


Nanobezpečnost - fenomén nových technologií

 31.01.2012

nanosafety - phenomenon of new technologies

Petr Skřehot¹, Marcela Rupová¹

¹Výzkumný ústav bezpečnosti práce, Jeruzalémská 9, Praha 1, skrehot@vubp-praha.cz, rupova@vubp-praha.cz

bezpečnost práce

nanobezpečnost

nanotechnologie

nová rizika

Abstrakt

V posledních letech zaznamenaly nanotechnologie nebývalý rozvoj. V souvislosti s tím vyplynuly také oprávněné obavy týkající se bezpečnosti. S ohledem na některé nepříznivé zkušenosti z minulosti (škodlivé účinky azbestu, cigaretového kouře, výfukových plynů, DDT atd.) je v současnosti k tzv. „novým rizikům“, mezi něž jsou potenciální nežádoucí důsledky nanotechnologií řazeny, přistupováno v souladu s tzv. „principem předběžné opatrnosti“. Předběžná opatrnost nás vyzývá k tomu, abychom očekávali možnou škodu vždy, je-li to možné a provedli všechna dostupná opatření pro snížení potenciálních rizik. Tam, kde existuje vědecký doklad nebo odůvodněný předpoklad o tom, že může docházet k ohrožení lidského zdraví, by měla být přijata ochranná opatření, i když neexistuje úplná vědecká jistota o tom, že může k nežádoucím důsledkům docházet. Princip předběžné opatrnosti je však potřeba vnímat jako přechodné řešení, jehož aplikace je vhodná pouze po dobu, dokud nebudou získány všechny klíčové znalosti, které umožní přijmout ekonomicky, technicky i společensky nejvhodnější opatření pro zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví (potenciálně) exponovaných osob. V zájmu každého státu je proto rozvíjet výzkum v oblasti nanobezpečnosti (tj. BOZP při výrobě a používání nanomateriálů a nanotechnologií). Evropská unie stanovila prostřednictvím Evropské agentury pro BOZP v oblasti nanobezpečnosti tyto cíle: (1) vývoj metod pro odhad expozice novým materiálům na pracovištích (zejména nanočásticím a aerosolům) a (2) výzkum potencionálních nebezpečí, které nové materiály skýtají. Dalšími cíli výzkumu je vývoj postupů pro jejich detekci a monitorování v pracovním ovzduší a zaznamenávání změn zdravotního stavu exponovaných jedinců. Ačkoli tento výzkum probíhá více než 10 let a EU i USA na něj vynakládají stále větší finanční prostředky, jeho výsledky nejsou uspokojivé. Hlavní potíží je skutečnost, že obrovská množství informací, která poskytuje základní výzkum, nejsou vhodným způsobem převáděna do podoby nástrojů a opatření využitelných v provozní praxi, doporučených standardech či legislativě. Cílem tohoto příspěvku je proto seznámit čtenáře s aktuálními poznatky o účincích nanočástic na lidské zdraví, s klíčovými otázkami nanobezpečnosti, se způsoby hodnocení rizik a s vhodnými opatřeními pro prevenci rizik při provozování nanotechnologií.

Klíčová slova: nanobezpečnost, nová rizika, nanotechnologie, bezpečnost práce

Abstract

Recently unprecedented development of nanotechnology occurs. In this context the legitimate safety concerns have emerged. With regard to some negative experiences from the past (harmful effects of asbestos, cigarette smoke, exhaust fumes, DDT, etc.) the “new risks” – among them side effects of nanotechnologies – are at present approached accordingly to “precautionary principle”. Precaution call us we always expect the possible damage and we make all available measures to reduce potential risks. There where exists scientific proof or reasonable assumption that the human health could be endangered, the protective measures should be taken even if there is the absence of full scientific certainty that side effects can occur. The precautionary principle is, however, seen as a temporary solution, which application is suitable only for the period until the new key knowledge is gained. Those enable the best economical, technical and social measurements for granting occupational safety and health to (potentially) exposed persons. The interest of each country is to develop the research in the field of nanosafety (ie. occupational safety and health in production and use of nanomaterials and nanotechnologies). European Union through European Agency for Safety and Health at Work set following objectives in the field of nanosafety: (1) development of methods for estimating exposure to new materials in the workplace (especially nanoparticles and aerosols), (2) research of potential dangers that new materials might have. Other objectives of the research are the development of methods for their detection and monitoring in working atmosphere and recording changes in health status of exposed individuals. Although this research has been in process for more than 10 years in the USA and EU and costs more and more, its results are not satisfactory. The main difficulty is the fact, that the vast amount of information that the basic research provides are not appropriately transformed into usable tools and measures in practice, standards and legislation. The aim of this paper is to acquaint the readers with the current knowledge about the effects of nanoparticles on human health, with the key tasks of nanosafety, and with the methods of risk assessment and appropriate measures for risk prevention in the operation of nanotechnology.

