

Małgorzata Maliszewska-Mazur*

NANOTECHNOLOGIA – NOWE WYZWANIA, NOWE MOŻLIWOŚCI I NOWE PROBLEMY

NANOTECHNOLOGY – NEW CHALLENGES, NEW POSSIBILITIES AND NEW QUESTIONS

Słowa kluczowe: nanotechnologia, nanonauka, ocena ryzyka, nanoryzyko.

Key words: nanotechnology, nanoscience, hazard evaluation, nanorisk.

Nanotechnology is generally defined as to create and use materials, devices and systems with unique properties at the scale of approximately 1 to 100 nm. Nanoparticles in materials exhibit unique physical, chemical, electrical, optical, mechanical and magnetic properties. The use of nanotechnology in consumer and industrial sectors is expected to increase significantly in the future. Rapid evolution of nanomaterials results in the liberation of a growing number of nanoparticles to the natural environment. However, insufficient knowledge on their properties and reaction with the environment is the reason why the risk linked with their application cannot be evaluated. Their potential hazard to human health, safety and natural environment, also with regard to the preparation of relevant legal procedures, should be evaluated scientifically. Study on the nanorisk includes analysis of the properties of free nanoparticles and the resulting influence on human health and environment.

1. WPROWADZENIE

Nanonauki i nanotechnologie to nowe dziedziny badań, zmierzające do sterowania fundamentalną strukturą zachowania materii na poziomie atomów i molekuł. Dziedziny te otwierają możliwości zrozumienia nowych zjawisk i wytwarzania materiałów i urządzeń o właściwościach, które z punktu widzenia obecnej wiedzy i technologii wydają się wręcz niemożliwe, a które można pożytkować w skali mikro i makro.

* *Dr Małgorzata Maliszewska-Mazur – Zakład Technologii Ścieków i Biologii Sanitarnej. Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa ul. Kolektorska 4, 01-692 Warszawa; tel.: 22 833 42 41 w. 22; e-mail: malgorzata.mazur@ios.edu.pl*

Nanotechnologia jest jedną z najbardziej obiecujących i gwałtownie rozwijających się dziedzin. Krótco po wprowadzeniu nowych nanomateriałów pojawiły się pytania dotyczące bezpieczeństwa ich stosowania. Wdrażanie nowych technologii niesie bowiem z sobą ryzyko, którego do tej pory kompleksowo nie badano.

2. NOWE MOŻLIWOŚCI

O nanonauce często mówi się „horyzontalna”, „kluczowa” lub „umożliwiająca”, ponieważ może przenikać wszystkie sektory techniki. Jest nauką interdyscyplinarną, wiążącą różne dziedziny nauki i rozwiązującą wielu problemów, wobec których stają dzisiejsze społeczeństwa. Termin nanotechnologia odnosi się do nauki i technologii w nanoskali atomów i cząsteczek, a także do tych zasad naukowych i nowych właściwości, które można zrozumieć i oparować działając w tej dziedzinie. Właściwości te można obserwować i wykorzystywać na przykład do budowy materiałów i urządzeń o nowych funkcjach i możliwościach. Nanotechnologie mają ogromne zastosowania w badaniach medycznych [Ostiguy 2006, Nanotechnology... 2007], np. w konstrukcji miniaturowych czujników lub sond diagnostycznych, a nawet całych systemów badawczych (minilab), które wszczepia się w celach diagnostycznych. Nowoczesne nanomateriały [<http://www.nanotet.pl>] poprawiają bioaktywność i biokompatybilność implantów, co prowadzi do prawdziwej rewolucji w implantologii. Liczne prace wykazują możliwość wprowadzania leków w chore miejsce, do komórek nowotworowych, aby je leczyć, co minimalizuje skutki uboczne. Nanotechnologie są także szeroko wykorzystywane w dziedzinie informatyki [Ostiguy i in. 2009], np. do tworzenia nośników danych o bardzo wysokich gęstościach zapisu oraz w nowych technologiach wyświetlania na elastycznym plastiku. Prace prowadzone nad realizacją komputerów kwantowych mogą być przełomem w technologii komputerowej. Przewiduje się ogromne oszczędności energii dzięki wynalazkom nanotechnicznym w dziedzinie komórek paliwowych lub ultralekkich nanostrukturalnych ciał stałych magazynujących wodór [Nanoparticles... 2007], a także budowie wydajnych i tanich słonecznych komórek fotowoltowych. Rozwój nanotechnologii spowodował już teraz ogromne zmiany w materiałoznawstwie. Nanocząstki stosuje się do wzmacniania lub zmiany właściwości materiałów oraz do poprawiania funkcjonalności kosmetyków. Dzięki nanostrukturom można modyfikować powierzchnie [American... 2007] tak, aby były, np. suche albo sterylne, zmieniać ich wytrzymałość czy odporność na temperaturę lub wysokie ciśnienia, co umożliwi postępowanie w astronautyce i przemyśle kosmicznym. Wynalazki nanotechnologiczne, takie jak zminiaturyzowane nanoetykietowanie, mogą być wykorzystywane do znakowania pochodzenia importowanej żywności. Metody remediacji (np. techniki fotokatalityczne) oparte na nanotechnologii umożliwią oczyszczanie i naprawianie szkód w środowisku naturalnym oraz usuwanie zanieczyszczeń, np. z wody lub gleby [<http://www.nanonet.pl>]. Nowatorskie systemy wykrywania, dzięki wysokiej specyficzności, zapewnią wczesne ostrzeżenie przez czynniki biologicznymi lub chemicznymi, docelowo aż do poziomu pojedyn-

