

Ing. Matěj FORMAN, Ph.D.
prof. Ing. Miroslav JÍCHA, CSc.
VUT v Brně, Fakulta strojního
inženýrství

Transport a depozice pevného aerosolu v dýchacích cestách

Transport and Deposition of Solid Aerosol in Breathing Airways

Recenzent
MUDr. Ariana Lajčíková, CSc.

Článek shrnuje poznatky z výzkumu proudění a depozice tuhých aerosolů v lidském dýchacím traktu počítačovým modelováním proudění. S dnešními výpočetními prostředky je nemožné modelovat celý dýchací trakt, proto byla depozice zkoumána zvlášť v horních a dolních cestách dýchacích po devátou bifurkaci (větvení). Použitá geometrie je upravena z CT-scanu živého člověka a dosahuje až do 9. generace větvení dýchacích cest. Zatímco horní cesty dýchací (modelováno bylo proudění nosem) slouží jako účinný filtr větších částic, mechanismus usazování v dolních cestách dýchacích je jiný. Výpočty plného dýchacího cyklu ukázaly, že k depozici částic dochází nejen při nádechu, ale také při výdechu a je tedy nutné analyzovat celý dýchací cyklus, nejenom ustálený stav při nádechu.

Klíčová slova: dýchání, depozice částic, modelování proudění vzduchu

Authors summarize the scientific knowledge based on the research of solid aerosols flow and their deposition in the human breathing tract with use of the computer flow modeling in the article. It is impossible to model the whole breathing tract with the present methods of computation; therefore the deposition was examined separately inside upper breathing airways and lower breathing airways until the ninth bifurcation. The used geometry has been modified according to a live human being CT scanning and it achieves up to the 9th generation of the breathing tract bifurcation. While the upper breathing tract (the modeling the nose flow) serves as an effective filter of greater particles; the mechanism of deposition smaller particles inside the lower breathing tract, differs. There has been shown from calculations of the entire (closed) breathing cycle that the deposition of particles occurs not just at the breathing in but at the breathing out, too. Therefore, it is necessary to analyze the entire breathing cycle, not only the stabilized situation at the breathing in.

Key words: breathing, particles deposition, air flow modeling

ÚVOD

Většina populace v Evropě dnes žije v městských aglomeracích. Zatímco těžký průmysl byl z měst vytlačen, stejně jako zdroje elektrické a tepelné energie, znečištění městského prostředí stále narůstá. Podstatnou složkou tohoto znečištění je pevný aerosol, jehož vliv na lidské zdraví je výrazný a je třeba se jím zabývat. Je důležité klást velký důraz na technologie a materiály používané při technickém zabezpečení budov a dalších servisních technologií, stejně tak je třeba se věnovat vlivu uvolňovaných aerosolů na lidské zdraví, mimo jiné tedy na depozici pevného aerosolu v dýchacím traktu člověka. Koncentrace, velikostní spektrum, stejně jako složení těchto částic je závislé nejen na typu prostoru a činnosti v něm prováděné, ale také na typu ventilace a vytápění.

V zemích střední Evropy není již zvykem obytné prostory vytápět naftovými topidly, v zemích jako je Austrálie či USA jsou však tato topidla stále používána v nevětraných prostorách a jsou nebezpečným zdrojem karcinogenních sazí (ale také velmi jemných částic) [1]. U ventilovaných prostor je situace poněkud jiná, ne však bezproblémová, jak ukazuje studie [2], ze které vyplývá, že až jedna čtvrtina znečištění v kancelářských budovách pochází z větracích systémů. Problémem, kterým se dnes řada pracovišť zabývá, je také pevný aerosol ve školách, kde např. koncentrace PM10 mohou stoupnout přes den až k 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [3]. Zatímco koncentrační pozadí koreluje s koncentrací venkovní, řada běžných kancelářských zařízení může být výrazným zdrojem částic, jako například laserové tiskárny a kopírky. V rodinném prostředí je pak cenou za romantickou atmosféru zvýšená koncentrace celého spektra částic, většinou karcinogenních sazí, uvolňovaných z hořících svíček [4].