Keywords: nanosafety, new risks, nanotechnology, occupational safety

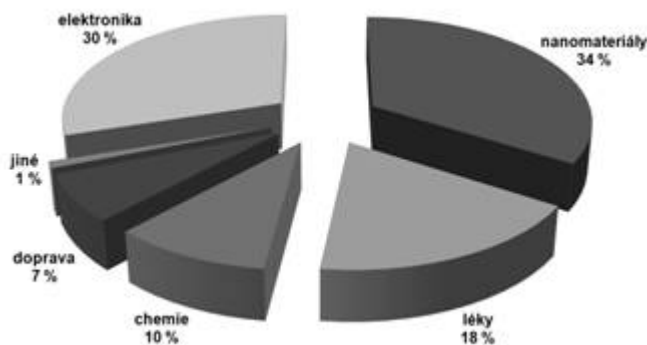
Úvod

Ultrajemné částice v ovzduší a koloidní částice ve vodách se vyskytují v životním prostředí na této planetě zcela přirozeně. Jejich zdrojem jsou nejčastěji sopečné erupce, požáry, eroze hornin, zvířený půdní prach, rostliny i živočichové. Významná je také mořská sůl či všudypřítomné vodní kapičky. Atmosférický aerosol se významně podílí na důležitých atmosférických dějích, jako je vznik srážek a udržování teplotní bilance Země. Kromě aerosolů přirozeného původu se však v atmosféře nachází také částice vznikající lidskou činností. Celkový příspěvek člověkem emitovaných částic se odhaduje na 200 milionů tun ročně, což představuje více jak 3 % veškerého aerosolu v zemské atmosféře. Jakkoli se může zdát toto číslo nízké, lidská činnost zatěžuje životní prostředí především aerosoly toxické, karcinogenní a perzistentní povahy. Těmito emisemi pak není ohrožována jen příroda ale také člověk sám. Zvláště markantní dopady můžeme pozorovat v urbanizovaných centrech, kde je člověk ohrožován zdravotními důsledky smogových situací vznikajících emisemi z dopravy a průmyslu při nepříznivých rozptylových podmínkách. V poslední době kromě uvedených problémů vyvstává také problém související s emisemi ultrajemných částic v pracovním prostředí, zvláště pak nanočástic umělého původu, o jejichž toxických účincích toho stále ještě mnoho nevíme.

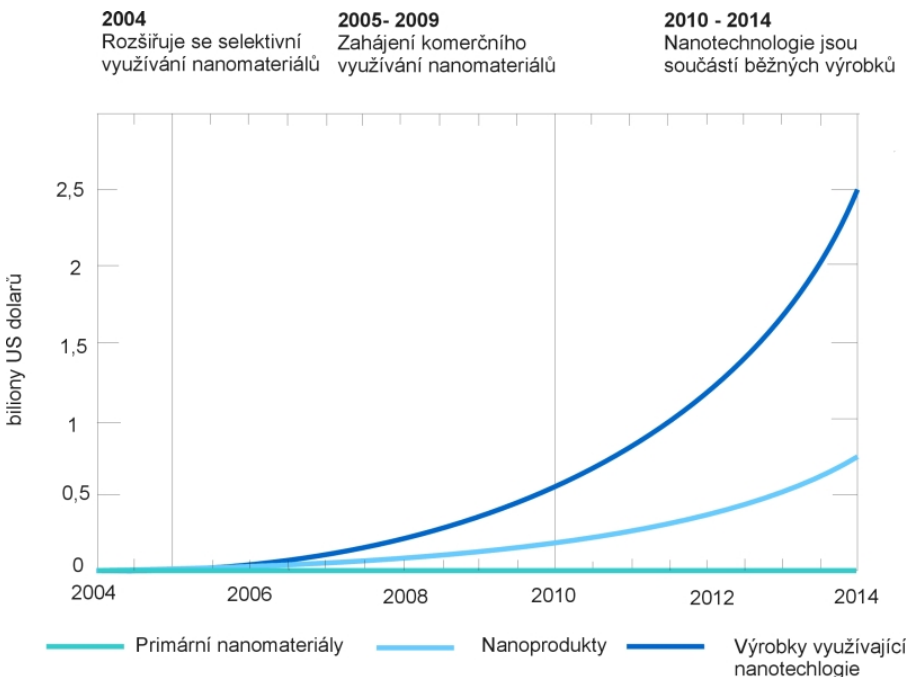
Nanotechnologie

Nanotechnologie v současnosti vedou k rostoucímu počtu pokrokových a materiálových inovací uplatňujících se v mnoha odvětvích, jakými jsou například zdravotní péče, energetika, potravinářství, informatika, kosmetika aj. Kvůli svým různorodým a často novým vlastnostem mají nanomateriály široké spektrum možného využití (viz obrázek 1) [14].

Pro své zajímavé uplatnění představují v současnosti nanotechnologie přední ekonomickou a technologickou výzvu. Světový trh s nanoproducty, který se začínal rozvíjet v roce 2001, byl tehdy odhadován na 40 miliard dolarů. Podle předpovědí americké Lux Research Inc. z roku 2004 by však mohl do roku 2014 trh s výrobky využívajícími nanotechnologie a nanomateriály dosáhnout objemu až 2600 miliard dolarů (tj. 2,6 bilionu USD) a trh s meziproducty vhodnými pro další zpracování či využití pak přibližně 750 miliard dolarů. Z prognózy rovněž vyplývá, že v návaznosti na významný růst produkce a využívání nanoproductů a nanotechnologií, musí dojít i ke zvýšení produkce primárních nanomateriálů. Předpokládá se však, že bude docházet k postupnému snižování jejich jednotkové ceny, tudíž celkové investice v této oblasti nebudou navyšovány (viz obrázek 2) [13].



Obrázek 1: Ekonomický význam využívání nanotechnologií v jednotlivých odvětvích v roce 2010



Obrázek 2: Odhad nárůstu trhu s nanomateriály a nanoproducty v letech 2004 - 2014 [13,15]

Na trhu se již nyní objevuje široká škála výrobků obsahujících nanomateriály zejména obsažené v kapalném prostředí nebo gelu. Oxid titaničitý, který je součástí různých kosmetických masť a opalovacích krémů, které zabraňují průniku

UV záření na pokožku, má rozměry v řádu od 50 do 100 nm. Saze, které jsou používány jako aditivum do automobilových pneumatik, mají rozměr od 50 do 100 nm i více. Je pravděpodobné, že nanočástice oxidu titaničitého z kosmetických přípravků se dříve či později dostanou do odpadních vod. Na druhé straně převážná část sazí z pneumatik je z velké části recyklována nebo skončí na skládkách pevných odpadů. Avšak i zde dochází ke znatelným inovacím. Bylo zjištěno, že uhlíkové nanotrubky jsou mimořádně tuhé a silné po celé své délce, a proto může být jednotěnných nebo i vícesměnných uhlíkových nanotrubeček (SWCNTs resp. MWCNTs) s poměrem přibližně 50 až 100 : 1 nebo větším použito k zesílení kompozitních materiálů. Jejich použití při výrobě pneumatik je předmětem intenzivního výzkumu. Součástí různých kosmetických přípravků osobní hygieny a ochrany a detergentů jsou dendrimery. Nanomateriály jsou přítomny i v textilních materiálech vzdorujících znečištění a vzniku skvrn. Předpokládá se, že i tyto nanočástice proniknou do odpadních vod a současné systémy čištění odpadních vod je nezachytí, takže jejich osud bude končit v povrchových vodách a tocích, příp. proniknou až do podzemních vod.