czych cząstek. Poprawę ochrony majątku, obrazów, umożliwią nanozawieszki. Trwają także prace nad nowymi technikami szyfrowania przesyłu danych.

Na rynek trafiły już liczne oparte na nanotechnologii wyroby, w tym:

- 1) produkty medyczne (plastry, zastawki serca, sztuczne stawy);
- 2) komponenty elektroniczne,
- 3) rysoodporne farby,
- 4) urządzenia sportowe,
- 5) niegniotące i przeciwpotowe tkaniny

oraz

- 6) kremy do opalania.

Nanotechnologia przez zmniejszenie liczby i ilości surowców zużytych do produkcji może zmniejszyć ilość odpadów powstających w całym cyklu życia wyrobów.

3. PROBLEMY

Nanocząstki mogą zachowywać się w nieoczekiwany sposób ze względu na swe wielkie rozmiary. Może to stanowić duży problem w związku z ich produkcją, złomowaniem, obchodzeniem się z nimi, przechowywaniem i transportem. Konieczne jest również uwzględnienie skutków spowodowanych przez nanomateriały w ciągu ich całego cyklu życia [United Nations...]. Ogółem, ochrona zdrowia publicznego, konsumentów i środowiska naturalnego wymaga, aby osoby zaangażowane w rozwój nanotechnologii (badacze, personel projektowo-konstrukcyjny, producenci i dystrybutorzy) odnosiły się do wszelkich ewentualnych zagrożeń najwcześniej jak to możliwe, na podstawie wiarygodnych danych i analiz naukowych oraz stosując właściwe metody [Ku europejskiej strategii... 2006]. Jest to szczególnie trudne wyzwanie, ponieważ przewidywanie właściwości produktów nanotechnologii wymaga jednoczesnego brania pod uwagę efektów zarówno fizyki klasycznej, jak i mechaniki kwantowej. Pod wieloma względami projektowanie i budowanie nowej substancji za pomocą nanotechnologii można porównać do tworzenia nowego związku chemicznego. W rezultacie ustosunkowanie się do potencjalnych zagrożeń powodowanych przez nanotechnologię dla zdrowia ludzkiego, środowiska naturalnego i konsumentów wymagać będzie oceny możliwości ponownego wzięcia pod uwagę obecnych danych i generowania nowych, specyficznych w odniesieniu do nanotechnologii, danych toksykologicznych i ekotoksykologicznych (w tym reakcji na określone dawki i danych narażenia). To także wymaga badań oraz – w razie potrzeby – przystosowania metod analizy ryzyka. W praktyce odniesienie się do potencjalnych zagrożeń związanych z nanotechnologią wymaga zintegrowania analizy ryzyka z każdym etapem cyklu życiowego produktów opartych na nanotechnologii.