V případě přirozeného větrání dochází s přísunem čerstvého vzduchu ke kontaminaci vnitřního prostředí, zvláště v městských aglomeracích. Kromě znečištění z výroby je výrazným zdrojem tuhých aerosolů doprava, a to nejen osobní a nákladní, ale také hromadná. Výraznými zdroji jsou spalovací motory a to i CNG systémy (stlačený zemní plyn), u nichž dochází k uvolňování nanočástic, stejně tak i kola a pneumatiky. Dopravní pros-

tředky jsou také výraznými zdroji víření jednou již usazených částic. Samotní cestující a řidiči však nejsou zvýšených koncentrací částic uchráněni [5], jak dokazují četné studie, mezi jinými i studie CDV, jež ukazuje výrazné expozice cestujících v hromadné dopravě [6].

Lidský organismus je tak soustavně vystaven pevným částicím, jež vdechuje a část z nich se usazuje v dýchacích cestách. Počítačovým modelováním, stejně tak i měřením usazování částic se zabývá celá řada pracovišť včetně pracoviště autorů článku. Nejčastěji jsou částice uvažovány jako kulové, inertní, přibývá však studií chování vláknitých nekulových částic a v posledních letech i nanočástic. Ty vznikají totiž nejen při procesech, jež běžně používáme, ale jsou také uvolňovány z materiálů, nátěrů a povrchů, jejichž „boom“ teď právě přichází. I ve vědeckých kruzích dnes panuje otázka, zda se nejedná jen o další pandorinu skříňku, jako v případě hromadného využívání azbestu v druhé polovině 20. století. Abychom dokázali odpovědět na tuto otázku, je třeba pochopit a popsat jak se které částice dostávají do lidského organismu a následně jaké škody mohou napáchat.

TEORIE

Pro modelování pohybu a depozice částic prostřednictvím CFD lze využít dva přístupy, a to Euler-Lagrangeův a Euler-Eulerův. Lagrangeovský pohled na částice je diskrétní, sleduje jednotlivé částice, jejichž pohybová rovnice je přímo integrována. Zatímco u Lagrangeovského přístupu jsou síly na částice vyjádřeny přímo, u druhého přístupu je nutno tyto síly vyjádřit vhodným modelem [7]. Fyzikální síly působící na částice, které je třeba vzít v potaz při modelování depozice, se různí v závislosti na uvažované velikosti částic a také na jejich pozici v dýchacím traktu. Zatímco na vstupu je proud vzduchu turbulentní a je tedy třeba počítat s turbulentní disperzí částic, v asi 8. generaci při maximálním dechovém režimu klesne Reynoldsovo číslo pod 2000 [8] a proudění přechází do laminárního režimu. Při normálním dechovém režimu (cca 15 l/min) dosahuje proud nízkých Reynoldsových čísel již ve 2. generaci. Od desáté generace také začíná být

depozice výrazněji ovlivněna gravitačními silami. V tomto režimu proudění pro částice velikosti $1\ \mu\text{m}$ a menší začínají hrát výraznou roli, také síly van der Waalsovy [9], které mohou být i několikanásobně větší než síly gravitační, v závislosti na Knudsenově čísle. Je zřejmé, že dále v dýchacím stromu, kde průměr kanálů dosahuje několika desetin milimetru, tyto síly hrají výraznou roli. Je velmi obtížné všechny tyto režimy zapojit do jednoho výpočtu a také většina pracovišť pracuje, buď s horními cestami dýchacími (ústá trachea a první, 2. až 3. generace větvení), nebo s dolními cestami (trachea a prvních 6 až 9 generací), nebo s alveolárními kanály (o průměru desetin milimetru), čímž se vyhýbají problémům s vhodnými modely turbulence a dostupným výkonem pro výpočet a zpracování výsledků. Pro částice nekulové je potom situace ještě složitější. Zatímco v turbulentním proudu fluktuace výrazně ovlivňuje orientaci částic a také jejich celkovou unášivou sílu, vlivem laminarizace se jejich pozice stabilizuje a mohou tak proniknout hlouběji do plicních kanálů, kde je již depozice konečná a nelze částice fyziologicky odstranit. Proto jsou vláknité částice nebezpečnější než částice kulové. Výsledky, které jsou v tomto článku prezentovány, pocházejí z výpočtů na reálné geometrii z CT-scanu živého člověka a obsahují až 9 generací dělení. Depozice byla počítána s použitím Lagrange-Eulera přístupu s uvažováním turbulentní disperze a gravitačního působení na částice a s použitím k- ω modelu turbulence.