Nanočástice a jejich vlastnosti

Fyzikální vlastnosti

Většina lidských činností produkuje částice o velikostech jednotek mikrometrů. Při některých činnostech, jakými jsou například svařování, tepelné procesy či doprava, se však můžeme běžně setkávat i s částicemi submikronovými, s tzv. nanočásticemi. Dle normy ČSN P CEN ISO/TS 27687 jsou nanočástice definovány jako nanoobjekty se všemi třemi vnějšími rozměry v nanostupnici. Pokud se délka nejdelší a nejkratší osy nanoobjektu výrazně liší (obvykle více než třikrát), předpokládá se, že se použije termín nanovláknko nebo nanodeska místo termínu nanočástice [8]. Obecně hovoříme-li o nanočásticích, máme obvykle na mysli částice menší jak 100 nanometrů vznikající lidskou činností a často z materiálů v přírodě se nevyskytujících.

Takto malé částice představují pozoruhodnou formu hmoty, u níž se již začínají uplatňovat kvantové jevy doposud známé pouze u atomů a molekul. Zvláště výrazné je to u částic menších jak 20 nanometrů, které vznikají procesem zvaným nukleace (tj. kondenzací jednotlivých molekul plynů za vzniku molekulových klastrů) [11].

U částic menších jak 5 nanometrů vytváří již více než polovina všech molekul jejich vlastní povrch, což má velký vliv na jejich chování [11]. Na strukturu částice proto v takovém případě již nelze nahlížet klasickým způsobem, neboť povrch není kontinuem – není možné si ji tedy představovat jako pevnou částičku či prachové zrnko. Vhodnější je přirovnání spíše k pěnovému míčku, který je ve většině svého objemu dutý a je ohraničen povrchovou vrstvou vzájemně spojených molekul mateřské látky. Typickým příkladem může být molekula fullerenu C₆₀, která již sama o sobě je nanočásticí kulového tvaru o průměru okolo 1 nanometru.

Dominantní roli ve vlastnostech nanočástic hraje jejich povrch, na kterém se indukuje elektrický náboj. Čím menší částice je, tím větší roli její povrch hraje. Velmi malé částice jsou proto značně reaktivní a ochotně se spojují do větších celků – agregátů. Tímto procesem, který se nazývá koagulace, dochází ke stabilizaci primárních nanočástic, neboť dochází k energeticky výhodnějšímu rozložení povrchového náboje. Koagulace je proces spontánní a jeho rychlost závisí na koncentraci aerosolu, převažující velikosti částic a na jejich náboji. Z tohoto důvodu z aerosolu neustále mizí velké množství malých částic a současně vzniká mnoho větších agregátů. Ve velikostním spektru běžného atmosférického aerosolu proto nacházíme dvě charakteristická maxima – jedno okolo 10-20 nm a druhé okolo 200-300 nm, která se objevují i ve spektrech aerosolů tvořených uměle vznikajícími nanočásticemi (např. na pracovištích, pokud se nacházíme v určité minimální vzdálenosti od jejich zdroje).

Biologické účinky

Výzkumy ukázaly, že nanočástice mají díky svým mimořádným fyzikálním vlastnostem také neobvyklé biologické účinky. Příkladem mohou být nanočástice stříbra, které se již dnes široce využívají pro své vynikající baktericidní a

desinfekční účinky. Naproti tomu fullereny byly potvrzeny jako vynikající pohlcovače volných radikálů, a rovněž dokáží ničit vir HIV [1].

S rozvojem znalostí o nanočásticích, zejména o jejich toxikologii, se však také stále více poukazuje na jejich možná rizika pro lidské zdraví. Důsledky intoxikace lidského těla umělými nanočásticemi nejsou doposud dobře známy, a proto mnoho odborníků oprávněně varuje před jejich masovým rozšířením, zejména pak do produktů denní potřeby (např. do kosmetiky, sportovního zboží, oblečení, opalovacích krémů, prostředků pro dentální hygienu, potravin aj.). V této souvislosti se proto stále více hovoří o tzv. principu předběžné opatrnosti.

Díky své velikosti mohou nanočástice, podobně jako molekuly látek či viry, pronikat do buněk, prostupovat přes nejrůznější biomembrány, účastnit se metabolismu anebo se v těle dlouhodobě ukládat. Z hlediska vstupu představují pro nanočástice nejsnadnější cestu plíce a trávící ústrojí. Nanočástice mohou do těla vstupovat i dermálně, avšak kůže je poměrně účinnou bariérou. Relativně snadno jí však pronikají částice lipofilní povahy [1].