Panuje powszechne przekonanie o konieczności zdobycia wiedzy naukowej na temat bezpieczeństwa produkowanych nanomateriałów. Jednym z głównych priorytetów w dziedzinie nanonauki i nanotechnologii jest zebranie danych dotyczących potencjalnych za-

grożeń dla ludzi i środowiska oraz opracowanie metod ich pozyskania. Dane powinny dotyczyć narażenia w całym cyklu życia nanomateriałów lub produktów je zawierających. Konieczne jest szczegółowe opracowanie wielu zagadnień związanych z oceną ryzyka, a mianowicie:

- 1) metod oceny narażenia, metod pomiarów i klasyfikacji nanomateriałów i materiałów referencyjnych,
- 2) sposobów pobierania próbek,
- 3) metod analitycznych stosowanych w badaniach narażenia.

4. STAN PRAWNY

W Komunikacie Komisji Europejskiej „Ku europejskiej strategii dla nanotechnologii” [2004] zalecono wdrożenie działań mających na celu rozwój w zakresie nanonauk i nanotechnologii, w szczególności zajęcie się wszelkimi potencjalnymi zagrożeniami dla zdrowia, bezpieczeństwa, środowiska naturalnego oraz konsumentów poprzez generowanie danych potrzebnych do analizy ryzyka, integrowanie analizy ryzyka w każdym etapie cyklu życia produktów opartych na nanotechnologii wraz z przystosowaniem obecnych oraz, w razie potrzeby, opracowanie nowych metodologii. Niepokój budzą dowody zagrożenia spowodowanego przez niektóre nanomateriały oraz ogólny brak metod właściwej oceny zagrożeń związanych z nanomateriałami. Komitet naukowy ds. pojawiających się i nowo rozpoznanych zagrożeń dla zdrowia (SCENIHR) wydał opinię w sprawie oceny ryzyka w związku z nanotechniką [Nanonauka... 2007, SCENIHR 2006], w której zidentyfikował w odniesieniu do niektórych nanomateriałów powodowane przez nie zagrożenia dla zdrowia i toksyczne skutki dla organizmów biologicznych.

Istniejące metody toksykologiczne i ekotoksykologiczne oceny zagrożeń związanych z nanocząstkami są niewystarczające do oceny wszystkich zagrożeń [Rezolucja... 2008]. W odniesieniu do kosmetyków stwierdzono, że w świetle najnowszych informacji konieczne jest dokonanie przeglądu bezpieczeństwa nanomateriałów używanych w filtrach przeciwsłonecznych. Podkreślono możliwość powodowania przez nie zmian fizjologicznych skóry i działanie mechaniczne, polegające na przenikaniu przez skórę.

Termin „nanotechnologia” został po raz pierwszy użyty przez znanego fizyka, Richarda Feynmana, w 1974 r. podczas wykładu zatytułowanego „There's a Plenty of Room at the Bottom”. Wyobrażał on sobie fabryki, w których używałoby się nanomaszyn do produkcji złożonych produktów (włącznie z tymi nanomaszynami). Sadził, że stworzy to nowe możliwości dla ludzkości (lepsze i tańsze materiały). Od tej pory funkcjonowało wiele znaczeń terminów związanych z nanotechnologią. Zgodnie z zaleceniami Parlamentu Europejskiego, zaniepokojonego stosowaniem nieprecyzyjnej terminologii, wprowadzono do prawodawstwa wspólnotowego kompleksowe, poparte naukowo definicje dotyczące nanomateriałów [Doskonalenie systemów... 2008; <http://www.un.org/millennium/>]:

- 1) nanonauka to badanie zjawisk i manipulacja elementami materii na poziomie atomowym, molekularnym i makromolekularnym (zakres od jednego do stu nanometrów), gdzie właściwości materii różnią się w istotny sposób od właściwości w większych skalach wymiarowych;
- 2) nanotechnologia to projektowanie i wytwarzanie struktur, których przynajmniej jeden rozmiar jest poniżej 100 nm i które posiadają nowe własności wynikające z nanorozmiaru;
- 3) nanoskalę określa się jako posiadającą co najmniej jeden wymiar rzędu 100 nm lub mniej; często dokonuje się rozróżnienia pomiędzy:
 - nanoobjektami, definiowanymi jako „oddzielne części materiału o jednym, dwóch lub trzech wymiarach zewnętrznych w nanoskali”, tj. materiały składające się z pojedynczych obiektów o bardzo małych wymiarachoraz
 - materiałami nanostrukturalnymi, definiowanymi, jako materiały „mające strukturę wewnętrzną lub powierzchniową w nanoskali”, tj. cechujące się porami o małych wymiarach.

