barier ustrojowych. Przystawanie nanocząstek najczęściej odbywa się drogą inhalacyjną, ale ze względu na małe rozmiary wchłanianie przez skórę i oczy lub drogą pokarmową jest również powszechną formą przyswajania. Po ich wnikięciu przez drogi oddechowe, płuca szybko rozprzodkują cząstki do centralnego i obwodowego układu nerwowego układu krwionośnego i limfatycznego [10]. Reakcją organizmu na toksyczne oddziaływanie nanocząstek jest stan zapalny, stres oksydacyjny oraz reakcje alergiczne [11]. Bezpośrednie oddziaływanie nanocząstek na glony, rośliny i grzyby polega na reakcjach redoks z cząstkami organicznymi, co powoduje zakłócenia procesów fotosyntezy i oddychania. Oddziaływanie nanocząstek na środowisko i organizmy zależy od ich właściwości, sposobów transportu i interakcji z komórkami roślin, zwierząt i bakterii. Nanocząstki zawierające srebro wywołują zmiany w błonach, zwiększając ich porowatość [12]. Translokacja cząstek z płuc do układu krwionośnego zależy od rozmiaru nanocząstki. Np. nanocząstki Ir o rozmiarach 15 nm są wchłaniane szybciej niż cząstki o rozmiarach 80 nm. Jednocześnie cząstki o średnicy 34 nm szybciej dostają się z płuc do węzłów chłonnych, zaś te o średnicy 6 nm szybciej wędrują do krwiobiegu.

Badano pod tym względem nanocząstki: srebra, kobaltu i uranu. Dzięki napromieniowaniu, można było stwierdzić np. gdzie w organizmach różnych zwierząt są magazynowane te cząstki i jaka jest ich szkodliwość. Na działanie tych cząstek wystawiano m.in. łososie. Dzięki badaniom radiograficznym i anatomicznym stwierdzono, że największą szkodliwość wśród badanych substancji miały nanocząstki srebra, których już dość niewielka ilość uszkadzała skrzelą ryb. Należy zaznaczyć, że użycie nanosrebra wzrasta m.in. w produkcji ubrań, lodówek, pralek – m.in. w związku z antybakteryjnymi właściwościami tego materiału.

Zgodnie z wynikami najnowszych badań nanocząstki srebra są bardziej szkodliwe dla jąder komórki niż nanocząstki dwutlenku tytanu [13]. Zastosowanie obu typów nanocząstek może mieć wpływ na jądra komórki, a w konsekwencji także na płodność. Nanocząstki srebra mają toksyczny wpływ na komórki – powstrzymują one wzrost komórkowy oraz rozmnażanie. Powodują obumarcie komórki w zależności od natężenia oraz czasu, w jakim ko-

<sup>2</sup> Nanocząstki w spalinach. <http://www.studentnews.pl/s/58/6279-Nauka-i-zycie-NEWSY/37507-Nanoczastki-w-spalinach.htm?c1=1234>

<sup>3</sup> NANOMATERIAŁY. <http://www.chem.univ.gda.pl/ztch/dydaktyka/wyklady/nanomaterialy.pdf>

<sup>4</sup> Nanoparticle Monitoring in Occupational Environments –Comparing and Contrasting Measurement Metrics. [http://www.baesg.org/nano\\_TSI.pdf](http://www.baesg.org/nano_TSI.pdf)

<sup>5</sup> Nanoparticle Monitoring.State of the art. And development strategies. [http://euvri.risk-technologies.com/events/event\\_3/1%206%20tardif.pdf](http://euvri.risk-technologies.com/events/event_3/1%206%20tardif.pdf)

<sup>6</sup> Engineered Nanoparticles. Current Knowledge about OHS Risks and Prevention Measures <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-656.pdf>

mórka znajdowała się pod wpływem nanocząstek srebra. Efekt ten jest mniej widoczny w przypadku nanocząstek dwutlenku tytanu, choć oba typy powodują uszkodzenia w obrębie DNA, właściwego dla danego typu komórki. W przypadku długotrwałej ekspozycji na nanocząsteczki dwutlenku tytanu mogą zostać zakłócone funkcje mózgowe organizmu.