V dýchacím ústrojí je depozice částic značně závislá na jejich velikosti a na oblasti dýchacího systému, kam pronikají. V horních cestách dýchacích silně závisí na tom, zda k dýchání slouží nos nebo ústa, na plicní ventilaci a na velikosti vdechovaných částic. Vzduch vdechovaný nosem je při svém průchodu přes spirálovité útvary v nosních cestách ohříván a zvlhčován. Největší částice jsou odstraňovány ze vzduchu usazováním a impakcí, nejmenší pak difúzí na nosních chloupkách a v ohybech dýchacích cest. Při dýchání ústy se usazují především velké částice o velikostech jednotek mikrometrů a účinnost se významně zvyšuje se zvyšující se dechovou frekvencí. Čím je částice menší, tím hlouběji do dýchací soustavy může proniknout. Částice menší jak 100 nanometrů tak pronikají do tracheobronchiální a alveolární oblasti, kde se deponují vlivem difúze [4]. V alveolární oblasti se nanočástice již mohou dostávat do krevního oběhu, neboť stěna alveol je tlustá pouhé 2 mikrometry [1]. Inhalační studie provedené na zvířatech prokázaly, že rychlost přestupu částic touto cestou do krve je značně závislá na charakteru materiálu, který nanočástici tvoří. Kovové nanočástice přechází do oběhového systému rychle, zatímco nekovové nanočástice jen velmi málo nebo vůbec. U jedinců trpících dýchacími nebo oběhovými onemocněními je však prostupnost vyšší a účinek této bariéry se snižuje nebo zcela vytrácí [1].

Jako odezva na přítomnost cizorodé látky se v tělech všech organismů uplatňuje řada procesů. Proces, který spočívá ve schopnosti transportu nečistot zachycených v dýchacím ústrojí směrem ven, se nazývá clearance. Má dvě fáze. První (rychlá) mukociliární fáze se uplatňuje v tracheobronchiální oblasti plic, kde se nacházejí bičíkovité buňky, které kmitají a vytlačují za pomoci hlenu zachycené částice směrem ven. Druhá (pomalá) fáze, tj. fagocytóza, všeobecně představuje pohlcování především tuhých částic větších rozměrů (buněk, virů, bakterií, aj.). Fagocytující buňka obklopí částici výběžky své cytoplazmy a uzavře ji do svého nitra, vzniká tzv. fagosom. Dojde ke splynutí fagosomů s primárními lyzosomy a vznikají fagolyzosomy, ve kterých dochází k degradaci fagocytované částice.

Nejsou-li nanočástice účinně zlikvidovány některým z uvedených procesů mohou se prostřednictvím oběhového a lymfatického systému postupně dostat do jakékoli tělesné tkáně, orgánu i do nervové soustavy, v nichž mohou způsobit nevratné poškození či mutace DNA. Doposud diagnostikovaná onemocnění spojená s vdechnutými nanočásticemi jsou astma, bronchitida, rozedma plic, rakovina plic a neurodegenerativní onemocnění jako jsou Parkinsonova nebo Alzheimerova choroba. Nanočástice pronikající trávícím ústrojím způsobují nejčastěji Crohnovou chorobou a rakovinou tlustého střeva. V oběhovém systému jsou nanočástice spojovány s výskytem arteriosklerózy, s krevními sraženinami, srdeční arytmií, srdečními chorobami a dokonce i se zástavou srdce [1]. Potenciální zdravotní důsledky expozice nanočásticím tedy rozhodně nelze podceňovat.

Bezpečnost a ochrana zdraví při práci s nanomateriály

Expozice nanočásticím z pracovního ovzduší

Náležitou pozornost otázkám ochrany zdraví před účinky nanočástic je nutné věnovat především v pracovním prostředí. Zde jsou lidé exponováni po dlouhou dobu a často i nanočásticím tvořenými toxickými látkami. Zmíněná problematika se týká nejen pracovišť ve výrobních provozech či v těžebním sektoru, ale i v administrativě, kde jsou používány klimatizační jednotky a výpočetní technika.

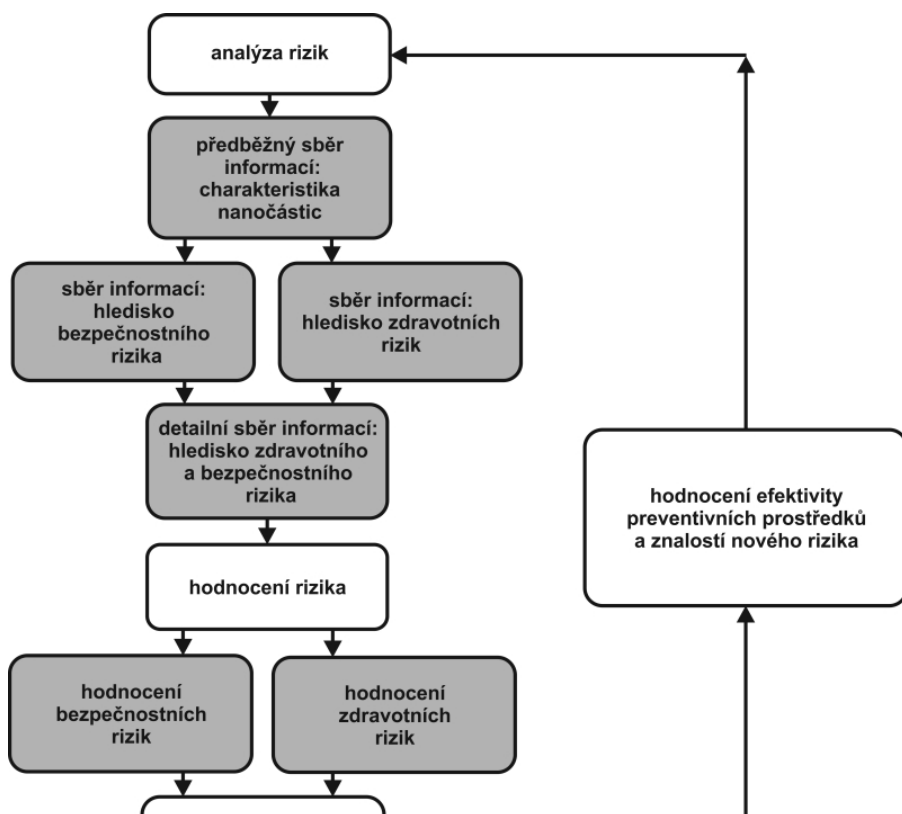
V čistém venkovním ovzduší bychom v centimetru krychlovém napočítali přibližně tisíc nanočástic; v pracovním ovzduší jsou ale jejich koncentrace sto až milionkrát vyšší. S nejvyššími koncentracemi se lze setkávat na pracovištích, kde dochází k tepelným úpravám látek, mletí, řezání, broušení, drcení, přesypávání či spalování. Svou emisní stopu však má také kancelářská technika, klimatizace, vonné tyčinky, kouření, hořící svíčky, či lidé samotní.