W przepisach legislacyjnych Parlamentu Europejskiego [Rezolucja... 2006] nie uwzględniono nanomateriałów. Zalety nanomateriałów można wykorzystać w bezpieczny i odpowiedzialny sposób jedynie opierając się na jasnych ramach regulacyjnych i politycznych (przepisy legislacyjne i inne), które wyraźnie uwzględniają istniejące i spodziewane zastosowania nanomateriałów oraz sam charakter potencjalnych problemów związanych ze zdrowiem, środowiskiem i bezpieczeństwem przez cały cykl ich życia.

Analiza rozporządzenia REACH [Rozporządzenie... 2006], regulującego wprowadzanie na rynek unijny substancji chemicznych (również w wyrobach), wskazuje na wiele niedoskonałości w podejściu do nanomateriałów, poczynając od identyfikacji substancji, a kończąc na dostosowaniu metod oceny ryzyka wraz z klasyfikacją. Ponieważ uważa się, że właściwości i potencjalne zagrożenia nanomateriałów są w większej mierze determinowane przez liczbę cząstek, strukturę powierzchni i aktywność powierzchniową, aniżeli przez ich tonaż, progi tonażu mogą się okazać nieodpowiednie. Ocena narażenia jest obowiązkowa dopiero dla substancji produkowanych w ilości powyżej 10 ton rocznie oraz jeżeli stwierdzono, że odpowiadają one kryteriom klasyfikacji jako niebezpieczne (dyrektywa 67/548/EWG). Niestety nie można ocenić ryzyka związanego z nanomateriałami z powodu trudności z identyfikacją zagrożeń, co uniemożliwia prawidłową ocenę narażenia.

W rozporządzeniu REACH wymaga się powiadamiania o substancjach w wyrobach, jeśli są to substancje wzbudzające szczególnie duże obawy, znajdujące się na liście substancji kwalifikujących się i które występują w stężeniach powyżej 0,1% wag. w wyrobie oraz w całkowitej ilości stanowiącej ponad jedną tonę w tych wyrobach na producenta rocznie. Przy takich wymogach na liście substancji kwalifikujących się nie figuruje ani jeden nanomateriał. Jeżeli nawet zostaną rozwiązane problemy z identyfikacją zagrożeń

związanych z nanomateriałami, to nanomateriały prawdopodobnie nie przekroczą progów tonażu i stężenia, więc w wyrobach nie będą zgłaszane.

Problem stanowią również odpady zawierające nanocząsteczki, ponieważ brak przepisów odnoszących się do nanomateriałów w prawodawstwie dotyczącym odpadów (od stałych odpadów komunalnych do odpadów niebezpiecznych). Przetwarzanie odpadów jest zależne m.in. od ich klasyfikacji, niestety przepisy dotyczące ich utylizacji nie będą miały zastosowania do nanomateriałów dopóki nie zostaną uzgodnione metody identyfikacji zagrożeń. Dopuszczalne wartości emisji ze spalania odpadów mają zastosowanie tylko do niektórych znanych zanieczyszczeń, nie ma zaś norm dotyczących nanomateriałów, chociaż wiadomo już, że w stosunku do niektórych z nich powinno być wymagane spełnienie specjalnych kryteriów, np. w stosunku do nanorurek węglowych, mających cechy zbliżone do azbestu [Nanoparticles... 2007] – wykazujących stabilność nawet w bardzo wysokich temperaturach.

Uważa się, że szczególnie ważne jest uwzględnienie nanomateriałów co najmniej w prawodawstwie dotyczącym chemikaliów (REACH, biocydy), żywności (środków spożywczych, dodatków do żywności i produktów paszowych wyprodukowanych z organizmów zmodyfikowanych genetycznie), w prawodawstwie dotyczącym ochrony pracowników oraz w prawodawstwie odnoszącym się do jakości powietrza, jakości wody oraz odpadów.