GEOMETRIE MODELU DÝCHACÍCH CEST

Na geometrii dýchacích cest a celého tracheobronchiálního stromu je možno nahlížet podle zjednodušených modelů, které samotnou geometrii idealizují, ať už jde o symetrický model Weibelův [10], anebo o asymetrický model Horsfieldův [11], jejichž zjednodušení je založeno na statistice morfologických měření. Tyto modely poskytují jednotnou geometrii a usnadňují porovnání dat. Druhou možností je využít geometrie získané buď naskenováním odlitku plicních kanálů, nebo z CT-scanu na živém člověku, přičemž tento postup je využíván na pracovišti autorů. Jak bude ukázáno dále, jednotlivé morfologické odchylky často ovlivňují proudové pole a depozici částic. Tyto anomálie jsou však jedinečné pro danou geometrii, stejně jako každý člověk, coby nositel této geometrie.

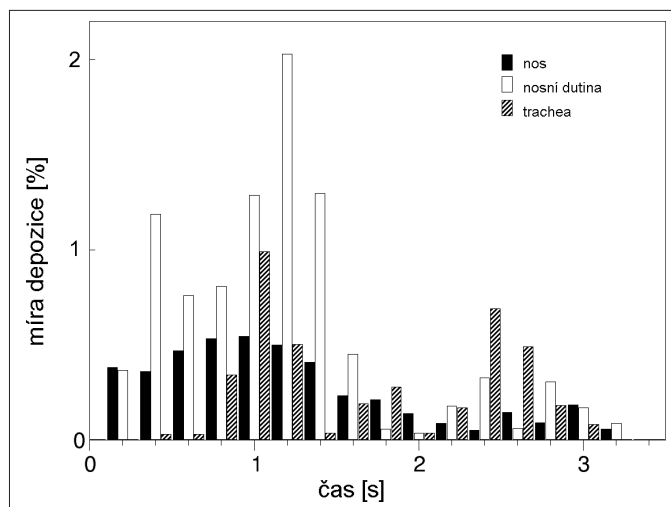
MECHANISMUS DEPOZICE

Částice vnikají do dýchacího traktu nosní nebo ústní dutinou a postupují dále prostorem hltanu, hrtanu do průdušnice (viz obr. 1).



Obr. 1 Trasy částic v horních cestách dýchacích při nádechu (ustálené proudění)

Jak při klidovém dechu, tak při zatížení je režim vstupujícího vzduchu turbulentní. V nosní dutině je vzduch navíc veden složitou soustavou nosních skořep (conchae), které vytvářejí integrální víry, díky nimž dochází k depozici na stěnách. Tato depozice, jak ukazují naše výpočty, je výrazná jak při nádechu, tak při výdechu. Je tedy důležité, aby model depozice v nosní dutině nebyl geometricky příliš zjednodušován, stejně tak je třeba depozici počítat jako neustálené proudění, neboť tak dochází k výraznému podhodnocení depozice [12]. Graf v obr. 2 ukazuje frakce depozice během jednoho dechového cyklu, vypočteného pro klidový režim s uvažováním kulových částic o velikosti $10\ \mu\text{m}$. Během výde-

