

NANOTECHNOLOGIA – MOŻLIWOŚCI I ZAGROŻENIA

NANOTECHNOLOGY – POSSIBILITIES AND HAZARDS

*Tomasz Snopczyński, Katarzyna Góralczyk, Katarzyna Czaja, Paweł Struciński,
Agnieszka Hernik, Wojciech Korcz, Jan K. Ludwicki*

Zakład Toksykologii Środowiskowej
Narodowy Instytut Zdrowia Publicznego - Państwowy Zakład Higieny, Warszawa

Słowa kluczowe: nanotechnologia, nanocząstki, toksyczność, narażenie środowiskowe

Key words: nanotechnology, nanoparticles, toxicity, environmental exposure

STRESZCZENIE

Nanocząstki to obiekty, których co najmniej jeden z wymiarów nie przekracza 100 nm. Istnieją one w przyrodzie lub mogą być wytwarzane w wyniku ludzkiej działalności, w sposób zamierzony lub niezamierzony. Nanotechnologia to ogólna nazwa całego zestawu technik i sposobów tworzenia struktur o rozmiarach nanometrycznych. Obecnie materiały w skali nano znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach, począwszy od elektroniki, poprzez medycynę, kosmetologię, na motoryzacji i budownictwie kończąc. W zależności od zastosowania nanocząstek możemy mieć do czynienia z czterema drogami narażenia: oddechową, pokarmową, pozajelitową i przez skórę. Nanocząstki charakteryzuje większe pole powierzchni aktywnej na jednostkę masy w porównaniu do większych cząstek. Wraz ze wzrostem powierzchni, może wzrastać potencjalne oddziaływanie na zdrowie. Toksyczność nanocząstek zależy od wielu czynników. Do najważniejszych należą: rozmiar, kształt, skład chemiczny, rozpuszczalność, pole powierzchni i ładunek powierzchniowy. Ocena ryzyka dotycząca ludzkiego zdrowia powinna zostać zintegrowana na wszystkich etapach cyklu żywotności nanomateriału, począwszy od momentu powstania koncepcji, poprzez badania i rozwój, produkcję, dystrybucję, użycie aż do usunięcia lub recyklingu.

ABSTRACT

Nanoparticles are the objects with at least one dimension smaller than 100 nm. Nanoparticles exist in nature or can be produced by human activities, intentionally or unintentionally. Nanotechnology is an emerging science involving manipulation of matter at nanometer scale. Nanoparticles find numerous applications in many fields, starting with electronics, through medicine, cosmetology, and ending with automotive industry and construction industry. Depending on the use of nanoparticles, the routes of exposure may be inhalation, dermal, oral or parenteral. Nanoparticles have a greater active surface area per unit mass than larger particles. Together with an increase of surface area, toxicity and potential health effects may also increase. Toxicity of nanoparticles depend on many factors, for example: size, shape, chemical composition, solubility, surface area and surface charge. Risk assessment related to human health, should be integrated at all stages of the life cycle of the nanotechnology, starting at the point of conception and including research and development, manufacturing, distribution, use and disposal or recycling.

WSTĘP

Obecnie, praktycznie w każdej dziedzinie życia codziennego dąży się do miniaturyzacji. Zmniejszenie rozmiarów otaczających nas przedmiotów wpływa na oszczędność energii, materiałów, miejsca, wiąże się również z powstawaniem mniejszej ilości odpadów. Najnowsze zdobycze techniki pozwalają otrzymywać struktury o wymiarach porównywalnych z wymiarami pojedynczych atomów. Technologię pozwalającą na ba-

danie, produkcję i wykorzystywanie struktur, w których co najmniej jeden wymiar nie przekracza 100 nanometrów nazywamy nanotechnologią. Dla porównania, rozmiar pojedynczego atomu węgla wynosi około 0,15 nm, a szerokość DNA – 2,5 nm [12].

W wyniku procesów nanotechnologicznych powstają nanocząstki. Ze względu na kształt można je podzielić na kuliste, cylindryczne i o kształcie nieregularnym. Kolejnym kryterium podziału nanocząstek jest źródło pochodzenia, wyróżniamy dwie grupy: nanocząstki powstające na skutek działalności człowieka

Adres do korespondencji: Tomasz Snopczyński, Zakład Toksykologii Środowiskowej, Narodowy Instytut Zdrowia Publicznego - Państwowy Zakład Higieny, 00-791 Warszawa, ul. Chocimska 24, tel. 022 54 21 370, fax 022 849 74 41, e-mail: tsnopczyński@pzh.gov.pl

i naturalnie występujące w środowisku [24]. Pierwszą grupę można dodatkowo podzielić na nanocząstki projektowane i powstające w sposób niezamierzony, czyli jako produkty uboczne. W sposób niekontrolowany nanocząstki powstają w takich procesach jak gotowanie, spalanie (głównie oleju napędowego i drewna), spawanie, wytapianie, lutowanie i wytwarzanie polimerów [35]. Trzecim kryterium podziału nanocząstek jest ich skład chemiczny. Wszystkie znane nanocząstki można podzielić na dwie grupy: nanocząstki organiczne i nieorganiczne. Do pierwszej grupy można zaliczyć wirusy, fulereny i nanorurki węglowe. Przedstawicielami grupy drugiej są metale (Ag, Au, Cu), tlenki metali i sól morska [24].

Obecnie materiały w skali *nano* znalazły zastosowanie w wielu różnych dziedzinach takich jak: elektronika, medycyna, kosmetologia czy budownictwo. W roku 2004 na świecie wyprodukowano 2 000 ton nanomateriałów o zaprojektowanym kształcie i składzie chemicznym. W latach 2011 – 2020 przewidywany jest wzrost tej produkcji do poziomu 58 000 ton [24].

ZASTOSOWANIE NANOCZĄSTEK

Nanocząstki metali

Wiele substancji w postaci *nano* przejawia nowe, interesujące właściwości w porównaniu do form o większej średnicy cząstek. Ciekawe zastosowania znalazły nanocząstki metali, głównie srebra, złota i miedzi. Rozdrobnione preparaty zawierające srebro działają dezynfekująco, bakteriobójczo i odkażająco. Antybakteryjne właściwości nanocząstek srebra wynikają z ich niewielkiego rozmiaru i rozwiniętej powierzchni. Pozwala to niezwykle łatwo przenikać im przez błony biologiczne i wnikać do wnętrza mikroorganizmów powodując ich obumieranie. Nanopreparaty miedziowe wykazują silne działanie grzybobójcze. Złoto w postaci *nano* ma wielką łatwość wnikania do wnętrza komórek organizmu i działa na nie silnie pobudzająco i regenerująco.

Nanocząstki metali można wykorzystać do neutralizacji toksyn. Chlorowcopochodne węglowodorów ulegają rozkładowi pod wpływem nanocząstek złota oraz srebra, tworząc przy tym chlorki metali i amorficzny węgiel. Fakt ten może być wykorzystywany do budowy filtrów wodnych, które usuwają np. pestycydy chloroorganiczne. Filtry takie działają na zasadzie adsorpcji zanieczyszczeń, a następnie ich katalitycznej neutralizacji. Na rynku pojawił się filtr zawierający nanocząstki srebra, których rozmiar mieści się w granicach 60-80 nanometrów. Srebro jest naniesione na podłoże z tlenku glinu, a jego stężenie wynosi 33 ppm. Jeden taki filtr pozwala oczyścić około 6000 litrów wody. Zużyty filtr można poddać recyklingowi i odzyskać srebro [33].

Nanocząstki w kosmetykach

Nanotechnologia znalazła duże zastosowanie w produkcji kosmetyków. Wykorzystanie nanocząstek zwiększa skuteczność działania kosmetyków i ich bioprzyswajalność. Nanocząstki srebra i miedzi ze względu na swoją aktywność biologiczną, mogą zastąpić stosowane dotychczas w kosmetykach syntetyczne środki konserwujące. Można je także dodawać do produktów przeznaczonych do higieny jamy ustnej, zapobiegających stanom zapalnym dziąseł [32].