Zmiany w prawodawstwie dotyczącym odpadów powinny zawierać:

- 1) wpis dotyczący nanomateriałów w wykazie odpadów (decyzja 2000/532/WE);
- 2) przegląd kryteriów przyjęcia odpadów na składowiska (decyzja 2003/33/WE);
- 3) przegląd dopuszczalnych wartości emisji przy spalaniu odpadów w celu uzupełnienia pomiarów opartych na masie przez systemy pomiarowe oparte na liczbie cząstek lub powierzchni.

Konieczny jest przegląd dopuszczalnych wartości emisji i środowiskowych norm jakości w przepisach dotyczących powietrza i wody w celu uzupełnienia pomiarów opartych na masie przez systemy pomiarowe oparte na liczbie cząstek lub powierzchni tak, aby odpowiednio uwzględnić nanomateriały [Nanonauka... 2007]. Działania regulacyjne w dziedzinie nanomateriałów powinny również uwzględnić nanomateriały wytwarzane jako niezamierzone produkty uboczne powstające w procesach spalania, będące źródłem emisji bardzo drobnych cząstek (poniżej 2,5 µm) do otaczającego powietrza.

5. NANORYZYKO

Należy poddać naukowej analizie potencjalne zagrożenia dla zdrowia, bezpieczeństwa oraz środowiska naturalnego [The appropriateness... 2006]. Obszar badań nad bezpieczeństwem stosowania nanotechnologii zawiera badanie właściwości wolnych nanocząsteczek i wynikającego z nich oddziaływania na zdrowie i środowisko człowieka. Trwają badania mające na celu określenie tych cech, które mogą zadecydować, że dana

nanocząsteczka może stać się zagrożeniem naszego zdrowia czy środowiska. Badania powinny dać odpowiedź na pytanie, co z punktu widzenia nanoryzyka jest istotne: skład chemiczny, wielkość, struktura powierzchni, a może reaktywność? Nie wiemy co się dzieje z nanocząstkami/nanomateriałami w środowisku ani jaki jest mechanizm ich oddziaływania na organizmy.

Do zdecydowanej większości nanomateriałów nie można zastosować już opracowanych metodyk badania toksyczności, ekotoksyczności i scenariuszy narażenia. Wydaje się wątpliwe, aby metody referencyjne, stosowane obecnie do pomiarów prężności par, rozpuszczalności w wodzie, wartości współczynnika podziału substancji pomiędzy oktanol i wodę oraz podatności na biodegradację, mogły być stosowane w odniesieniu do nanomateriałów i aby można było, za ich pomocą, opisać i przewidzieć zachowanie się nanomateriałów w środowisku wodnym [List of manufactured... 2008; Petersen i in. 2008; Fortner i in. 2005]. Prężność par oraz rozpuszczalność w wodzie substancji konwencjonalnych informuje o podziale substancji między wodę i powietrze. Jeżeli w odniesieniu do nanomateriałów w ogóle są to właściwości mierzalne, mogą one nie być użyteczne do przewidywania zakresu, w jakim nanocząstki dzielą się pomiędzy fazy wody i powietrza. Opracowanie metodyk i procedur oceny właściwości nanocząsteczek wymaga znajomości ich zachowania się oraz ich losu w środowisku [Boxall i in. 2007].

Informacje toksykologiczne sugerują, że sumaryczna wielkość powierzchni nanocząsteczek może być wykorzystana jako rozsądna miara ekotoksykologicznych skutków obecności nanocząsteczek w obrębie systemów biologicznych. Na podstawie dotychczasowych badań stwierdzono, że wolne nanocząstki oraz charakteryzujące się małą rozpuszczalnością są priorytetowe z punktu widzenia ryzyka powodowanego dla zdrowia ludzi i środowiska. Problemem w badaniach toksyczności nanocząstek jest to, że w przeważającej większości badania *in vivo* oraz *in vitro* są badaniami krótkoterminowymi, podczas gdy wpływ nanocząsteczek na zdrowie ludzi i środowisko występuje w warunkach narażenia długoterminowego.