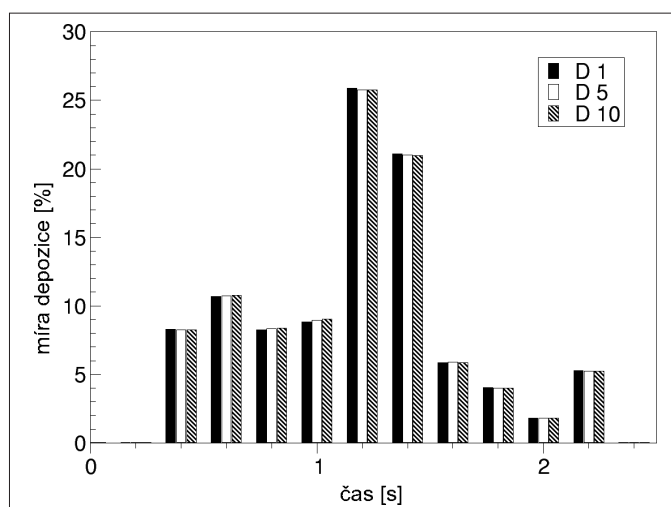


Obr. 2 Depozice částic velikosti $1\ \mu\text{m}$ v nosní dutině

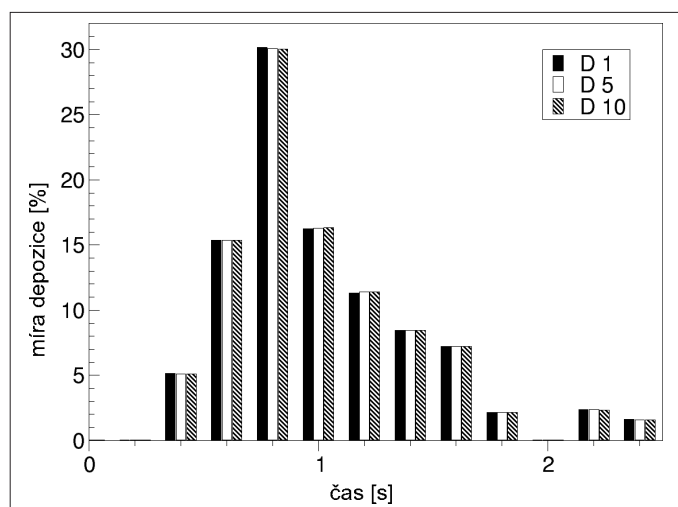
chu je usazeno 20 % částic (pro menší částice je toto procento větší), neboť jsou během celého nádechu zachyceny ve vírech uvnitř nosní dutiny. Během dýchání ústy k takovým efektům nedochází a depozice není tak vysoká.

Pro tracheobronchiální strom platí stejný závěr, jako pro depozici v nosní a ústní dutině. Navíc ustálený výpočet depozice podhodnocuje usazování částic v porovnání s výpočtem celého dýchacího cyklu. Depozice během výpočtu celého dýchacího cyklu v trachei a následujících větveních však probíhá takřka výhradně během nádechu. Při výdechu tvoří depozice pouze několik procent celkové depozice v dané generaci při klidovém režimu dýchání (obr. 3 až 5). Na těchto grafech je zobrazena poměrná depozice pro jednotlivé velikosti částic $1\ \mu\text{m}$, $5\ \mu\text{m}$ a $10\ \mu\text{m}$ v 1. až 3. generaci tracheobronchiálního stromu v čase. Pro klidový režim je perioda dechového cyklu 2 s a lze tedy vidět, že v porovnání s depozicí v nosní dutině (obr. 2) je depozice během výdechu zanedbatelná a klesá s postupujícími generacemi větvení kanálů. Jeden z možných důvodů je souvislost depozice s Womersleyho číslem, jež udává vztah tlakového a rychlostního profilu v kanále. Tuto hypotézu však bude třeba ověřit dalšími výpočty při různých režimech proudění. Depozice při nádechu je také ovlivněna tím, že proud vzduchu a částic, který prochází zakončeními jednotlivých kanálů, se při výdechu nevrací zpět.