Obecnie na rynku jest dostępnych wiele kremów i balsamów do ciała w postaci nanoemulsji. Nanoemulsja to przezroczysty, jednorodny wizualnie układ wodno – olejowy. Od tradycyjnych emulsji różni się stopniem rozdrobnienia fazy zdyspergowanej. Średnica cząstek fazy rozproszonej jest porównywalna do wielkości drobin w układach koloidalnych. Do zalet emulsji w skali *nano* należy zaliczyć prosty sposób wytwarzania i trwałość w szerokim przedziale temperatur. Do nanoemulsji można łatwo wprowadzić substancje biologicznie czynne, pozwala to osiągnąć praktycznie idealną homogeniczność produktu końcowego i poprawia przyswajalność składników aktywnych. Dodatkowo takie produkty charakteryzują się: dużą płynnością, ładnym wyglądem i małą lepkością. Wszystkie wyżej wymienione cechy powodują, że nanoemulsje mają wiele praktycznych zastosowań w kosmetologii [11].

W produkcji kosmetyków obok nanoemulsji w postaci nanocząstek już od dawna są stosowane tlenki tytanu i cynku, głównie jako filtry promieniowania UV. Zastosowanie ich w tej formie poprawia skuteczność działania i zwiększa trwałość kremów do opalania [11, 36].

Kolejnymi nanocząstkami wykorzystywanymi w kosmetykach są nanokapsułki zwane również nanonośnikami. Istotą ich działania jest możliwość zamknięcia w otoczkach o rozmiarach nanometrycznych określonych substancji biologicznie czynnych, co może wpłynąć na poprawę stopnia wchłaniania tych substancji przez organizm. Otoczka chroniąca substancję aktywną powinna być wykonana z naturalnego, biodostępnego i biodegradowalnego tworzywa. Materiał ten musi być dodatkowo wytrzymały, żeby chronić zamkniętą substancję przed szkodliwym działaniem czynników zewnętrznych (np. wilgoci). Pierwszymi nanonośnikami stosowanymi w kosmetykach były liposomy, drobne ciała tłuszczowe o kształcie kulistym. Posiadają one znaczną zdolność przenikania do naskórka, dlatego znalazły szerokie zastosowanie w różnego rodzaju kremach. Substancje w nich zamknięte charakteryzują się dużo silniejszym działaniem pielęgnacyjnym, w porównaniu do składników aplikowanych w postaci wolnej. Liposomy nie są jednak pozbawione wad. Nie tolerują obecności związków powierzchniowo czynnych, są nietrwałe w wyższych temperaturach i mało odporne

mechanicznie [11]. Obecnie najczęściej stosowanymi materiałami do produkcji otoczek nanokapsulek są biopolimery i cyklodekstryny. Odpowiedni dobór surowca otoczki pozwala w niej umieścić zarówno substancje hydrofilowe jak i hydrofobowe, takie jak: witaminy, olejki eteryczne, proteiny, ekstrakty roślinne, enzymy i barwniki [11].

Nanocząstki w żywności

Wykorzystanie nanotechnologii stwarza również możliwości wprowadzania innowacji w produkcji żywności. Obecnie znaczna ilość opakowań używanych w przemyśle spożywczym wykonana jest z nanokompozytów polimerowych. Termin nanokompozyt polimerowy oznacza materiał dwufazowy, w którym w polimerowej osnowie są równomiernie rozmieszczone cząstki napelnacza, a przynajmniej jeden wymiar tych cząstek nie przekracza kilku nanometrów [7]. Wykorzystanie nanocząstek powoduje zwiększenie powierzchni właściwej napelnacza (nawet 1000 razy) w porównaniu do napelnaczy konwencjonalnych. Prowadzi też do zwiększenia stopnia oddziaływania pomiędzy napelnaczem a powierzchnią polimeru. Wprowadzenie napelnacza w postaci *nano* powoduje zwiększenie elastyczności, wytrzymałości termicznej, właściwości barierowych, odporności na rozpuszczalniki organiczne i poprawia właściwości optyczne polimeru [27].

Ze względu na liczbę wymiarów cząstek napelnacza, które nie przekraczają kilku nanometrów, można wyróżnić [12]:

- nanokompozyty, w których jeden z wymiarów cząstek nie przekracza kilku nanometrów, np. krzemiany warstwowe (płytkowe),
- nanokompozyty, w których dwa wymiary są mniejsze niż 100 nanometrów, np. nanorurki,
- nanokompozyty, w których wszystkie trzy wymiary cząstek wynoszą kilka nanometrów, np. kulki tlenku krzemu(IV).

Prowadzone są badania nad nanokompozytami o właściwościach antybakteryjnych, a jednocześnie bezpiecznymi dla człowieka. Jako napelnacz można w nich zastosować tlenek cynku lub magnezu, które cechuje duża zdolność niszczenia mikroorganizmów. Innym pomysłem jest zastosowanie w roli napelnacza nanorurek węglowych z wewnętrznymi przestrzeniami wypełnionymi antybakteryjnymi substancjami. Materiały tego typu mogą w przyszłości posłużyć jako opakowania różnego typu żywności [5].

Nanokompozyty dzięki swym unikalnym właściwościom stanowią alternatywę dla zwykłych tworzyw sztucznych. Ich udział w rynku opakowań, i nie tylko, ciągle rośnie. Nanokompozyty można zastosować do produkcji giętkich opakowań do leków, elementów antystatycznych w motoryzacji (np. obudowa zbiornika

paliwa), osłon przewodów elektrycznych i uszczelnień gumowych [26].

Nanocząstki można z powodzeniem stosować nie tylko do produkcji opakowań ale też samej żywności. Mniejsze wymiary to większa powierzchnia zewnętrzna, co z kolei polepsza absorpcję wody, uwalnianie aromatów, dostępność substancji bioaktywnych i szybkość procesów katalitycznych. Nanotechnologię można stosować w wielu obszarach produkcji żywności, niektóre metody są jednak mało praktyczne i kosztowne w skali przemysłowej. Jest jednak wiele pomysłów, które mają szansę zostać wdrożone w przemyśle spożywczym. Jednym z nich jest nanomielenie. W jego wyniku można uzyskać mąkę o wysokiej zdolności wiązania wody lub ultradrobny proszek zielonej herbaty o cechach silnie antyoksydacyjnych. W przemyśle spożywczym znalazły zastosowanie również nanoemulsje, np. do produkcji śmietany o obniżonej zawartości tłuszczu. Taka śmietana pod względem wyglądu, nie różni się od „zwykłej” śmietany. Zawarty w niej tłuszcz ma postać nanokuleczek. W podobnej postaci można dodawać tłuszcz przy produkcji lodów i czekolady o obniżonej kaloryczności. Wszystkie te produkty mimo mniejszej zawartości tłuszczu, zachowują swoje walory smakowe [11]. W przemyśle spożywczym wykorzystuje się też nanokapsułki, głównie liposomy i mikrosfery. Te ostatnie zbudowane są z materiałów, które rozkładają się pod wpływem wilgoci lub w określonym pH. Nanokapsułkowanie umożliwia nie tylko transport i ochronę składników odżywczych, barwników czy substancji zapachowych, ale także ich uwalnianie według potrzeb np. w określonym czasie. Jest to możliwe dzięki możliwości wyboru różnego rodzaju otoczek [11].

Dzięki nanotechnologii przyszłość może należeć do żywności personalizowanej. W skład takiej żywności wejdą nanocząstki, które będą mogły uwalniać różne aromaty pod wpływem ciepła, ultradźwięków lub określonego pH. Żywność taka będzie mogła dostosować swój zapach, smak oraz stopień uwalniania składników odżywczych indywidualnie do smaku czy stanu zdrowia konsumenta [11].