Ačkoli by se mohlo zdát, že nejvíce jsou lidé ohroženi na pracovištích, kde jsou v ovzduší dosahovány nejvyšší koncentrace aerosolů, výzkumy ukázaly, že v případě nanočástic tato úměra neplatí. Prokázalo se totiž, že negativní zdravotní účinky nanočástic nekorelují s (hmotnostní) dávkou, kterou exponovaná osoba obdrží, nýbrž jsou spojeny s celkovým povrchem částic, jímž byla daná osoba vystavena [11]. Rozhodující roli tedy hraje velikost částic, méně pak jejich chemické složení, tvar či krystalická struktura. Naproti tomu jejich počet či hmotnostní koncentrace v ovzduší mají až druhotný význam.

Analýza pracovních rizik

V současnosti neexistuje mnoho přístupů, které by v konkrétních rysech definovaly postupy pro analýzu a hodnocení rizik spojených s expozicí nanočásticím na pracovištích. Některé se opírají o klasické přístupy [9], jiné naopak zavádějí přístupy zcela nové, které však, s ohledem na nedostatek informací o nebezpečnosti nanočástic, jsou pouze orientační [2].

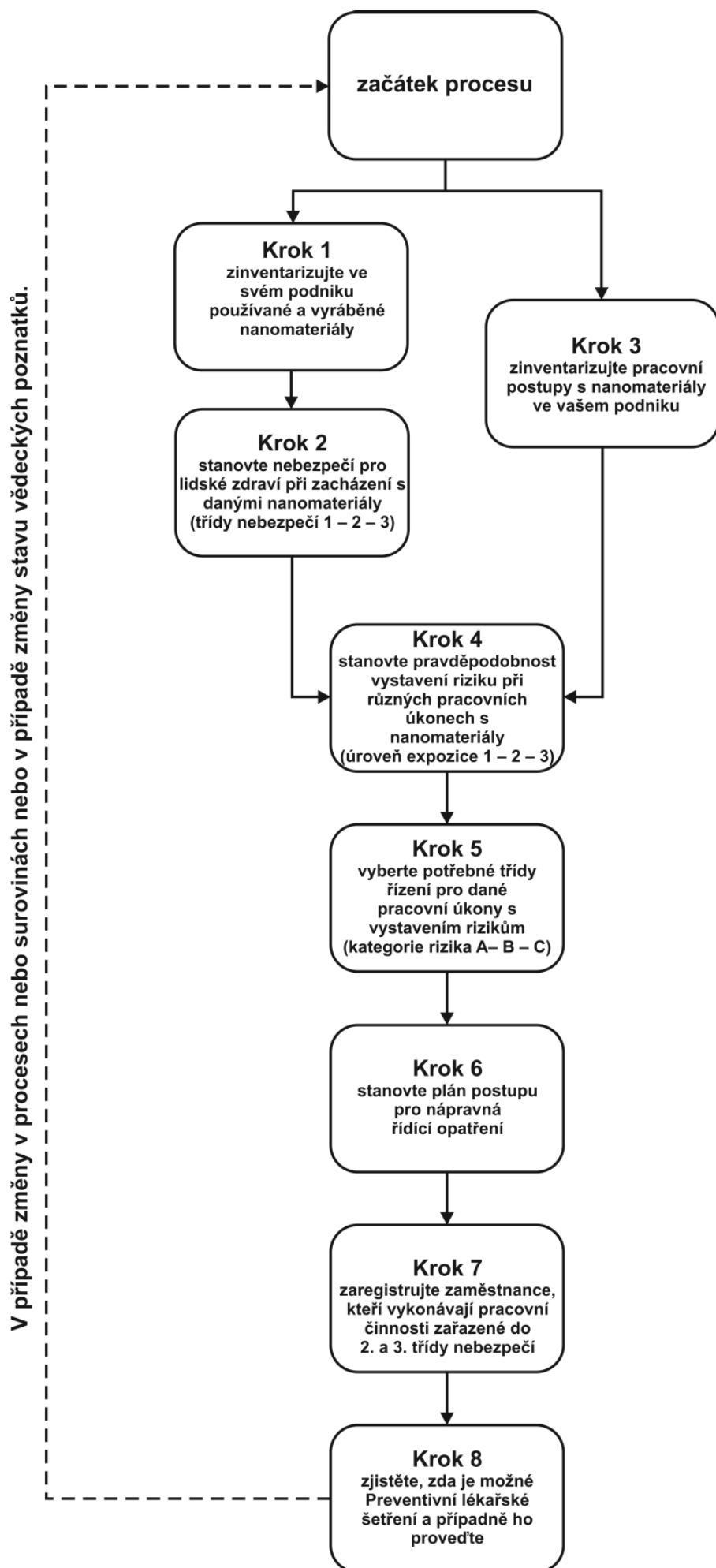
Analýza rizik souvisejících s expozicí nanočásticím na pracovišti musí předem předpokládat detailní znalost o používaných nanočásticích, informace o jejich toxicitě, úrovni expozice během pracovní doby, při jednotlivých pracovních činnostech a na různých místech pracoviště. Sběr dat před samotnou analýzou rizik je tedy naprosto klíčový a hraje nejdůležitější roli v prevenci rizik. Velmi důležitý je také systematický postup, který by měl být dodržen, aby nebyla některá rizika přehlédnuta. Obecný systémový přístup je schématicky uveden na obrázku 3 [9].



pracovních činnostech [9]