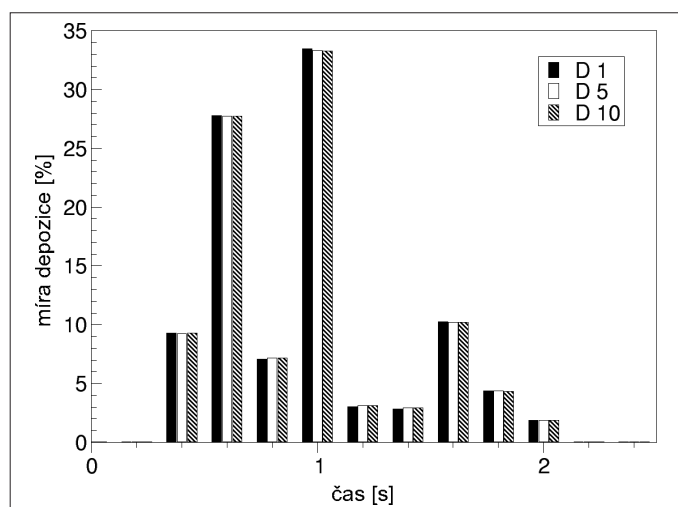
Přesto, jak dokládá porovnání depozice v obr. 6 při ustáleném výpočtu (označeném steady) a neustáleném výpočtu dechového cyklu (označeném tran), je depozice při ustáleném výpočtu podhodnocena.



Obr. 3 Depozice v 1. gen. tracheobronchiálního stromu



Obr. 4 Depozice v 2. gen. tracheobronchiálního stromu



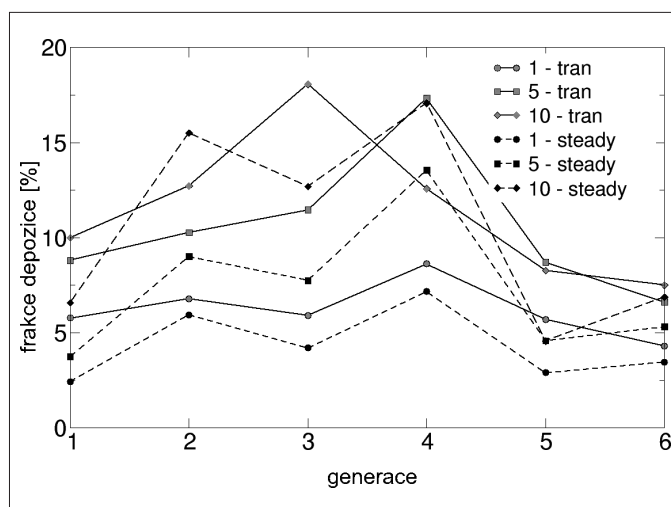
Obr. 5 Depozice v 3. gen. tracheobronchiálního stromu

Významným parametrem, kterým se odlišuje proudění a depozice v konkrétní geometrii od modelu Weibelova, je asymetrie, která může vést k výrazným výkyvům v depozici v jednotlivých generacích na pravé a levé straně. Tyto rozdíly mohou být, jako v našem případě, umocněny morfologickými anomáliemi, jako je vyhnutí trachei, viditelné v obr. 7, kde je znázorněna geometrie modelu použitého pro výpočty zde prezentované. Tyto lokální odchylky od hladkého průřezu lokálně ovlivňují proudění a tím i depozici, zvláště pro částice s nízkým Stokesovým číslem. Zatímco klasické vyhodnocení frakce depozice v jednotlivých generacích předpokládá rovnoměrnou depozici v celé uvažované geometrii, lokální anomálie geometrie způsobují nerovnoměrnost v depozici. Tu lze vyjádřit faktorem zvýšení depozice DEF (deposition enhancement factor), definovaného jako:

