

PREHĽAD INDEXOV TEPELNO – VLHKOSTNEJ MIKROKLÍMY VNÚTORNÉHO PROSTREDIA

AN OVERVIEW OF INTERNAL ENVIRONMENT THERMAL INDICES

Hana SOKOLOVÁ – Ružena KRÁLIKOVÁ

ABSTRAKT

Spoľahlivé ohodnotenie tepelno-vlhkostnej mikroklímy by malo brať do úvahy všetkých šesť základných faktorov ovplyvňujúcich tepelnú pohodu, t.j. teplotu vzduchu, teplotu sálania, relatívnu vlhkosť vzduchu, rýchlosť prúdenia vzduchu, tepelno-fyzikálne vlastnosti odevu a hodnotu metabolizmu. Potreba rýchleho ohodnotenia tepelno-vlhkostnej mikroklímy založená na zopár meraniach a výpočtoch viedla a naďalej vedie k vývoji indexov (kritérií tepelného komfortu) pre meranie tepelného komfortu. V súčasnosti existuje niekoľko indexov tepelného komfortu pre hodnotenie rôznych tepelno-vlhkostných prostredí.

Kľúčové slová: index, tepelné prostredie, normy tepelno-vlhkostného prostredia.

ABSTRACT

A reliable assessment of the thermal environment should take into account each of the six basic parameters affecting the thermal sensation (air temperature, radiant temperature, relative humidity, air velocity, thermo-physical properties of clothing and metabolic rate). The need of a quick evaluation based on few measurements and calculations has led to development of thermal indices (thermal comfort criteria) for thermal comfort measurements. There are many thermal indices of internal environment in the present used for different thermal environments assessment.

Key words: index, thermal environment, thermal environment standards.

ÚVOD

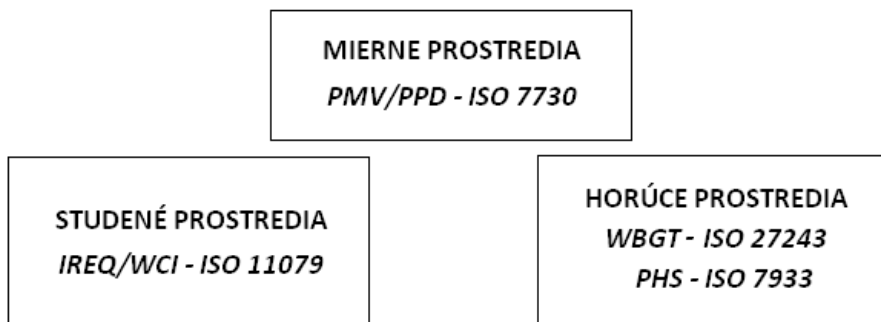
Jednou z možností ohodnotenia tepelno-vlhkostného prostredia je použitie indexov tepelného komfortu. Index kombinuje dva alebo viac parametrov tepelno-vlhkostnej mikroklímy do jednej premennej, čím zjednodušuje popis tepelného prostredia a stres ktorý tým vzniká [1].

ROZDELENIE INDEXOV

Indexy môžu byť rozdelené podľa viacerých kritérií, napr. na [2, 3]:

1. analytické indexy - založené na teoretických konceptoch,
2. empirické indexy - založené na meraniach na objektoch alebo na zjednodušených vzťahoch ktoré nenasledujú nevyhnutne teóriu.

Indexy môžu byť delené aj podľa toho, pre hodnotenie ktorého druhu tepelno-vlhkostného prostredia sú určené (mierne, horúce, studené prostredie). Na tomto princípe riešila túto problematiku organizácia ISO, ktorá vytvorila niekoľko významných noriem, zaoberajúcich sa každou vyššie uvedenou kategóriou tepelno-vlhkostného prostredia pomocou indexov (viď obr. 1) [4].



Obr. 1 - Normy pre hodnotenie tepelno-vlhkostnej mikroklimy podľa používaných indexov [4].

Najznámejšie indexy pre posudzovanie tepelno-vlhkostnej mikroklimy sú [3]:

- *ET** - Nová efektívna teplota/*SET* – Štandardná efektívna teplota
- *P4SR index*
- *HSI index*
- *PMV index*
- *WBGT index*

ET*

*ET** (effective temperature) – novú efektívnu teplotu definoval *Gagge a kol.* v roku 1971 vzťahom (1) [1]:

$$ET^* = t_o + w \cdot i_m \cdot LR \cdot (p_a - 0,5 p_{ET^*S}) \quad (1)$$

Kde:

- t_o [°C] - operatívna teplota
- w [-] - vlhkosť kože
- i_m [-] - celková účinnosť prenikania pár
- LR [K/kPa] - Lewisov pomer
- p_a [kPa] - tlak okolitého vzduchu
- p_{ET^*S} [kPa] - tlak nasýtených vodných pár pri *ET**.

Nová efektívna teplota je teplota prostredia pri 50 % relatívnej vlhkosti vyvolávajúca rovnaké celkové tepelné straty z kože ako v skutočnom prostredí. Patrí medzi analytické indexy [2]. Používa sa k hodnoteniu mierneho aj horúceho prostredia [5].