Kropki kwantowe

Kolejnymi przedstawicielami nanocząstek, które mają dużo potencjalnych zastosowań są kropki kwantowe. Są to kryształy, w których ruch elektronów jest ograniczony przez bariery potencjału. Elektrony te znajdują się w „pudełku” o boku rzędu 10 nanometrów każdy, a ich ruch w żadnym z trzech kierunków nie jest możliwy. W języku mechaniki kwantowej o takich elektronach mówi się, że są zamknięte w pudle potencjału. Właśnie to pudło nazywamy kropką kwantową [8].

Kropki kwantowe otrzymuje się w niezwykle złożonym procesie technologicznym. Proces ten polega na hodowli kryształów, atom po atomie, warstwa po

warstwie. W tym celu w specjalnej komorze umieszcza się podłoże, na którym ma być hodowany kryształ oraz źródła atomów, z których ma być zbudowany. Źródłem najczęściej jest długa rurka, na dnie której znajduje się podgrzany materiał. Cały proces prowadzony jest w wysokiej próżni, około 10^{-11} mmHg. Atomy wylatują z rurki i docierają do podłoża, na którym osadzają się tworząc warstwy. Następnie za pomocą dobrze zogniskowanej wiązki elektronowej, z określonej warstwy wycinane są druty kwantowe. Ostatnim etapem otrzymywania kropek kwantowych jest cięcie drutu kwantowego na kawałki. W taki sposób otrzymujemy obszar, którego wszystkie trzy wymiary są rzędu 10 nm [8]. Kropki kwantowe są praktycznie idealnymi kryształami. Mogą one w niedalekiej przyszłości stać się idealnym źródłem światła [9]. Każdy kwant energii zaabsorbowany przez kropkę kwantową jest emitowany bez strat (100% wydajność).

Obecnie kropki kwantowe znajdują szerokie zastosowanie w biologii i medycynie, głównie w diagnostyce medycznej, jako barwniki syntetyczne w metodach badania immunofluorescencyjnego. Metody te służą dwóm podstawowym celom, określeniu struktur wewnątrzkomórkowych oraz śledzeniu przebiegu procesów zachodzących zarówno w ich obrębie, jak i między całymi komórkami. Do tej pory do badań tego typu wykorzystywano barwniki organiczne połączone z przeciwciałami, które miały naprowadzić znacznik do odpowiedniego antygeny. Następnie diagnozowaną część ciała poddawano działaniu odpowiedniego promieniowania, co powodowało rozświetlenie interesującego obszaru. Jednak barwniki organiczne mają wiele wad. Są nietrwałe w niskim pH, mogą wykazywać działanie toksyczne i szybko ulegają rozkładowi. Barwniki organiczne zostały zatem zastąpione przez syntetyczne znaczniki fluorescencyjne czyli kropki kwantowe. Kropki kwantowe przeznaczone do diagnostyki, składają się z dwóch części: rdzenia zbudowanego przeważnie z selenku lub tellurku kadmu (materiały półprzewodnikowe) i płaszczu chroniącego rdzeń. Płaszcz zbudowany jest najczęściej z siarczku cynku. Do płaszczu przytwierdzone są dodatkowo różnego rodzaju związki chemiczne, np. kwas dihydroliponowy (DHLA), polietylenoglikol (PEG). Związki te tworzą zewnętrzną warstwę, która chroni kropki kwantowe przed hydrolizą i degradacją enzymatyczną w żywym organizmie. Do tej warstwy dodatkowo przytwierdzone są tzw. ligandy powinowactwa, czyli różnego rodzaju przeciwciała, białka, inhibitory, które mają za zadanie nakierować znacznik w określone miejsce w organizmie [6]. Długość fali światła emitowanej przez kropkę kwantową zależy od jej wielkości i rodzaju materiału użytego do produkcji rdzenia. Praktycznie mogą one emitować promieniowanie widzialne o każdej długości fali. W przypadku rdzenia wykonanego z selenku

kadmu o średnicy 6 nm długość emitowanej fali wynosi około 655 nm. Dla tego samego półprzewodnika, ale o mniejszym rdzeniu, rzędu 3 nm emisja przypada na długość 525 nm [10]. Tak więc mając tylko jeden rodzaj materiału półprzewodzącego możemy otrzymać znaczniki o różnych kolorach. Dodatkowo kropki kwantowe charakteryzują się niebywale symetrycznym i bardzo wąskim widmem emisji.

W odróżnieniu od barwników organicznych kropki kwantowe posiadają bardzo szeroki zakres absorpcji. Mogą one pochłaniać światło w szerokim zakresie, od światła ultrafioletowego do podczerwieni. Ta cecha umożliwia wielowymiarową detekcję. Mając do dyspozycji kropki kwantowe o różnym wymiarze, co za tym idzie o różnych kolorach, możemy je wzbudzić jedną długością fali. Do analizy całej próbki wystarczy jeden laser lub lampa, co obniża koszty badań. Wielowymiarowa detekcja ma zastosowanie w badaniach złożonych układów biologicznych, gdy niezbędna jest jednoczesna obserwacja kilku składników jednocześnie. Dodatkowo kropki kwantowe wykazują stałą intensywność świecenia (nie blakną) [10].

Za pomocą kropek kwantowych możemy wykrywać komórki rakowe, znakować DNA i śledzić trasę wędrówki wirusów w organizmie.

Nanocząstki w analityce

Nanocząstki ze względu na swoje unikalne właściwości fizyczne i chemiczne znalazły wiele zastosowań w różnego rodzaju metodach analitycznych. W technice wysokosprawnej chromatografii cieczowej (HPLC) jako faza stacjonarna wykorzystywane są nanodiamenty. W porównaniu z tradycyjnymi wypełnieniami (krzemionka, polimery) nanodiamenty charakteryzują się znaczną odpornością na wysokie temperatury oraz ciśnienie, odpornością na działanie silnych kwasów i zasad oraz rozpuszczalników organicznych [23]. Jako wypełnienie są stosowane diamenty sztuczne, ponieważ naturalne są zbyt drogie. Sztuczne diamenty otrzymuje się z grafitu, prasując go pod wysokim ciśnieniem (12 GPa) przy jednoczesnym podgrzaniu do temperatury 1200 °C.

Badania nad nanodiamentami wykazały, że są one bezpieczne dla zdrowia człowieka. Poddano badaniu nanodiamenty o różnej wielkości: od 2 do 10 nanometrów. Nie wykazały one żadnego ujemnego wpływu na żywe komórki. Można je zatem wykorzystać również w medycynie, jako cząstki dostarczające leki, substancje powlekające implanty i inne urządzenia medyczne [31].

Nanocząstki wykorzystuje się również w metodach spektroskopowych. Do oznaczania azotanu(III) w wodzie za pomocą spektroskopii fluorescencyjnej doskonale nadają się nanocząstki 1-aminopirenu. Nanocząstki te są dobrze rozpuszczalne w wodzie, charakteryzują

się dużą intensywnością fluorescencji i odpornością na blaknięcie. Powyższa metoda oparta jest na reakcji dwuazowania, czyli reakcji aminy pierwszorzędowej z kwasem azotowym(III). Przebiega ona w sposób prawidłowy w środowisku kwaśnym i w obniżonej temperaturze (około 5 °C). Metoda doskonale sprawdza się podczas oznaczania azotanu(III) w wodzie pochodzącej z różnych źródeł (wodociąg, jezioro, studnia). Jej zakres liniowy mieści się w przedziale 20 – 1400 ng x ml⁻¹. Metoda jest selektywna, obecność jonów metali i/lub innych anionów nie przeszkadza w oznaczeniu azotanu(III). Jej prostota i wysoka czułość sprawia, że z powodzeniem może zastąpić dotychczas stosowane metody, takie jak polarografia i woltamperometria [37].