Konkrétní doporučený postup pro analýzu rizik podává například materiál zpracovaný holandským institutem IVAM [2], který prezentuje výsledky výzkumu prováděného pro odborové svazy FNV, VNO-NCV a CNV v roce 2010. Tento materiál obecně doporučuje dodržet níže uvedené kroky (viz obrázek 4):

- **krok 1** – inventarizace nanomateriálů, které jsou v podniku používány a vyráběny;
- **krok 2** – identifikace nebezpečí, které daný materiál může představovat pro lidské zdraví (třídy nebezpečí 1 – 2 – 3);
- **krok 3** – inventarizace pracovních postupů, při kterých se pracuje s nanomateriály;
- **krok 4** – odhad pravděpodobnosti expozice nanočásticím při pracovních činnostech (úroveň I – II – III);
- **krok 5** – určení kategorie (míry) rizika pro pracovní činnosti, při kterých dochází k expozici nanočásticím (kategorie rizika A – B – C);
- **krok 6** – stanovení plánu nápravných a preventivních opatření;
- **krok 7** – evidence zaměstnanců, kteří vykonávají pracovní činnosti zařazené do 2. a 3. třídy nebezpečí;
- **krok 8** – provedení preventivních lékařských vyšetření a dlouhodobé sledování zdravotního stavu zaměstnance s přihlédnutím na možné expoziční vstupy nanočástic.



Obrázek 4: Postup pro prevenci rizik při expozici nanočásticím [2]

Po odhad rizik spojených s expozicí nanočásticím je však klíčové provedení pečlivého měření aerosolů na daných pracovištích, které umožní odhalit jak zdroje nanočástic a faktory, které celkovou emisi ovlivňují, tak i specifikovat velikostní distribuci nanočástic v ovzduší a časový profil během prováděných pracovních činností. Spolu s informacemi o pracovišti a charakteru vykonávané práce pak lze za využití výše uvedeného postupu odhadnout míru rizika (Nevýznamné - Významné - Závažné) a následně vypracovat návrh na ochranu zdraví pracovníků.

Preventivní opatření

Eliminovat riziko zcela není v praxi obvykle možné, a proto je třeba definovat a zavádět taková preventivní opatření, která budou poskytovat požadovanou ochranu zaměstnanců. V případě nanočástic se nejčastěji jedná o tato opatření [10]:

- Snížení rizika u zdroje
 - design zařízení, procesů a pracoviště,
 - náhrada nebezpečných látek, procesů a vybavení,
 - bariéry proti emisi částic;
 - Technická opatření
 - nucená výměna vzduchu,
 - čištění vzduchu v uzavřeném okruhu,
 - monitoring kontaminace pracovního ovzduší;
- Organizační opatření
 - administrativní prostředky,
 - zkrácení expoziční doby,
 - školení a výcvik,
 - zavedení kontrolovaných pásem,
 - osobní hygiena pracovníků,
 - lékařské preventivní prohlídky,
 - řízení provozu;
- Prostředky osobní ochrany
 - prostředky pro ochranu dýchacích orgánů,
 - prostředky pro ochranu kůže a povrchu těla.

Nejúčinnějšími opatřeními na pracovištích jsou obvykle opatření technická, neboť nejsou závislá na lidském jednání. Proto by jim měla být věnována patřičná pozornost a vždy by měla být navrhována a implementována s ohledem na podmínky v daném provozu. Nejlepší ochranou je, izolace zdroje rizika od okolního prostředí, aby nemohlo docházet k nežádoucím emisím do pracovního prostředí. K tomuto účelu slouží nejrozumnější hermetické boxy, boxy s laminárním prouděním, kryty či bariéry. Dalším účinným opatřením je odsávání aerosolů u zdroje jejich vzniku a v neposlední řadě také poskytování osobních ochranných pracovních prostředků. Jako nezbytný se na většině pracovišť jeví také průběžný nebo alespoň periodický monitoring kontaminace ovzduší aerosoly.

Management rizik

Nanobezpečnost

Nanobezpečnost je stav, při kterém je míra všech rizik spojených s daným nanomateriálem snížena alespoň na přijatelnou úroveň. V reálném životě pak v takovém případě považujeme za téměř jisté, že za daných okolností nenastanou nežádoucí účinky coby následek působení známých i neznámých činitelů. Základním předpokladem pro nanobezpečnost je management rizik, který vychází k aktuálních vědeckých a technických poznatků o používaných

nanomateriálech (tzn. porozumění chování a vlastností nanomateriálů, znalost toxických účinků v závislosti na expozici, znalost dopadů na životní prostředí aj.), z opatření vyplývajících z právních a ostatních předpisů k zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví při práci a z opatření zaměstnavatele přijatých s cílem předcházet nežádoucímu působení rizik.

Nanobezpečnost tak představuje systematický přístup, který vychází z hodnocení rizik spojených s nanomateriály a zavádí přiměřená opatření k tomu, aby byla zajištěna bezpečnost a ochrana zdraví lidí a životního prostředí. Tam, kde není pro dosažení výše uvedených cílů dostatek informací, je nutno postupovat v souladu s principem předběžné opatrnosti.

Strategie pro řízení rizik

Řízení rizik je integrální součástí každého řídicího procesu. Jedná se o multifaktorový proces, kterého by se měl zúčastnit multidisciplinární tým. Je to také proces trvalého zlepšování, uplatňování předem navržené strategie, postupů a praktik pro neustálé zlepšování úrovně bezpečnosti práce a ochrany zdraví zaměstnanců. Strategie pro řízení rizik souvisejících s nanomateriály směřuje k dosažení požadované úrovně nanobezpečnosti.

Základním předpokladem pro úspěšné řízení rizika je znalost všech rizik, která mohou mít nežádoucí působení na zdraví zaměstnanců. Proto je nutné rizika analyzovat a vyhodnocovat. V návaznosti na to je nutné navrhovat opatření pro omezování nežádoucího působení existujících rizik, a také průběžné hodnocení účinnosti přijatých opatření. Jedná se tedy o systémový proces, který nikdy neustává a neustále se cyklicky opakuje (viz Demingův cyklus).