6. PODSUMOWANIE

Aktualnie nie jest dostępny w pełni opracowany zbiór przepisów prawnych dotyczących nanomateriałów i dlatego konieczne jest uzupełnienie braków w tym względzie. Dane dotyczące produkcji, obecności w środowisku oraz zagrożeń ze strony nanocząstek są fragmentaryczne, a ich uzupełnienie niezbędne do oceny zagrożeń pochodzących od nanocząstek. Wydaje się, że jeżeli nanomateriały są mocno ulokowane w matrycach dużych struktur, na przykład w drukowanych obwodach elektronicznych, prawdopodobieństwo ich uwolnienia jest niewielkie i nie powodują one narażenia dla zdrowia ludzi i środowiska. Jednakże, zakładając, że narażenie nie występuje w procesach produkcji oraz podczas prawidłowego użytkowania wyrobów, może ono wystąpić w wyniku niewłaściwego użytkowania tych produktów oraz podczas usuwania i odzysku powstających z nich

odpadów – Scientific Committee on Emerging and Newly-Identified Health Risks [The appropriateness... 2006]. Opracowywane są listy punktów końcowych, które należy określić, w zakresie identyfikacji, właściwości fizykochemicznych, charakterystyki materiałowej, losu i zachowania w środowisku, toksykologii środowiskowej, toksykologii dla ssaków oraz bezpieczeństwa materiałowego nanomateriałów oraz metod pozwalających ocenić ich wpływ na zdrowie ludzi oraz środowisko [List of manufactured... 2008]. Te informacje posłużą do przewidywania efektów, jakie mogą spowodować nanocząstki w środowisku (ekonanoryzyko).

PIŚMIENNICTWO I AKTY PRAWNE

- American Elements. Silver Nanoparticles.** 2007. <http://www.americanelements.com/agnp.html>.
- BOXALL A.B., CHAUDHRY Q., SINCLAIR C., JONES A., AITKEN R., JEFFERSON B. 2007. Current and future predicted environmental exposure to engineered nanoparticles. DEFRA Report.
- FORTNER J.D., LYON D.Y., SAFES C.M., BOYD A.M., FAULKNER J.C., HORZE E.M. 2005. C₆₀ in water: nanocrystal formation and microbial response. *Environ Sci Technol.* 39: 4307–4316.
- <http://www.nanonet.pl>
- Ku europejskiej strategii dla nanotechnologii.** Komunikat Komisji. COM (2004) 338.
- Nanonauka i nanotechnologia: Plan działań dla Europy na lata 2005–2009.** Pierwsze sprawozdanie z realizacji za lata 2005–2007. KOM (2007) 505, 2007.
- Nanonauka i nanotechnologia: Plan działań dla Europy na lata 2005–2009.** Sprawozdanie z realizacji za lata 2007–2009. KOM (2009) 505, 2009.
- Nanoparticles in the Environment Risk Assessment based on Exposure-Modelling.** 2007. ETH Zurich. Department of Environmental Sciences, „Nanotechnology White Paper”. 2007. United States Environmental Protection Agency.
- List of manufactured nanomaterials and list of endpoints for phase one of the OECD testing programme.** OECD Environment. Health and Safety Publications Series on the safety of manufactured nanomaterials No 6. Document ENV/JM/MONO(2008)13. 2008. Organization for Economic Coordination and Development. Paris, France.
- OSTIGUY C. 2006. Effects of Nanoparticles. Studies and Research Projects.
- OSTIGUY C., ROBERGE B., MÉNARD L., ANICA C. 2009. Endo Studies and Research Projects. Chemical Substances and Biological Agents.
- PETERSEN E.J., HUANG Q., WEBER W.J. 2008. Bioaccumulation of radio-labeled carbon nanotubes by *Eisenia foetida*. *Environ Sci Technol.* 42: 3090–3095
- Rezolucja Parlamentu Europejskiego. Aspekty regulacyjne nanomateriałów.** 2008. (2008/2208/INI).

Rozporządzenie (WE) nr 1907/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady. 2006. DZ.U. UE nr 396 z 30 grudnia 2006 r.

The appropriateness of existing methodologies to assess the potential risks associated with engineered and adventitious products of nanotechnologies. 2006. Report 2006. SCENIHR.

Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004–2008. Sprawozdanie końcowe z realizacji zadań w ramach Programu Wieloletniego PW-004.

United Nations Millennium Declaration. 2008. <http://www.un.org/millennium/>.