Do oznaczania niektórych herbicydów (trisulfuronu i bensulfuronu metylowego) wykorzystywane są wielościenne nanorurki węglowe. Metoda oznaczania polega na zateżeniu analitu z wykorzystaniem ekstrakcji do fazy stałej (SPE) i jego oznaczeniu za pomocą HPLC z matrycą diodową jako detektorem. W skład wypełnienia polipropylenowych kolumnienek SPE wchodzi wielościenne nanorurki węglowe o wielkości od 30 do 60 nm i powierzchni 131,74 m² x g⁻¹. To właśnie dzięki wysoce rozwiniętej powierzchni nanorurki doskonale nadają się do zateżenia analitu. Za pomocą tej metody można oznaczać wymienione wyżej herbicydy w wodzie z różnego typu źródeł (kran, morze, studnia). Granica wykrywalności trisulfuronu wynosi 22,4 ng x l⁻¹, a bensulfuronu metylowego 2,9 ng x l⁻¹. Zakres liniowy w przypadku pierwszego związku mieści się w przedziale 0,08 – 80 ng x ml⁻¹, a drugiego 0,04 – 40 ng x ml⁻¹. Jednak w celu uzyskania takich wyników, przed rozpoczęciem badania należy dokładnie zoptymalizować parametry procesu SPE [38].

Przyszłe zastosowania nanotechnologii

Nanocząstki znalazły już wiele zastosowań. Jednak ciągle są prowadzone dalsze badania i pojawiają się nowe pomysły na ich wykorzystanie. Prawdopodobnie nanotechnologia w przyszłości będzie stosować metody manipulowania materią bardziej efektywne i precyzyjne niż to ma miejsce obecnie, a nowopowstałe materiały będą posiadały właściwości samoorganizujące, samonaprawiające i konserwujące [11]. Przewiduje się, że wykorzystanie nanotechnologii stworzy całkiem nowe możliwości w rolnictwie, ochronie środowiska i technologii żywności. Nanocząstki będzie można wykorzystać do monitorowania żywności i wody do picia, do wykrywania obecności związków szkodliwych, np. metali ciężkich i gazów trujących [30].

Nanotechnologia będzie miała wpływ na cały proces produkcji żywności (od wytwórcy do konsumenta), na utrwalanie produktów, poprawę ich cech organoleptycznych, zachowanie jakości i bezpieczeństwa oraz na właściwości opakowań do żywności [30].

Już w niedalekiej przyszłości planowana jest produkcja nanomaszyn, porównywalnych do naturalnych rybosomów komórkowych lub mitochondriów, tzw. nanobiorobotów. Będą to zaprogramowane struktury lub układy elektroniczne wykonane w nanoskali z nowego typu materiałów, np. nanorurek lub nanobiopolimerów. Takie maszyny posłużą do kontroli i sterowania wewnątrzkomórkowymi procesami metabolicznymi, naprawy zniszczonych elementów organizmu (atom po atomie), sekwencjonowania genów, analizy żywności modyfikowanej genetycznie i likwidacji skażenia środowiska mikroorganizmami [29].

Przewiduje się, że wykorzystanie nanotechnologii w żywności przyczyni się do powstania produktów, które nie tylko będą dobrym źródłem składników odżywczych, ale będą przyczyniały się również do poprawy samopoczucia i zdrowia konsumenta. W przyszłości nanocząstki będą przenosić składniki aktywne, które będą uwalniane tylko pod wpływem określonych chemicznych lub biologicznych wskaźników, charakterystycznych dla każdego konsumenta.

Zastosowanie nanotechnologii poprawi biodostępność i stabilność składników pokarmowych podczas procesu przetwarzania, przechowywania i dystrybucji [11].

Dalsze badania nad nanocząstkami mogą przyczynić się do powstania materiałów, posiadających niespotykane obecnie właściwości. Będą to na przykład: nanokompozyty setki razy trwalsze od stali, odzież z materiału odpornego na ścieranie i wysokie temperatury, jednocześnie niezwykle lekkiego i fototropowego, zmieniającego barwę w zależności od zabarwienia otoczenia [21].

Nanotechnologia może wpłynąć na polepszenie warunków życia i pracy człowieka. Należy jednak pamiętać także o potencjalnym szkodliwym działaniu nanocząstek na człowieka i środowisko, wynikającym z ich specyficznych właściwości fizycznych i chemicznych. Zakres potencjalnie szkodliwego działania nanocząstek na organizm człowieka i środowisko nie w pełni jest jeszcze zdefiniowany, ponieważ odkrywanie stale nowych zastosowań nanoproduktów może nieść za sobą nieuświadomione dzisiaj zagrożenia.

ZAGROŻENIA WYNIKAJĄCE Z OBECNOŚCI NANOCZĄSTEK

Nanocząstki znalazły zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Ich produkcja na całym świecie zwiększa się. Nanocząstki powstają w dużych ilościach w procesach tak powszechnych jak: spalanie paliw (głównie oleju napędowego), pożary lasów i podczas rozpadu większych cząstek. To wszystko sprawia, że

większość ludzi jest stale narażona na nanocząstki znajdujące się w atmosferze.

Rodzaj, wielkość i skład chemiczny nanocząstek w otaczającym nas powietrzu zależy głównie od źródeł ich emisji (naturalne lub sztuczne). Ważny wpływ na czas utrzymywania się nanocząstek w atmosferze mają prędkość wiatru, wilgotność i temperatura powietrza [13]. Ich ilość w powietrzu na terenie o dużym natężeniu ruchu drogowego mieści się w przedziale od 5 000 do 3 000 000 cząstek na jeden centymetr sześcienny [34]. Stężenie nanocząstek w pomieszczeniach, w których nie występują źródła ich emisji (np. w biurze) są zazwyczaj mniejsze niż ich stężenie na zewnątrz pomieszczeń. Rodzaj i ilość nanocząstek w pomieszczeniach zamkniętych zależy w głównej mierze od sposobu ich wentylowania [13]. Na podstawie badań oszacowano, że w ciągu tylko jednej godziny człowiek wdycha razem z powietrzem około miliona nanocząstek, z których co najmniej połowa może dostać się do płuc [35]. Ilość nanocząstek przedostających się do układu oddechowego człowieka z wdychanym powietrzem zależy od właściwości cząstek, prędkości i kierunku ruchu powietrza w otoczeniu człowieka. Dodatkowo od szybkości oddychania i od tego czy powietrze jest wdychane przez usta czy nos [13].

Metody badania pyłów zawieszonych w powietrzu

Nanocząstki stanowią najdrobniejszą frakcję w całej populacji pyłów obecnych w powietrzu. Obecnie w Polsce do oceny narażenia na pyły są wykorzystywane pomiary stężenia pyłu zawieszonego w powietrzu w otoczeniu człowieka (pył całkowity) i pyłu osadzającego się w pęcherzykach płucnych (pył respirabilny) za pomocą metody filtracyjno – wagowej. W wyniku takich pomiarów otrzymujemy stężenie masowe, wyrażone w miligramach pyłu na metr sześcienny powietrza [13]. Należy jednak pamiętać, że w miarę zmniejszania się wielkości cząstek pyłu, przy zachowaniu jednakowego stężenia masowego, zwiększa się liczba cząstek i ich powierzchnia. Tę zależność dobrze ilustrują dane zawarte w tabeli 1 [25].