V oblasti nanobezpečnosti je management rizik charakterizován několika klíčovými strategiemi, jejichž zaměření a rozsah se může časem měnit podle toho, jak úspěšná budou v podniku zavedená preventivní opatření a jaké nové vědecké poznatky o nanomateriálech budou postupně k dispozici. Jedná se o:

- systém prioritizace opatření pomocí metod Control Banding;
- strategii snižování expozice nanomateriálům;
- dodržování principu předběžné opatrnosti;
- strategii přidělování prostředků osobní ochrany;
- bezpečnostní značení a vymezení nebezpečných zón;
- strategii preventivní údržby;
- strategii pro likvidaci nežádoucích úniků a provozních havárií.

Vzhledem k mnoha nejistotám, které jsou nanomateriálům vlastní a při snaze o jejich vyčerpávající popis a charakterizaci, je uplatnění „konvenčního“ přístupu pro management rizik nesmírně obtížné. Proto se postupně zavádějí výše uvedené Control Banding metody (CB), které jsou používány k posouzení expozice v případě, kdy nejsou definovány limitní expoziční hodnoty. Control Banding se tak stává nástrojem nikoliv pro hodnocení rizika, nýbrž pro jeho řízení, přičemž bere v úvahu nejistoty týkající se údajů o toxicitě daných nanomateriálů. Control Banding byl původně vyvinut ve farmaceutickém průmyslu za účelem systémového přístupu při zajišťování bezpečnosti pracovníků zapojených do procesů využívajících produkty, o kterých nebyly známy bližší informace o jejich toxicitě. Vychází však ze stávajících informací dostupných z literatury a opírá se o řadu známých skutečností a předpokladů.

Existuje několik návodů pro Control Banding, z nichž nejcitovanější je přístup Mezinárodní organizace práce (ILO) [15], francouzské národní agentury pro bezpečnost ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire) a australského úřadu Workplace Health and Safety Queensland. Na základě posouzení dle kritérií příslušné Control Banding metody jsou vyráběné/používané nanomateriály zařazeny do skupin, jež slouží k relativnímu srovnání s úrovní rizika známých anebo podobných látek či materiálů, přičemž se bere v úvahu míra expozice pro danou pracovní pozici. Tímto postupem se kvalitativní hodnocení rizika porovnává a kombinuje s kontrolní skupinou látek a posléze se navrhnou nezbytná

minimální bezpečnostní a ochranná opatření odpovídající předpokládané úrovni rizika. EU OSHA konstatuje, že „navrhovaný nástroj je zejména vhodný pro malé a středně velké podniky, které nemusí mít nutně k dispozici veškeré metrologické charakteristiky pro nanomateriály, s nimiž nakládají nebo podrobné toxikologické studie potřebné pro řádné provedení rizikové studie“.

Podle ANSES mají metody Control Banding následující omezení:

- tento nástroj je vhodný, aby byl aplikován pouze v případě rutinního zacházení a manipulaci s nano-materiály na pracovišti a za běžného provozu;
- je vhodný pro jakýkoli typ nanomateriálů, za předpokladu, že dotyčná množství nejsou příliš naředěná, anebo se nejedná o vyloženě nadměrné objemy;
- CB metodu lze použít pouze k určení potenciálního ohrožení zdraví. Tato metoda se nezabývá stanovením rizik a neřeší jiná bezpečnostní rizika, např. požár/nebezpečí výbuchu či rizika pro životní prostředí;
- je nezbytné, aby uživatel CB metody pro stanovení rizik měl dostatečné znalosti a vzdělání v oblasti prevence rizik při práci s chemickými látkami (absolvent oboru chemie nebo toxikologie), nanovědách, nanotechnologiích a aerosolech. Užití CB bez patřičných odborných znalostí a kritického nadhledu, může vést k nesprávným závěrům, příp. chybným předpokladům, a tudíž nevhodné volbě preventivních opatření, které by ve svém důsledku mohly vystavit zaměstnance vážnému ohrožení zdraví.

Kromě CB metod se paralelně rozvíjejí také obecné přístupy pro hodnocení zdravotního rizika inhalační expozice pro látky, jejichž vlastnosti nejsou ještě zcela prozkoumány. Tyto metody jsou označovány jako Advanced REACH Tool (ART) [17]. Uvedená problematika je značně rozsáhlá a v rámci tohoto přehledového článku není možné se jí věnovat podrobněji. Případné zájemce lze odkázat na příslušné informační zdroje.

Princip předběžné opatrnosti

Předběžná opatrnost vyzývá k tomu, aby možná škoda byla očekávána vždy, je-li to reálně možné a v souladu s tím byla provedena všechna dostupná opatření pro snížení možných nežádoucích důsledků. Princip předběžné opatrnosti, ačkoli jej řadíme mezi klíčové prvky managementu rizik souvisejících se tzv. „novými riziky“ (new and emerging risks) [16], je potřeba vnímat pouze jako přechodné řešení. Aplikace tohoto principu je možná pouze po dobu, dokud nebudou získány všechny klíčové znalosti, jež umožní přijmout ekonomicky, technicky i společensky nejoptimálnější opatření pro zajištění dostatečné úrovně bezpečnosti a ochrany zdraví (exponovaných) osob a životního prostředí. Management rizik proto, jak již bylo uvedeno výše, musí být založen na aktivním vyhledávání nejnovějších vědeckých a technických informací, poznatků a doporučení, jež by bylo možné využít pro optimalizaci stávajících opatření v oblasti nanobezpečnosti.