Nanocząstki zawierające metale grupy przejściowej powodują powstawanie wysokoreaktywnych rodników hydroksylowych, które uszkodzają DNA, błony komórkowe i białka. Nanorurki węglowe stwarzają niebezpieczeństwo zaburzeń replikacji DNA, co przyczynia się do powstawania nowotworów [14, 15].

Potencjalne ryzyko wynikające z zastosowania nanocząstek musi być monitorowane – w ten sposób przemysł będzie mógł rozwijać produkty bezpieczne zarówno dla ludzi, jak i przyrody [16].

## Techniki monitoringu

Proces monitoringu nanocząstek składa się z trzech podstawowych etapów: pobierania i przygotowania próbki, separacji nanocząstek oraz ich identyfikacji.

Pobieranie i przygotowanie próbki jest krytycznym krokiem w procesie monitoringu, ponieważ może wpływać na zmianę stanu rozproszenia [17]. Nanocząstki obecne w środowisku znajdują się w stanie dynamicznej nierównowagi, który jest wrażliwy na chemiczne i fizyczne zakłócenia<sup>7</sup>. Ponadto obecność naturalnych nanocząstek oraz substancji organicznych komplikuje procedury analityczne. Ponieważ rozproszenie nanocząstek w środowisku jest zmienne, pomiar stężenia i wykrywanie obecności powinny być procesami *in situ*. Obecnie jest to niemożliwe, ponieważ nie istnieją wystarczająco czułe mobilne urządzenia umożliwiające realizację takich pomiarów. Prowadzenie analiz gleb i osadów jest jeszcze bardziej skomplikowane z powodu obecności coraz większej ilości naturalnych cząstek stałych o rozmiarach zbliżonych do nano. Użycie metod dyspersyjnych z zastosowaniem dyspersantów chemicznych lub akustycznych umożliwia uwolnienie nanocząstek do fazy ciekłej, jednak może powodować zmianę stanu fizykochemicznego. Rozdzielenie nanocząstek jest niezwykle istotnym krokiem w procesie analitycznym. Dostępne metody są jednak niedoskonałe. Proces wyodrębniania może polegać na wykorzystaniu rozpuszczalności nanocząstek (np. w toluenie), ale nanorurki są trudno rozpuszczalne nawet w rozpuszczalnikach organicznych. Ogólnie zalecaną metodą jest wirowanie, przy czym proces ten może wywołać agregację. Wirowanie jest bardziej wydajne w usuwaniu gęstych

cząstek mineralnych, lecz częściej stosuje się prostszą metodę mikrofiltracji. W mikrofiltracji nanocząstki są deponowane na membranie mechanicznie lub elektrostatycznie. Filtrację z przepływem krzyżowym z powodzeniem wykorzystuje się w badaniach nanocząstek pochodzenia naturalnego. Rezultat działania zależy od właściwości membrany i warunków pracy. Możliwe jest stosowanie membran o rozmiarach porów poniżej 1 nm (nanofiltracja). Dlatego też membrany posiadają wysoki potencjał aplikacyjny w procesie analizy nanocząstek.

Inna technika rozdzielania wykorzystuje strumień przepływu. Metoda umożliwia separowanie nanocząstek według rozmiaru pod względem ich współczynników rozpraszania w bardzo cienkim otwartym kanale. Technika ta jest szczególnie skuteczna w analizie nanocząstek syntetycznych [18].

Podstawowym problemem w procesie detekcji nanocząstek jest niezmiernie mała ilość materiału badawczego. Stwarza to ogromne trudności w uzyskaniu reprezentatywnych wyników badań. Istniejące techniki detekcji wymagają przygotowania próbki zwykle poprzez odparowanie rozpuszczalnika, co powoduje agregację nanocząstek i wytrącanie soli. Ze względu na rozmiary nanocząstek do dokładnego pomiaru mogą być stosowane jedynie techniki umożliwiające uzyskanie subnanometrowej rozdzielczości. Do tego celu używa się głównie mikroskopów elektronowych, mikroskopów sił atomowych lub mikroskopów tunelowych.