Tabela 1. Powierzchnia i liczba cząstek przypadających na $10 \mu\text{g} \times \text{m}^{-3}$ cząstek w powietrzu
Surface area and number of nanoparticles per $10 \mu\text{g} \times \text{m}^{-3}$ of particles in the air

Średnica cząstek (nm)	Liczba cząstek (cm^{-3})	Powierzchnia cząstek ($\mu\text{m}^2 \times \text{cm}^{-3}$)
5	153 000 000	12 000
20	2 400 000	3 016
250	1 200	240
5 000	0,15	12

Wyrażanie stężenia nanocząstek w jednostkach masowych nie jest wystarczające do oceny wielkości narażenia. W przypadku tak małych cząstek większe znaczenie w badaniach toksykologicznych powinno mieć stężenie ilościowe i powierzchnia badanych cząstek. Idealny sposób mierzenia narażenia powinien uwzględniać procentowy udział poszczególnych frakcji wielkości cząstek i ich powierzchnię [35].

Narażenie na nanocząstki

W przypadku nanocząstek mamy do czynienia z czterema drogami narażenia. Do organizmu mogą one być wprowadzane drogą oddechową, pokarmową, pozajelitową i przez skórę [34]. Narażenie na nanocząstki może występować podczas całego ich cyklu życiowego, podczas produkcji, przetwarzania, wykorzystywania, składowania i usuwania.

Niewątpliwie najwięcej nanocząstek wnika do organizmu drogą oddechową. W zależności od średnicy są one zatrzymywane w różnych odcinkach układu oddechowego: w odcinku gardłowym, nosowym, tchawiczo – oskrzelowym i w płucnym. Oddychanie przez usta, w porównaniu z oddychaniem przez nos, zwiększa ilość cząstek docierających do oskrzeli i płuc. Natomiast oddychanie przez nos zwiększa wychwytywanie nanocząstek w górnym odcinku układu oddechowego [36]. Do płuc dociera około połowy wdychanych z powietrzem nanocząstek, są to głównie cząstki o wielkości 10 – 50 nm [19]. Z płuc nanocząstki mogą przenikać do krwi i tą drogą do innych organów wewnętrznych [4].

Badania na myszach dowiodły, że nanocząstki przyjmowane drogą oddechową mogą pokonywać barierę krew – mózg. W badaniach wykorzystano nanocząstki o średnicy około 50 nm, które były zdolne do absorpcji i emisji światła. Dystrybucję nanocząstek badano za pomocą rezonansu magnetycznego i skanującego, laserowego mikroskopu konfokalnego. Badane myszy były narażone na nanocząstki o stężeniu $4,89 \times 10^5$ i $9,34 \times 10^5$ cząstek na centymetr sześcienny przez okres 4 tygodni (4 godziny dziennie, 5 dni w tygodniu). Po tym czasie nanocząstki wykryto u myszy w wątrobie, jądrach, śledzionie, płucach i mózgu. W mniejszych ilościach były one obecne również w sercu, nerkach i jajnikach. W wątrobie zaobserwowano, że nanocząstki były rozmieszczone równomiernie, zaś w przypadku śledziony i jąder były one obecne tylko w niektórych miejscach tych organów. Badania te pokazały, że nanocząstki łatwo przenikają z płuc do innych organów wewnętrznych [20].

Drugą drogą, którą nanocząstki mogą łatwo dostawać się do organizmu jest przewód pokarmowy. Obecnie nanotechnologia jest coraz powszechniej stosowana w produkcji żywności i opakowań do jej przechowywania. Niewiele jest jednak badań na temat potencjalnego narażenia na nanocząstki drogą pokarmową. Wiadomo,

że w tym przypadku ich wnikanie zależy głównie od wielkości i ładunku elektrycznego [36].

Nanocząstki są powszechnie wykorzystywane do produkcji kosmetyków i leków stosowanych na skórę. Ze względu na swój niewielki rozmiar prawdopodobnie niektóre z nich mogą pokonywać barierę skóry. Z powodu przeprowadzenia niewielkiej ilości badań nie zostało to jednak potwierdzone. Badania na zwierzętach i ludziach (ochotnikach) dowodzą, że tlenek tytanu(IV) (TiO_2) zawarty w kremach do opalania łatwo wnika w głąb naskórka, jednak nie penetruje głębszych warstw skóry. Inne badania potwierdziły, że nanocząstki mogą kumulować się w mieszkach włosowych [34].

Czwarta, ostatnia droga narażenia – pozajelitowa wiąże się z zastosowaniem nanotechnologii w medycynie do produkcji leków i protez. Trwające obecnie intensywne badania nad medycznymi możliwościami wykorzystania nanocząstek powinny iść w parze z badaniami dotyczącymi bezpieczeństwa wdrożenia takich pomysłów.

Toksyczność nanocząstek

W przypadku nanocząstek toksyczność zależy od wielu czynników. Do najważniejszych należą: rozmiar, kształt, skład chemiczny, zdolność do agregacji, rozpuszczalność, pole powierzchni i ładunek powierzchniowy [34]. Do identyfikacji zagrożeń, które mogą powodować nanocząstki wykorzystuje się badania *in vitro* i/lub *in vivo* (głównie na gryzoniach). Najczęściej są to badania dotyczące drogi narażenia, krążenia i docelowego umiejscowienia nanocząstek w organizmie [4].

Duża powierzchnia w przypadku nanocząstek może wpływać na ich reaktywność i właściwości adsorpcyjne. Na nanocząstkach znajdujących się w powietrzu mogą osadzać się różne substancje chemiczne, tj. drobiny metali i różnego rodzaju związki organiczne [36]. W wielu przypadkach może się okazać, że substancje zaadsorbowane na nanocząstkach są bardziej szkodliwe dla zdrowia człowieka i środowiska niż one same.

Poziom toksyczności nanocząstek niewątpliwie zależy od ich składu chemicznego. Z badań wynika, że nanocząstki TiO_2 wykazują mniej szkodliwe działanie na organizmy żywe niż nanocząstki sadzy technicznej. Jednak obie te substancje są bardziej toksyczne w postaci nanocząstek w porównaniu do cząstek o większym rozmiarze [36]. Związki, które w postaci wielkocząsteczkowej są nieszkodliwe, mogą się okazać toksyczne w postaci *nano*. Badania przeprowadzone na gryzoniach pokazują, że TiO_2 może powodować zmiany zapalne w płucach, uszkodzenie węzłów chłonnych i powstawanie stresu oksydacyjnego [36]. Nanocząstki manganu osadzają się w opuszcce węchowej, mózdzku i korze mózgowej, powodując obniżenie żywotności komórek mózgowych, powstawanie stresu oksydacyj-

nego i obniżenie poziomu dopaminy [34]. Inne badania wskazują na znaczną toksyczność nanocząstek srebra, tytanu i żelaza. W postaci *nano* mogą one wnikać do funkcjonalnych części żywych komórek (np. jądra komórkowego) i powodować zaburzenia w mitozie i mejozie [14]. O właściwości chorobotwórcze są podejrzewane nanocząstki kobaltu i wolframu. Badania pokazują, że toksyczność nanocząstek metali zależy w dużej mierze od drogi narażenia. W przypadku pobrania cząstek irydu o wielkości 18 nm drogą pokarmową, iryd nie przenika do krwi i w ciągu kilku dni jest wydalany z kałem. Natomiast jeśli iryd dostanie się do organizmu poprzez drogi oddechowe, jest on przenoszony za pośrednictwem układu krwionośnego do innych organów wewnętrznych (wątroba, śledziona, serce i mózg). Dodatkowo w tym przypadku iryd pozostaje w organizmie przez 6 miesięcy po jednokrotnym narażeniu [4].

Z przytoczonych przykładów wynika, że reakcją organizmu na obecność nanocząstek w większości przypadków jest stres oksydacyjny, czyli nienaturalny wzrost stężenia reaktywnych form tlenu (nadtlenki, wolne rodniki) w komórkach. Dowiedziono, że nanocząstki w postaci kropek kwantowych mogą przekazywać energię optyczną na pobliskie atomy tlenu w wyniku czego powstają wolne rodniki i nadtlenki. W zależności od wielkości powstałego stresu oksydacyjnego, z którym ściśle jest związana ilość powstających reaktywnych form tlenu różne mogą być reakcje organizmu. Może to być łagodna odpowiedź antyoksydacyjna, stan zapalny lub uszkodzenie DNA i zmiany nowotworowe [36].