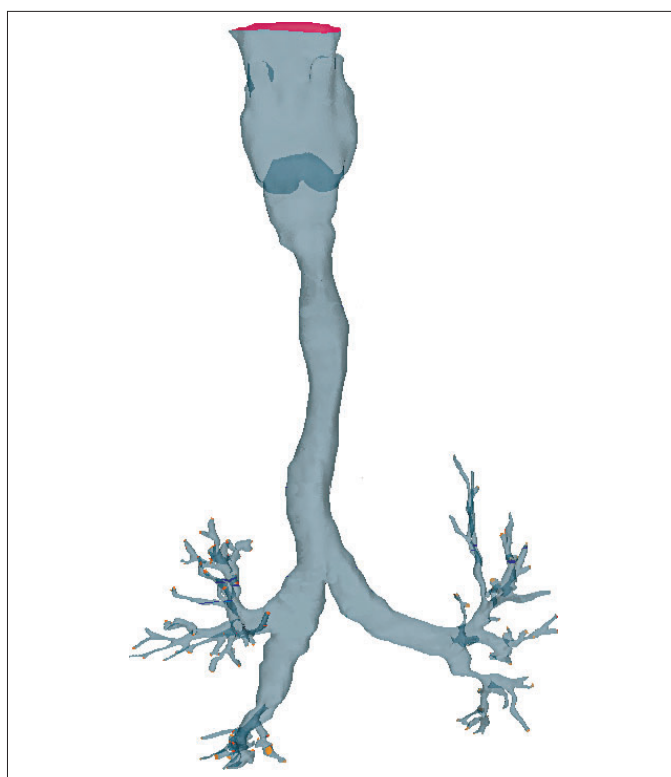
$$DEF = \frac{DF_i / A_i}{\sum_{i=1}^n DF_i / \sum_{i=1}^n A_i} \quad (1)$$

kde A je plocha buňky, na kterou částice dopadla, a DF je frakce depozice, definovaná jako poměr

částic usazených v dané generaci ku počtu částic vstupujících do modelu. Na obrázku 8 je potom znázorněné právě skalární pole parametru DEF v pravé části tracheobronchiálního stromu u páté generace větvení. Na tomto rozložení skalárního pole je vidět výrazná nerovnoměrnost a závislost depozice na lokálních geometrických strukturách.



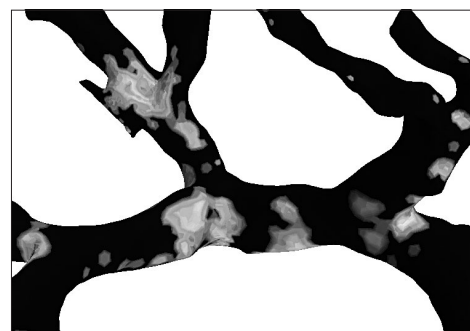
Obr. 6 Porovnání ustáleného a neustáleného výpočtu depozice v tracheobronchiálním stromu



Obr. 7 Model tracheobronchiálního stromu

ZÁVĚR

Modelování depozice tuhého aerosolu je důležitým nástrojem, který může nejen pomoci s vývojem a výzkumem technického zabezpečení budov, ale také pomáhat v porozumění mechanismu depozice částic v dýchacím traktu a tím také vlivu na lidské zdraví. Z výpočtů vyplývá, že jsou důležité výpočty v neustáleném režimu s uvažováním celého dýchacího cyklu, nebo alespoň nádechu. Je také



Obr. 8 Skalární pole DEF pro částice PM10 v páté generaci větvení – inverzní škála – světlá barva ukazuje vysoké hodnoty

důležité věnovat se reálným geometriím a výsledky lokální depozice porovnávat s měřeními i detailněji než na základě globálních charakteristik depozice. Na pracovišti autorů v současnosti probíhají měření depozice, jež budou porovnávána s výpočty v rámci navazujících projektů.

Kontakt na autory: forman@fme.vutbr.cz, jicha@fme.vutbr.cz

Poděkování: Článek vznikl s podporou projektů MŠMT OC166 a OC 09008 programu COST, Action P20.