Obecne możliwości monitoringu umożliwiają zastosowanie kilku metod w celu określenia narażenia pracowników na działanie nanocząstek unoszących się w powietrzu. Ocena może być wykonywana tradycyjną metodą pobierania próbek środowiskowych za pomocą próbników stacjonarnych (próbki powierzchniowe), próbników skupionych wokół strefy oddechowej pracownika (próbki indywidualne), oraz urządzeń czasu rzeczywistego umożliwiających pomiary bezpośrednie. Z reguły próbkowanie indywidualne jest stosowane w celu określenia dokładnej reprezentacji narażenia pracownika. Próbkowanie powierzchniowe oraz pomiary bezpośrednie są bardziej użyteczne w ocenie potrzeb związanych z doskonaleniem systemów sterowania procesem produkcyjnym i stosowanych praktyk pracowniczych. Dostępne techniki pomiarowe różnią się stopniem złożoności oraz przydatności dla ciągłego monitoringu określonego rutynowymi procedurami. Prowadzone badania mają na celu rozwój strategii monitoringu umożliwiającej jednocześnie określanie masy, jak również powierzchni nanocząstek osadzonych w próbnikach. Brakuje uniwersalnej metody określającej narażenia na oddziaływanie nanometrycznych aerozoli. Zalecane jest jednocześnie stosowanie wszystkich dostępnych technik do scharakteryzowania narażeń występujących w miejscu pracy [19]. National Institute for Occupa-

<sup>7</sup> Approaches to Safe Nanotechnology Managing the Health and Safety Concerns Associated with Engineered Nanomaterials. <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-125/>



tional Safety and Health (NIOSH) opracował technikę oceny emisji nanocząstek (Nanoparticle Emission Assessment Technique – NEAT) umożliwiającą jakościowe określenie emisji cząstek nanomateriałów inżynierskich w miejscu pracy [20].

Metody monitoringu nanocząstek polegają na pomiarze: rozmiaru, pola powierzchni i stężenia. Aby lepiej poznać źródła emisji nanocząstek oraz migrację zanieczyszczeń, niektórzy badacze wykorzystują technikę mapowania aerozolu, która łączy pomiary ilości cząstek w wydychanej masie z określeniem koncentracji powierzchniowej [21] [22]. Informacja o związku pomiędzy różnymi wartościami może zostać użyta do przybliżonego określenia powierzchni nanocząstek. Jeżeli rozkład rozmiaru aerozolu pozostaje stały, relacja pomiędzy liczbą cząstek, polem powierzchni i masą będzie stała. W szczególności pomiar stężenia masowego może być wykorzystany do określenia stężenia powierzchniowego, zakładając, że stała proporcjonalności jest niezmienna. Do pomiaru rozrzutu wielkości cząstek można zastosować analizę z wykorzystaniem mikroskopu elektronowego w celu oszacowania powierzchni próbek.

Aparaty do monitoringu nanocząstek w swoim działaniu wykorzystują przede wszystkim optyczną technikę laserową. Wszystkie rozwiązania plasują się w obszarze zaawansowanych technologii optoelektronicznych i mechatronicznych.

Fotometry wykorzystują promień lasera do obliczenia stężenia masowego nanocząstek w czasie rzeczywistym w trybie pracy ciągłej. Umożliwiają pomiar cząstek zagregowanych o rozmiarze powyżej 100 nm.

Za pomocą promienia lasera liczniki stężenia cząstek umożliwiają pomiary ilości nanocząstek w strumieniu powietrza w czasie rzeczywistym. Można w ten sposób dokonać pomiaru pojedynczych nanocząstek o rozmiarach powyżej 10 nm.

Liczniki cząstek laserowo wykrywają pojedyncze nanocząstki w strumieniu powietrza. Umożliwiają pomiar cząstek zagregowanych o rozmiarze powyżej 300 nm.

Ładowarki dyfuzyjne<sup>8</sup> obliczają pole powierzchni cząstek za pomocą pomiaru ładunku elektrycznego na powierzchni cząstki. Umożliwiają pomiar pojedynczych nanocząstek o rozmiarach powyżej 10 nm.

Skaningowe mierniki mobilności różnicowej<sup>9</sup> obliczają liczbę cząstek poprzez dodatnie wzbudzenie elektryczne, a następnie separację ze względu na rozmiary cząstek za pomocą analizatora mobilności różnicowej (DMA). Podczas pomiaru cząstki

osadzają się na filtrze, gdzie precyzyjny elektrometr mierzy wielkość przepływającego prądu. Stopniowo zwiększając napięcie na DMA i mierząc powstały w każdym kroku prąd, otrzymywany jest parametr służący do wyliczenia liczby cząstek. Metoda umożliwia pomiar pojedynczych cząstek o rozmiarach powyżej 2 nm.