Metody oceny ryzyka dla nanocząstek

Szkodliwy wpływ nanocząstek na organizmy żywe został potwierdzony w wielu badaniach. W związku z tym konieczne jest opracowanie dla nanomateriałów odpowiedniej klasyfikacji, bezpiecznych technologii produkcji i przetwarzania, sposobów diagnostyki oraz właściwych metod oceny ryzyka [14]. Komisja Europejska już od kilku lat zabiega o połączenie działań wszystkich państw członkowskich na rzecz stworzenia odpowiednich warunków prawnych, społecznych i ekonomicznych, które pozwolą na bezpieczne i skuteczne wykorzystanie nanotechnologii. 12 maja 2004 roku Komisja przyjęła komunikat „*Ku europejskiej strategii dla nanotechnologii*” [17], w którym zaproponowana została bezpieczna, odpowiedzialna i zintegrowana strategia. W dokumencie zwrócono szczególną uwagę na konieczność uwzględnienia na wczesnym etapie wdrażania nowych technologii wszelkich aspektów dotyczących środowiska, zdrowia, bezpieczeństwa oraz problematyki społecznej [16]. Konsekwencją tych założeń stało się przyjęcie w czerwcu 2005 roku kolejnego komunikatu „*Nanonauka i nanotechnologia: Plan działania dla Europy na lata 2005 – 2009*” [16]. Komisja zwraca w nim uwagę na konieczność opra-

cowania odpowiednich schematów oceny ryzyka dla zdrowia ludzkiego, z uwzględnieniem konsumentów, pracowników oraz środowiska. Badania dotyczące bezpieczeństwa nanomateriałów należy przeprowadzać na wszystkich etapach technologii. Począwszy od momentu powstania projektu poprzez badania i rozwój, produkcję, dystrybucję, zastosowanie aż do usunięcia lub recyklingu. Przed rozpoczęciem masowej produkcji nanomateriału należy przeprowadzić dogłębną ocenę ryzyka związanego z wprowadzeniem nanocząstek do środowiska. Szczególną uwagę należy zwrócić na produkty powszechnego użytku (produkty gospodarstwa domowego, kosmetyki, pestycydy), które już znajdują się lub są bliskie wprowadzenia na rynek [16].

Komisja poprosiła Komitet Naukowy ds. Pojawiających się i Nowo Rozpoznanych Zagrożeń dla Zdrowia (SCENIHR) o przedstawienie opinii na temat odpowiedniości istniejących metodologii oceny potencjalnego ryzyka związanego z wykorzystaniem nanomateriałów. Po przeprowadzeniu konsultacji publicznych SCENIHR przyjął w dniu 10 marca 2006 roku opinię w sprawie oceny ryzyka w związku z nanotechnologią [3]. Według SCENIHR istniejące metody toksykologiczne i ekotoksykologiczne są odpowiednie dla oceny większości zagrożeń związanych z nanomateriałami, jednak mogą być niewystarczające do oceny wszystkich zagrożeń. SCENIHR zwrócił uwagę na brak dostatecznie pełnej wiedzy na temat klasyfikacji, wykrywania i pomiarów nanocząstek, ich przedostawania i kumulowania się w organizmach żywych. Wiedzę tą należy uzupełnić. Tylko wtedy będzie możliwe przeprowadzenie satysfakcjonującej oceny zagrożenia dla ludzi i środowiska [15]. Dlatego Komisja zleciła SCENIHR dokonanie bardziej szczegółowej analizy obecnie stosowanych metod oceny ryzyka, głównie w odniesieniu do substancji chemicznych. Opinie Komitetu przyjęto 21 – 22 czerwca 2007 roku po przeprowadzeniu konsultacji publicznych [4]. SCENIHR stwierdza w niej, że istniejąca obecnie metodyka jest na ogół w stanie zidentyfikować zagrożenia związane z wykorzystaniem nanocząstek, jednak niezbędne będą zmiany w istniejących dokumentach. W opinii wskazano wymagające poprawienia kwestie w instrukcjach technicznych i metodyce oraz zaproponowano strategię oceny ryzyka, w przypadku nanomateriałów [15].

SCENIHR zwraca szczególną uwagę, że w przypadku oceny narażenia na nanocząstki w procesie ich produkcji, ważne jest aby uwzględniać narażenie z tła, czyli na inne nanocząstki znajdujące się w powietrzu. Niewielka liczba badań dotyczących monitoringu środowiskowego i zawodowego narażenia na nanocząstki powoduje trudności z opracowaniem modelu oceny narażenia człowieka i środowiska. Obecnie używany model wykorzystujący stężenie masowe nie jest właściwy w przypadku nanocząstek, dlatego SCENIHR

proponuje algorytm oceny narażenia na nanocząstki, wykorzystujący sekwencję ośmiu pytań [4]. Odpowiedzi na nie pozwalają scharakteryzować narażenie.

Pierwsze pytanie dotyczy możliwości narażenia ludzi/środowiska. Udzielając odpowiedzi na to pytanie należy pamiętać, że narażenie może występować w całym cyklu życiowym nanomateriału. Kolejne pytania dotyczą właściwości fizyko-chemicznych badanych nanocząstek (toksyczność, homogenność, hydrofilowość, reaktywność, potencjał agregacji i właściwości adsorpcyjne).

W przypadku gdy dane toksykologiczne na temat badanych nanocząstek są nieznane, konieczna jest pełna ocena ryzyka. Jeśli badana substancja nie jest homogeniczna to konieczna jest ocena narażenia dla każdej formy oddzielnie.

Badany nanomateriał, który nie jest rozpuszczalny w wodzie należy identyfikować jako potencjalnie inwazyjny dla organizmów żywych. Natomiast jeśli nanocząstki w temperaturze pokojowej rozpuszczają się w wodzie to dalsza ocena ich w skali *nano* jest niemożliwa i nieuzasadniona.

Jeśli badane nanocząstki wykazują dużą tendencję do agregacji to czas narażenia na pojedyncze cząstki jest krótki. Agregacja powoduje, że nanocząstki szybciej opadają i zmniejsza się w ten sposób narażenie drogą oddechową. Jednak agregacja może powodować zwiększenie narażenia dermalnego i pokarmowego [34]. Niski potencjał agregacji wiąże się z większą dyfuzyjnością nanocząstek. Wykazują one opóźnioną sedymentację grawitacyjną, co czyni je bardziej trwałymi zanieczyszczeniami [36].

Nanocząstki mają rozwiniętą powierzchnię i mogą adsorbować inne substancje, które same w sobie mogą wykazywać właściwości toksyczne. W przypadku wystąpienia adsorpcji należy zbadać jak ona wpłynie na właściwości toksyczne badanych nanocząstek.

Podczas oceny narażenia należy pamiętać, że często forma *nano* danej substancji wykazuje inne właściwości i może stanowić dużo większe zagrożenie dla zdrowia człowieka i środowiska niż ta sama substancja w dużej formie.

Kiedy znamy drogi wnikania do organizmu i właściwości fizyko-chemiczne badanych nanocząstek, możemy dokładnie scharakteryzować narażenie. Dokładna ocena narażenia jest podstawą przeprowadzenia właściwej oceny ryzyka związanej z nanotechnologią.

Kolejnym etapem oceny ryzyka jest identyfikacja i charakterystyka zagrożeń związanych z nanocząstkami. Odbywa się to poprzez przeprowadzanie testów *in vitro* i symulacji komputerowych, które doprowadzą do zidentyfikowania niekorzystnych właściwości biologicznych nanocząstek. Badania takie przeprowadza się z wykorzystaniem zwalidowanych testów modelowych.