Použité zdroje:

- [1] Gillespie-Bennet, J. Improving indoor air in New Zealand homes: The respiratory health effects of nitrogen dioxide exposures. In: Proc. of the 11th Int. Conference on Indoor Air Quality and Climate, Copenhagen, Denmark, 2008. ISBN 978-87-7877-270-1
- [2] Roulet, C.A. and Foradini, F. European audit project to optimise indoor air quality and energy consumption in office buildings. Tech. report LESO-PB-REPORT-2008-015, 1994
- [3] Alshittawi, M. et al. A study of PM10 concentration under different ventilation systems in a classroom. In: Proc. of the 11th Int. Conference on Indoor Air Quality and Climate, Copenhagen, Denmark, 2008
- [4] Pagels, J. et al. Indoor sources of fine and ultrafine particles – Detailed particle characterisation in an indoor chamber setting. In: Proc. of the 11th Int. Conference on Indoor Air Quality and Climate, Copenhagen, Denmark, 2008. ISBN 978-87-7877-270-1
- [5] Huzlík, J. et al. Pevné částice ve vnitřním prostředí automobilu. Závěrečná zpráva z projektu 1P05OC026, [online], 2008, [cit. 2010-05-1]. Dostupné na URL: <http://szp.cdv.cz/show.php?file=uvod>
- [6] Libčinský, R. et al. Expozice cestujících MHD pevnými částicemi. Závěrečná zpráva z projektu OC181-633, [online], 2008, [cit. 2010-05-1]. Dostupné na URL: <http://szp.cdv.cz/show.php?file=uvod>
- [7] C., M., Y. Multiphase Flows with Droplets and Particles, London: CRC Press, 1997, 471s., ISBN 0-8493-9469-4
- [8] Forman, M., Jicha, M., Katolický J. Aerosol deposition in human airways during breathing cycle, Applied and Computational Mechanics, 2007, roč.1, č. 2 s. 437-444. ISSN 1802-680X
- [9] Hamaker, H. C. The London-van der Waals attraction between spherical particles, Physica IV., 1937, č.10, s. 1058-1072
- [10] Weibel, E., R. Morphology of the Human Lung. Berlin: Springer-Verlag, 1963
- [11] Horsfield, K. et al. Models of the human bronchial tree, J. Appl. Physiol., 1971, č. 31, s. 207-217
- [12] Forman, M., Jicha, M., Katolický, J. Aerosol deposition in oral/nasal cavity during breathing cycle. In: Proceedings of Experimental Fluid Mechanics 2007, Liberec, 2007, 17-22. ISBN 978-80-7372-273-9

* Sprchové hlavice semeništěm nebezpečných bakterií

Mikrobiolog profesor Norman R. Pace s týmem z coloradské univerzity v Boulderu zjistil, že sprchové hlavice z domácností, škol, veřejných budov a nemocnic z 5 amerických států, mají na vnitřním povrchu plastových růžic šedý až černý povlak a sliz z vodního kamene a biofilmu s mikroorganismy. V něm nalezl bakterie *Mycobacterium avium* a netuberkulózní mykobakterie.

Lidé s normálním a zdravým imunitním systémem by se toho neměli bát, avšak ti s potlačenou imunitou, nemocní cystickou fibrózou, nemocní AIDS, v onkologické terapii a lidé s nedávnou transplantací orgánů mohou být bakteriemi ohroženi.

Výzkumníci také odebrali vzorky vody, aby zjistili pozadí organismů ve vodě. Vzorky vody pocházely z městských vodáren New Yorku, Chicaga nebo Denveru a dalších, a ze studní venkovských domů, kde našli jiné bakterie, nikoliv však *M. avium*. Její výskyt byl v hlaviciích zjištěn, a to asi 100x častěji a častěji než ve vodě z vodovodů před sprchou s asi 10 mil. organismů v 1 m³ vody. Mykobakterie se běžně vyskytují v životním prostředí na celém světě a mohou být původcem onemocnění.