## Wnioski

Dokładna ocena ryzyka generowanego obecnością nanocząstek wymaga stosowania efektywnych analitycznych metod określenia ich mobilności, reaktywności, katalityczności, ekotoksyczności i trwałości. Dalszy rozwój prac badawczych związanych z monitorowaniem nanocząstek w procesach wytwarzania i użytkowania będzie zmierzać w kierunku opracowania metod i urządzeń umożliwiających monitorowanie online oraz określenia stopnia koncentracji nanocząstek in situ. Niezbędny jest także rozwój technologii umożliwiającej rozróżnianie źródeł emisji nanocząstek. Prace rozwojowe będą skoncentrowane na miniaturyzacji i zapewnieniu mobilności indywidualnych systemów monitorowania środowiska pracy. Jednocześnie doskonalone będą metody eliminacji zakłóceń wywoływanych obecnością nanocząstek pochodzenia naturalnego.

## Literatura

1. Mazurkiewicz A., *Nanonauki i nanotechnologie*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, 2007.
2. Simonet B. M., Valcárcel M., *Monitoring nanoparticles in the environment*. „Analytical and Bioanalytical Chemistry”, Volume 393, Number 1, pp. 17-21.
3. Manodori L., Benedetti A., *Nanoparticles monitoring in workplaces devoted to Nanotechnologies*, „Journal of Physics: Conference Series”, Volume 170, Issue 1, pp. 012001, (2009), 4 pp.
4. Brouwer D., Stuurman B., Welter J., Moehlmann C., Berges M., Bard D., Wake D., Jankowska E., Mark D., *The NANOSH database for results of workplace air monitoring studies to manufactured nanomaterials (MNM): A preliminary tool to estimate the potential for inhalation exposure?* Proceedings of 4th International Conference on Nanotechnology – Occupational and Environmental Health, Helsinki, Finland, 2009. [www.ttl.fi/fi/tyoterveyslaitos/strategia\\_arvot\\_vissio/Documents/Nanoprogram.pdf](http://www.ttl.fi/fi/tyoterveyslaitos/strategia_arvot_vissio/Documents/Nanoprogram.pdf)
5. Boccuni F., Rondinone B., Petyx C., Iavicoli S., *Potential occupational exposure to manufactured nanoparticles in Italy*. „Journal of Cleaner Production”, 16 (2008), pp. 949-956.
6. Jankowska E., Bard D., Zatorski W., *Emission of nanosize particles in the process of burning foams with nanoclay*. Proceedings of 4th International Conference on Nanotechnology

<sup>8</sup> AEROTRAK 9000 Nanoparticle Aerosol Monitor. [http://www.tsi.com/uploadedFiles/Product\\_Information/Literature/Brochures/AeroTrak.pdf](http://www.tsi.com/uploadedFiles/Product_Information/Literature/Brochures/AeroTrak.pdf)

<sup>9</sup> Monitor cząstek ultradrobnych TSI. [http://www.tsi.katowice.pl/D/3031\\_polski%20opis.pdf](http://www.tsi.katowice.pl/D/3031_polski%20opis.pdf)