Jeżeli wstępne badania wykażą szkodliwe działanie nanocząstek na organizmy żywe konieczne jest przeprowadzenie badań *in vivo* na odpowiednich gatunkach zwierząt. Na ich podstawie można stwierdzić czy występuje zależność pomiędzy określoną dawką (stężeniem) nanocząstek a negatywną odpowiedzią organizmu. Jeśli taka zależność występuje należy wyznaczyć dla danych nanocząstek poziom nie wywołujący dających się zaobserwować skutków (NOEL) lub przewidywane stężenie nie powodujące zmian w środowisku (PNEC) [4]. Dopiero po przeprowadzeniu tych wszystkich badań można właściwie ocenić ryzyko związane z nanocząstkami. Tylko wnikliwa analiza narażenia i zagrożenia wynikającego z obecności danych nanocząstek pozwala na pełną i posiadającą podstawy naukowe ocenę ryzyka.

Nanotechnologia w Unii Europejskiej

Obecnie w UE dużą uwagę przykładą się do spraw związanych z nanotechnologią. Od dawna wiadomo, że jest to technologia rozwojowa, niosąca potencjalnie duże korzyści dla konsumentów, pracowników i pacjentów. Nie wolno jednak zapomnieć, że obecność nanomateriałów w środowisku może nieść nowe zagrożenia dla organizmów żywych. Komisja Europejska twierdzi, że wszelkie zastosowania nanotechnologii muszą zapewnić wysoki poziom ochrony zdrowia publicznego, bezpieczeństwa konsumentów i pracowników oraz środowiska. Aby było to możliwe Komisja Europejska ogłosiła przegląd prawodawstwa UE w wybranych sektorach. Jest to jedno z podstawowych założeń „*Planu działania dla Europy na lata 2005 – 2009*” [16]. Odpowiednie regulacje prawne powinny zapewnić społeczeństwu możliwość czerpania korzyści z nowych zastosowań nanotechnologii i jednocześnie pozwolić zachować wysoki poziom bezpieczeństwa oraz ochrony zdrowia i środowiska naturalnego. Owoce tego przeglądu jest komunikat „*Aspekty regulacyjne nanomateriałów*” [18].

Akty prawne mające znaczenie w kwestii nanomateriałów można podzielić na kilka kategorii: akty dotyczące ochrony pracownika, chemikaliów, wprowadzania na rynek nowych produktów oraz ochrony środowiska. Obecnie obowiązujące w UE prawo w dużym stopniu obejmuje swym zakresem zagadnienia związane z nanomateriałami. W niektórych przypadkach niezbędne będzie jednak dostosowanie obowiązującego prawa. Komisja Europejska uważa, że do odpowiedniego opracowania, modyfikowania, a przede wszystkim wdrażania nowego prawodawstwa niezbędne jest rozwijanie wiedzy naukowej na temat nanocząstek [18].

W przypadku wprowadzania na rynek UE chemikaliów w postaci nanocząstek ma zastosowanie rozporządzenie w sprawie rejestracji, oceny, udzielania zezwoleń i stosowanych ograniczeń w zakresie, chemikaliów

(REACH) [28]. Jeśli dana substancja chemiczna jest już obecna na rynku w postaci większych cząstek, wprowadzenie jej do obrotu w postaci nanocząstek będzie wymagało aktualizacji dokumentów rejestracyjnych. Ze szczególnym uwzględnieniem nowych właściwości tej substancji wynikających z formy *nano* [18].

W sprawie ochrony pracowników obowiązuje w przypadku nanomateriałów dyrektywa ramowa 89/391/EWG [2], która nakłada na pracodawców szereg obowiązków w zakresie zapewnienia bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników. Zgodnie z dyrektywą planowanie i wprowadzanie nowych technologii w danym przedsiębiorstwie musi być konsultowane z pracownikami w zakresie dotyczącym warunków pracy [18].

Prawodawstwo dotyczące produktów zawiera wytyczne dotyczące konkretnych artykułów, np. środków medycznych, kosmetyków, dodatków do żywności, środków ochrony roślin. Inne produkty przeznaczone dla konsumentów, niepodlegające przepisom szczególnym, muszą spełniać wymogi dyrektywy w sprawie ogólnego bezpieczeństwa produktów [1]. Praktycznie wszystkie akty prawne dotyczące produktów nakładają na producentów obowiązek przeprowadzania oceny ryzyka i przyjęcia środków zarządzania ryzykiem. Obowiązek ten ma również zastosowanie w przypadku nanomateriałów [18].

Wśród aktów prawnych dotyczących ochrony środowiska w przypadku nanotechnologii obowiązują przepisy dotyczące zintegrowanego zapobiegania zanieczyszczeniom i ich kontroli (IPPC), kontroli niebezpieczeństwa poważnych awarii, związanych z substancjami niebezpiecznymi (seveso II), a także ramowa dyrektyw wodna oraz szereg dyrektyw dotyczących odpadów [18].

Nanotechnologia w Polsce

Rząd Polski docenił potencjał nanotechnologii jako jednego z kluczowych czynników wzrostu konkurencyjności gospodarki, bezpieczeństwa i dobrobytu społecznego. Już w roku 2006 na podstawie Zarządzenia Ministra Edukacji i Nauki został powołany Zespół do Spraw Nanonauki i Nanotechnologii. Owocem pracy tego zespołu jest dokument „*Nanonauka i Nanotechnologia – Narodowa strategia dla Polski – Raport*” [22]. Zespół do Spraw Nanonauki i Nanotechnologii dokonał w nim wnikliwej analizy dla Polski w dziedzinie nanotechnologii na tle innych krajów świata. W tym celu zastosowano metodę ekspercką, ankietowanie oraz przeprowadzono konsultacje z różnymi środowiskami naukowymi. W raporcie Zespół wskazał kierunki badań, które powinny zostać objęte strategicznym wsparciem państwa. Głównym powodem opracowania strategii jest konieczność sprostania przez Polskę wyzwaniom światowej konkurencji naukowej i technologicznej oraz

zajęcie znaczącego miejsca w gospodarce światowej [22].

Obawy związane z nanotechnologią

Dla rozwoju nanotechnologii kluczowa może się okazać akceptacja społeczna. Rolą Komisji Europejskiej i Rządu Polskiego jako decydentów jest uwzględnienie oczekiwań i obaw społeczeństwa. Nanotechnologia przede wszystkim powinna być użyteczna i bezpieczna, tylko wtedy może uzyskać poparcie opinii publicznej. Konieczne jest zapoznanie społeczeństwa z korzyściami, przewidywanymi zagrożeniami i możliwościami wykorzystania nanomateriałów. Każdy obywatel Wspólnoty Europejskiej powinien mieć możliwość sformułowania niezależnych opinii na temat nanotechnologii [15].

Komisja Europejska w sprawie informowania o nanomateriałach odgrywa rolę kluczową. Sfinansowała i opublikowała szereg materiałów informacyjnych, przeznaczonych dla obywateli w różnym wieku. W ramach projektu *NanoDialogue* w ośmiu państwach zorganizowano wystawy poświęcone nanotechnologii. Miały one na celu zwiększenie świadomości społecznej i wsparcie dialogu społecznego w formie specjalistycznych grup dyskusyjnych i debat publicznych. Podczas międzynarodowych warsztatów, które odbyły się w lutym 2007 r. z udziałem osób zajmujących się przekazywaniem informacji naukowych, omówiono metody dialogu publicznego w dziedzinie nanotechnologii [15].