Závěr

Nanočástice se stále více uplatňují v rozličných oblastech našeho života - od kosmických technologií, přes průmysl až po potravinářství či kosmetiku. Mnoho z jejich vlastností však neznáme a dlouho znát nebudeme. Proto nelze ani s určitostí tvrdit, že se pro nás do budoucna nemohou stát závažnou hrozbou. Zvláště významný je tento problém na pracovištích, kde jsou zaměstnanci vystavováni dlouhodobému působení nanočástic. Nejedná se však jen o provozy nové, využívající nanotechnologie. S nanočásticemi se setkáváme všude tam, kde dochází k tepelným úpravám látek, mletí, řezání, broušení, drcení, přesypávání či spalování. Svou emisní stopu má také kancelářská technika, klimatizace, vonné tyčinky, kouření či hořící svíčky.

Zaměstnavatel má povinnost zajistit bezpečnost a ochranu zdraví zaměstnanců při práci s ohledem na rizika možného ohrožení jejich života a zdraví, která se týkají výkonu práce. Proto je povinen soustavně vyhledávat nebezpečné činitele a procesy pracovního prostředí a pracovních podmínek, zjišťovat jejich zdroje a vyhodnocovat identifikovaná

pracovní rizika [3]. Žádný právní předpis ani norma však nestanoví, jakým způsobem má postupovat při vyhledávání a hodnocení rizik spojených s nanočásticemi. Naprostá většina zaměstnavatelů také ani netuší, jakými prostředky a opatřeními se lze proti negativním účinkům nanočástic bránit.

Cílem tohoto článku bylo podat přehled o základních otázkách nanobezpečnosti a prezentovat aktuální poznatky z této oblasti využitelné pro zlepšení úrovně bezpečnosti a ochrany zdraví zaměstnanců exponovaných nanomateriálům.

Literatura

[1] Buzea, C.; Pacheco-Blandino, I.; Robbie, K. Nanomaterials and nanoparticles : sources and toxicity. *Biointerphases*, 2007, vol. 2, issue 4.

[2] Cornelissen, R.; Jongeneelen, F.; van Broekhuizen, P. *Handleiding veilig werken met nanomaterialen en-producten* [online]. Amsterdam : IVAM, 2010 [cit. 2011-06-05]. Dostupný z www: <http://www.fnv.nl/media/pdf/94924/Handleiding_veilig_werken_met_Nanomaterialen_en_-producten.pdf>.

[3] Česká republika. Parlament ČR. Zákon č. 262/2006 Sb., zákoník práce, ve znění pozdějších předpisů. *Sbírka zákonů České republiky*, 2006, částka 84, s. 3146-3241.

[4] *Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection*. ICRP-66, 1994.

[5] ČSN EN 689. *Ovzduší na pracovišti – Pokyny pro stanovení inhalační expozice chemickým látkám pro porovnání s limitními hodnotami a strategie měření*. Praha : Český normalizační institut, 1997. 36 s.

[6] ČSN ISO 8756. *Kvalita ovzduší – Používání údajů o teplotě, tlaku a vlhkosti*. Praha : Český normalizační institut, 1997. 8 s.

[7] ČSN EN ISO 16000-1. *Vnitřní ovzduší – Část 1: Obecná hlediska odběru vzorků*. Praha : Český normalizační institut, 2007. 27 s.

[8] ČSN P CEN ISO/TS 27687. *Nanotechnologie – Termíny a definice nanoobjektů – Nanočástice, nanovlákná a nanodeska*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 16 s.

[9] Ostiguy, C. ...[et al.]. *Studies and Research Projects : Best Practices Guide to Synthetic Nanoparticle Risk Management : Report R-599* [online]. Montréal : IRRST, 2009 [cit. 2011-06-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.irsst.qc.ca/media/documents/pubirsst/r-599.pdf>>. ISBN 978-2-89631-345-7.

[10] OSTIGUY, C. ... [et al.]. *Nanoparticles : Actual Knowledge about Occupational Health and Safety Risks and Prevention Measures*. Montréal : Institut de recherche Robert Savé en santé et en sécurité du travail, 2006. ISBN 978-2-89631-063-0.

[11] Ruzer, L.S; Halley, N.H. *Aerosols Handbook*. 1st. ed. Boca Raton : CRC Press. 2005. ISBN 1-56670-611-4.

[12] Schulte, P. ...[et al.]. Occupational Risk Management of Engineered Nanoparticles. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2008, no. 5, pp. 239-249. ISSN 1545-9624.

[13] *Sizing nanotechnology's value chain* [online]. Lux Research, 2004 [cit. 2011-06-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.luxresearchinc.com>>.

[14] *Développement et conseil* [online]. 2004 [cit. 2011-07-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.develop-conseil.com>>.

[15] Maynard, A. *Nanotechnology and Occupational Health* [online]. Cincinnati : NIOSH, 2005 [cit. 2011-06-05].

Dostupný z WWW <http://www.epa.gov/ncer/nano/lectures/maynard_06_13_05_presentation.pdf>.

[16] *New and Emerging Risks in Occupational Safety and Health* [online]. European Agency for Safety and Health at Work, 2009 [cit. 2011-12-13]. Dostupný z WWW: <http://osha.europa.eu/en/publications/outlook/te8108475enc_osh_outlook>. ISBN 978-92-9191-223-0.

[17] van Tongeren, M. ...[et al.]. Advanced REACH Tool : Development and Application of the Substance Emission Potential Modifying Factor. *The Annals of Occupational Hygiene* [online], 2011, roč. 55, č. 9, s. 980-988 [cit. 2011-2-1]. Dostupný z WWW: <<http://annhyg.oxfordjournals.org/content/55/9/980.abstract>>. ISSN 1475-3162.

Vzorová citace

SKŘEHOT, Petr; RUPOVÁ, Marcela. Nanobezpečnost - fenomén nových technologií. *Časopis výzkumu a aplikací v profesionální bezpečnosti* [online], 2011, roč. 4, č. 4. Dostupný z WWW: <http://www.bozpinfo.cz/josra/josra-04-2011/nanobezpečnost_skrehot_rupova.html>. ISSN 1803-3687.

Autor článku:

Ing. Marcela Rupová

RNDr. Mgr. Petr Skřehot, Ph.D.