Uvádí se, že v USA onemocní ročně 2 lidé ze sta tisíc infikovaných. Symptomy respiračních nemocí, vyvolaných *M. avium*, zahrnují únavu, slabost, vytrvalý a suchý kašel, krátkost dechu a obecné „cítím se špatně“ jako pocit vyčerpání, trvající i měsíce.

Vyšší tendenci ke růstu bakterií mají hlavice s tvarově komplikovaným vnitřním povrchem, s mrtvými místy a spárami, které se obtížně čistí mechanicky i chemicky. Podobně jako léta staré a nikdy nečištěné hlavice. Ukázalo se, že náchylnost k tvorbě biofilmů s bakteriemi je u plastových hlavíc, obvykle z ABS, POM a PBT plastů, vyšší než u celokovových hlavíc z nerezavějící oceli či mosazi upravené např. chromováním a niklováním. Potlačí se plasty s přísadou částic mikrocidů, které brání vzniku biofilmů a růstu bakterií. Zásadní význam ale má časté a pravidelné čištění sprch, stěn, keramických obkladů a PVC závěsů vodou se smáčecími a desinfekčními prostředky.

Na závěr si však profesor Pace položil otázku: „Je tedy sprchování nebezpečné?“. Odpověď zněla: „Není, pokud imunitní systém není nějakým způsobem oslaben, avšak riziko tu je!“.

Tisková zpráva University of Colorado at Boulder, Boulder, 14. 9. 2009 (AB)

* Ozón jako náhrada chloru

Rozhodnutí EU do budoucna nahradit chlór jinými čistícími prostředky, vede k vývoji nových postupů v desinfekci vzduchu a povrchů.

Jeden z nich je založen na použití ozónu. Národní rybářský ústav Dánské technické university (DTU) v Charlottenlundu, ve spolupráci s Jimco A/S, Oxytec AG v Curychu a jednou údržbou lososů, vypracoval v letech 2006 až 2009 studii o postupu desinfekce vzduchu a povrchů materiálu bez použití chlóru. Studie měla potvrdit, jak účinné ozón a UV-C záření ničí škodlivé zárodky, se zřetelem na použití v potravinářství.

Výsledky potvrdily, že zaplavení proudem ozónu patří k nejúčinnějším způsobům desinfekce. Spolu s mechanickým čištěním bez použití chemických prostředků se dosahuje zničení 99,9 % bakterií listérie. Doba působení činila 3 až 4 hodiny. Ozón ve srovnání s chlórem dosahuje lepší účinnosti zejména v obtížně přístupných místech, jako kabelové lávky, kouty, hrany a lamely odparníků.

Ukázalo se, že dimenzování zařízení pro desinfekci ozónem závisí v podstatě na velikosti prostoru a na druhu zárodků. Rozhoduje nikoliv dávka UV-c záření, ale koncentrace ozónu a doba působení. To znamená, že v aplikacích na plochách kontaminovaných listériemi a salmonelami mohou být použita UV-c zařízení, která ozón též vytváří. Tím, že ozón dráždí kůži a sliznice, je nutno zamezit přístupu osob do prostoru během čištění a uplatnit předpisy pro styk s chemikáliemi. Prostor je opět přístupný asi 20 minut po skončení desinfekce, neboť ozón se rychle rozpadá na kyslík.

Mimo výrobu je možno použít ozónu i k desinfekci hygienických prostorů, nábytku, lavic a obuvi. Nabízí se k tomu kombinované zdroje dvou UV-c lamp, z nichž jedna pracuje s vlnovou délkou 253,7 nm a nevytváří ozón a druhá se zářením 185 nm, která ozón vytváří a používá se v době, kdy je výroba mimo provoz. Provoz je bezpečný, neboť při něm nevznikají škodlivé látky jako oxidy dusíku, zatímco organické látky se rozkládají na CO₂ a vodu.

Ozónová desinfekce je vhodná pro veřejné budovy, veřejné toalety, kuřácké prostory a také např. pro domovy seniorů. Stupeň desinfekce a odstranění pachů představuje 99 %.

Pramen: CCI 01/2010 (AB)