Komisja Europejska stara się, żeby wiedza dotycząca nanomateriałów docierała do jak najszerszych kręgów społecznych. Nadal jednak znaczna część społeczeństwa europejskiego nie posiada wystarczającej wiedzy na ten temat. W celu zmiany tej niekorzystnej sytuacji Komisja Europejska i rządy poszczególnych państw UE powinny podejmować nowe inicjatywy mające w przyszłości podnieść poziom wiedzy konsumentów. Jak ważny dla nanotechnologii może okazać się brak akceptacji społecznej pokazuje przykład żywności modyfikowanej genetycznie.

PIŚMIENNICTWO

1. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady nr 2001/95/WE z dnia 3 grudnia 2001 r. w sprawie ogólnego bezpieczeństwa produktów. Dz. Urz. UE L 11 z dnia 3.12.2002.
2. Dyrektywa Rady nr 89/391/EWG z dnia 12 czerwca 1989 r. w sprawie wprowadzenia środków w celu poprawy bezpieczeństwa i zdrowia pracowników w miejscu pracy. Dz. Urz. UE L 183 z dnia 29.6.1989.
3. European Commission, SCENIHR/002/05, Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR). The appropriateness of existing methodologies to assess the potential risks associated with engineered and adventitious products of nanotechnologies. 10.03.2006.
4. European Commission, Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR). The appropriateness of the risk assessment methodology in accordance with the Technical Guidance Documents for new and existing substances for assessing the risk of nanomaterials. 21-22.06.2007.
5. Foltynowicz Z.: Nanotechnologia wkracza do opakownictwa. Ważenie, dozowanie, pakowanie 2006, 3, 55-57.
6. Gao X., Cui Y., Levenson R., Chung L., Nie S.: In vivo cancer targeting and imaging with semiconductor quantum dots. Nature Biotechnology 2004, 22, 969-976.
7. Gołębiewski J.: Nanokompozyty polimerowe. Struktura, metody wytwarzania i właściwości. Przemysł chemiczny 2004, 1, 15-20.
8. Gryberg M.: Druty i kropki kwantowe. Wiedza i życie 1998, 6, 28-31.
9. Gryberg M.: Najjaśniejsze kropki. Wiedza i życie 2001, 6, 38-40.
10. Jaiswal J., Mattoussi H., Mauro M., Simon S.: Long-term multiple color imaging of live cells using quantum dot bioconjugates. Nature Biotechnology 2003, 21, 47-51.
11. Jakubczyk E.: Nanotechnologia w technologii żywności. Przemysł Spożywczy 2007, 4, 16-22.
12. Jakubiak P., Foltynowicz Z.: Nanokompozyty polimerowe - nowoczesne rozwiązania na rynku opakowań. Opakowanie 2004, 6, 6-9.
13. Jankowska E., Pośniak M.: Występowanie pyłów w powietrzu otaczającym człowieka. Bezpieczeństwo Pracy 2006, 5, 16-19.
14. Kapuścik A.: Produkcja w skali „nano”. Inspektor Pracy 2006, 10, 11-13.
15. Komisja Wspólnot Europejskich, COM(2007) 505: Komunikat Komisji do Rady, Parlamentu Europejskiego i Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego, Nanonauka i nanotechnologia: Plan działania dla Europy na lata 2005-2009. Pierwsze sprawozdanie z realizacji za lata 2005-2007. Bruksela, 06.09.2007.
16. Komisja Wspólnot Europejskich, COM(2005) 243: Komunikat Komisji do Rady, Parlamentu Europejskiego i Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego, Nanonauka i nanotechnologia: Plan działania dla Europy na lata 2005-2009. Bruksela, 07.06.2005.
17. Komisja Wspólnot Europejskich, COM(2004) 338: Komunikat Komisji: Ku europejskiej strategii dla nanotechnologii. Bruksela, 12.05.2004.
18. Komisja Wspólnot Europejskich, COM(2008) 366: Komunikat Komisji: Aspekty regulacyjne nanomateriałów. Bruksela, 17.06.2008.
19. Kreyling W., Semmler-Behnke M., Möller W.: Health implications of nanoparticles. Journal of Nanoparticle Research 2006, 8, 543-562.
20. Kwon J., Hwang S., Jin H., Kim D., Minai-Tehrani A.: Body distribution of inhaled fluorescent magnetic nanoparticles in the mice. J. Occup. Health 2008, 50, 1-6.

21. *Makles Z.*: Nanomateriały - nowe możliwości, nowe zagrożenia. *Bezpieczeństwo Pracy* 2005, 2, 2-4.
22. Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego: Nanonauka i Nanotechnologia – Narodowa Strategia dla Polski – Raport, Warszawa, 15.02.2006 (http://www.nauka.gov.pl/mn/_gAllery/24/11/24111/20070213_Raport_Nano.pdf).
23. *Nesterenko P.N., Fedyanina O.N., Volgin Y.V.*: Microdispersed sintered nanodiamonds as a new stationary phase for high-performance liquid chromatography. *Analyst* 2007, 132, 403-405.
24. *Nowack B., Bucheli T.D.*: Occurrence, behavior and effects of nanoparticles in the environment. *Environ. Pollut.* 2007, 150, 5-22.
25. *Oberdörster G., Oberdörster E., Oberdörster J.*: Nanotoxicology: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environ. Health Perspect.* 2005, 113, 823-839.
26. *Piecyk L.*: Nanokompozyty modyfikowane nanorurkami i nanowłóknami węglowymi. *Tworzywa Sztuczne i Chemia* 2006, 3, 66-68.
27. *Piecyk L.*: Nanokompozyty termoplastyczne. *Tworzywa Sztuczne i Chemia* 2006, 2, 20-25.
28. Rozporządzenie (WE) nr 1907/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 18 grudnia 2006 r. w sprawie rejestracji, oceny, udzielania zezwoleń i stosowanych ograniczeń w zakresie chemikaliów (REACH). *Dz. Urz. UE L 396* z dnia 30.12.2006.
29. *Salek A.*: Nanobioroboty: perspektywy zastosowania w diagnostyce, 2006 (<http://www.international-bio-consulting.com/pdf/aktualny.pdf>).
30. *Salek A.*: Nanotechnologia – zastosowanie w przemyśle spożywczym, 2006 (<http://international-bio-consulting.com/pdf/Nanobiotechnologia-Application-Part1.pdf>).
31. *Schrand A., Huang H., Carlson C., Schlanger J.*: Are diamond nanoparticles cytotoxic? *J. Phys. Chem. B* 2007, 111, 2-7.
32. *Sikora M.*: Nanokosmetyki w natarciu. *Chemical Review* 2007, 7, 42-46.
33. *Sreekumaran N., Pradeep T.*: Halocarbon mineralization and catalytic destruction by metal nanoparticles. *Current Science* 2003, 12, 1560-1564.
34. *Stern S., McNeil S.*: Nanotechnology safety concerns revisited (Review). *Toxicol. Sci.* 2008, 101, 4-21.
35. *Świdwińska-Gajewska A.M.*: Nanocząstki (Część 1) – produkt nowoczesnej technologii i nowe zagrożenia w środowisku pracy. *Medycyna Pracy* 2007, 58, 243-251.
36. *Świdwińska-Gajewska A.M.*: Nanocząstki (Część 2) – korzyści i ryzyko dla zdrowia. *Medycyna Pracy* 2007, 58, 253-263.
37. *Wang L., Dong L., Bian G., Wang L., Xia T., Hong-Qi C.*: Using organic nanoparticle fluorescence to determine nitrite in water. *Anal. Bioanal. Chem.* 2005, 382, 1300-1303.
38. *Zhou Q., Xiao J., Wang W.*: Trace analysis of triasulfuron and bensulfuron-methyl in water sample using a carbon nanotubes packed cartridge in combination with high-performance liquid chromatography. *Microchemica Acta* 2007, 157, 93-98.

Otrzymano: 23.10.2008

Zaakceptowano do druku: 2.02.2009