- Occupational and Environmental Health, Helsinki, Finland 2009.  
[www.ttl.fi/fi/tyoterveyslaitos/strategia\\_arvot\\_vision/Documents/Nanoprogram.pdf](http://www.ttl.fi/fi/tyoterveyslaitos/strategia_arvot_vision/Documents/Nanoprogram.pdf)
7. Jankowska E., Zatorski W., *Emission of nano-size particles in the process of nanoclay blending*. Proceedings of IEEE 2009 Cancun, Mexico, 2009, pp. 147-151.
  8. Wigginton N., Haus K., Hochella M., *Aquatic environmental nanoparticles*. „Journal of Environmental Monitoring”, 2007, 9, pp. 1306-16.
  9. Hochella M., Lower S., Maurice P., Penn R., Sahai N., Sparks D., Twining B., *Nanominerals, mineral nanoparticles, and Earth systems*, „Science”. March 2008: Vol. 319 no. 5870, pp. 1631-1635.
  10. Lebkowska M., Zaleska-Radziwill M., *Występowanie i ekotoksyczność nanocząstek*, „Ochrona Środowiska”, 2011, Vol. 33, No. 4, pp. 23-26.
  11. Świdwińska-Gajewska A., *Nanocząstki – korzyści i ryzyko dla zdrowia*, „Medycyna Pracy”, 2007, 58(3), pp. 253-263.
  12. Ahamed M., AlSalhi M., Siddiqui M., *Silver nanoparticle applications and human health*, „Clinica Chimica Acta”, Vol: 411, Issue: 23-24, December 14, 2010, pp. 1841-1848.
  13. Zhang R., Bai Y., Zhang B., Chen L. Yan B., *The potential health risk of titania nanoparticles*, „Journal of Hazardous Materials”, Vol: 211-212, Complete, April 15, 2012, pp. 404-413.
  14. Reijnders, L., *Human health hazards of persistent inorganic and carbon nanoparticles*, „Journal of Materials Science”, Vol: 47, Issue: 13, July 2012, pp. 5061-5073.
  15. Silva L., Boit K., *Nanominerals and nanoparticles in feed coal and bottom ash: implications for human health effects*, „Environmental Monitoring and Assessment”, Vol: 174, Issue: 1-4, March 2011, pp. 187-197.
  16. Leskinen J., Joutsensaari J., Lyyränen J., Koivisto J., Ruusunen, J. Järvelä M., Tuomi T., Hämeri K., Auvinen A, Jokiniemi J., *Comparison of nanoparticle measurement instruments for occupational health applications*, „Journal of Nanoparticle Research”, Vol: 14, Issue: 2, February 2012, pp. 1-16.
  17. Kasper G, Seipenbusch M.: *Transport kinetics of airborne nanoparticles and their implications for exposure scenarios and workplace monitoring strategies*. Proceedings of 4th International Conference on Nanotechnology – Occupational and Environmental Health, Helsinki, Finland, 2009.  
[www.ttl.fi/fi/tyoterveyslaitos/strategia\\_arvot\\_vision/Documents/Nanoprogram.pdf](http://www.ttl.fi/fi/tyoterveyslaitos/strategia_arvot_vision/Documents/Nanoprogram.pdf)
  18. Gale B., Himanshu J. Sant H.: *Nanoparticle analysis using microscale field flow fractionation*. Microfluidics, BioMEMS, and Medical Microsystems V (Proceedings Volume), Proceedings of SPIE, Volume: 6465, January 2007. [www.mems.utah.edu/Papers/SPIE%20Paper%20FFF%20Decade%20of%20Progress.pdf](http://www.mems.utah.edu/Papers/SPIE%20Paper%20FFF%20Decade%20of%20Progress.pdf)
  19. Brouwer D., Gijsbers J., Lurvink M.: *Personal exposure to ultrafine particles in the workplace: exploring sampling techniques and strategies*, „The Annals of Occupational Hygiene”, [2004], 48(5), pp. 439–453.
  20. Methner M., Birch M., Evans D, Ku B, Crouch K, Hoover M, Mazzulxeli L., ed: *Case study: Identification and characterization of potential sources of worker exposure to carbon nanofibers during polymer composite laboratory operations*. „Journal of Occupational and Environmental Hygiene”, [2007], 4(12), pp.125–130.
  21. Evans D., Heitbrink W., Slavin T., Peters T., *Ultrafine and respirable particles in an automotive grey iron foundry*. „The Annals of Occupational Hygiene”, [2008], 52(1), pp. 9–21.
  22. Heitbrink W., Evans D., Peters T., Slavin T., *The characterisation and mapping of very fine particles in an engine machining and assembly facility*, „Journal of Occupational and Environmental Hygiene”, [2007], 4, pp. 341–351.

**dr inż. Andrzej Zbrowski** jest adiunktem w Instytucie Technologii Eksploatacji – PIB w Radomiu. Kieruje Zakładem Doświadczalnym. Jest autorem lub współautorem 190 publikacji naukowych, 42 uzyskanych patentów oraz 140 zgłoszeń patentowych. Brał udział w realizacji 40 projektów badawczych, ponadto kierował 12 projektami badawczymi i rozwojowymi.