Tento index má široký rozsah použitia - kombinuje účinok teploty vzduchu, tlaku vzduchu a strednej teploty sálania. Závisí na odevu a činnosti osôb [1].

SET

V roku 1973 *Gagge a kolektív* predstavil tzv. *štandardnú efektívnu teplotu SET* (Standard Effective Temperature) ako podmnožinu novej efektívnej teploty. *SET* patrí medzi analytické indexy a poskytuje racionálny základ pre meranie ekvivalencie hociktorej kombinácie faktorov prostredia, oblečenia a hodnoty metabolizmu [2, 5].

P4SR

Index *P4SR* (Predicted Four-hour Sweat Rate) - *predpovedané množstvo potenia za 4 hodiny* predstavuje predpokladané množstvo potu vylúčené za štyri hodiny. Patrí medzi analytické indexy. Je pravdepodobne najspoľahlivejším indexom pre podmienky s vysokými teplotami. Nie je vhodný do prostredia s teplotou pod 28 °C. Stanoví sa odčítaním z nomogramu [2].

Tento index bol vyvinutý *McArdelom a kolektívom* v roku 1947 vo Veľkej Británii. Používa sa pre určenie fyzického stresu hodnotou potenia, srdcovej frekvencie alebo vnútornej teploty človeka v horúcom prostredí [5].

HSI

HSI (Heat Stress Index) – *index tepelného stresu* bol navrhnutý *Beldingom a Hatchom* v roku 1955, a je definovaný ako pomer množstva tepla ktoré by malo byť odvedené z ľudského organizmu odparovaním potu (evaporáciou) k množstvu tepla ktoré sa dá v danom prostredí maximálne odvieť vylúčeného celým povrchom tela, vynásobený 100, (viď vzťah 2) [6].

Patrí medzi analytické indexy [2].

$$HSI = (E_{reqd} / E_{max}) \cdot 100 \quad (2)$$

Kde:

E_{reqd} - množstvo tepla ktoré by malo byť odvedené z ľudského organizmu odparovaním potu [W/m²].

E_{max} - množstvo tepla ktoré sa dá v danom prostredí maximálne odvieť vylúčením celým povrchom tela [W/m²].

V prípade že $HSI > 100$, nastáva zohrievanie tela, ak $HSI < 0$, nastáva ochladzovanie tela [6]. Fyziologické faktory spojené s hodnotami *HSI* opisuje [1].

Tento index je vhodný pre použitie v prostrediach s teplotou 27 - 35 °C pri kludnom vzduchu, 30 – 80 % relatívnej vlhkosti a pre vyššie teploty pri nižších vlhkostiach [2].

PMV

PMV index (Predicted Mean Vote) – *index predpokladaného stredného tepelného pocitu* je najpoužívanejším analytickým indexom tepelného komfortu ktorý špecifikoval v roku 1970 *Povl Ole Fanger*. Je obsiahnutý a bližšie špecifikovaný v norme ISO 7730:2005) a používa sa pre hodnotenie miernych prostredí [7]. Vyjadruje tepelný stav konkrétneho prostredia, a predpovedá priemernú hodnotu tepelných pocitov veľkej skupiny osôb pri rovnakých tepelných podmienkach nachádzajúcich sa v tej istej miestnosti. *PMV* môže byť vypočítaný z teploty vzduchu, strednej teploty sálania, rýchlosti prúdenia vzduchu, vlhkosti, energetického výdaja, a tepelného odporu odevu pomocou rovníc (3, 4, 5, 6) [3]:

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,028) \cdot (M - W + k_1 + k_2 + k_3) \quad (3)$$

Kde:

$$k_1 = -3,05 \cdot 10^3 \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] \quad (4)$$

$$k_2 = -1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a)$$

(5)

$$k_3 = -0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{r,m} + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \quad (6)$$

Kde:

M [W/m²] - energetický výdaj povrchu ľudského tela

W [W/m²] - užitočný mechanický výkon, t.j. vnútorná práca

R_{cl} [m².K/W] - tepelný odpor odevu

f_{cl} [-] - povrchový faktor odevu

t_a [°C] - teplota vzduchu

$t_{r,m}$ [°C] - stredná teplota sálania

v_{ar} [m/s] - relatívna rýchlosť prúdenia vzduchu voči ľudskému telu

p_a [Pa] - parciálny tlak vodných pár

h_c [W./m².K] - súčiniteľ prestupu tepla konvekciou

t_{cl} [°C] - teplota povrchu oblečenia

Predpokladaná priemerná voľba (výsledný stredný tepelný pocit) je hodnotená ASHRAE thermal sensation scale - *sedembodovou stupnicou tepelných pocitov*, vyvinutou pre štúdie faktorov ovplyvňujúcich tepelný komfort (viď tab. 1) [3].

Tab. 1 – ASHRAE stupnica tepelných pocitov [2, 3].

POCIT	Studený	chladný	Mierne chladný	Neutrálny	Mierne teplý	Teplý	Horúci
ASHRAE	-3	-2	-1	0	1	2	3

Podľa tejto stupnice sa tepelný komfort nachádza v oblasti medzi hodnotami -1 a 1 [8].

Fanger dal PMV do súvisu s nevyváženosťou medzi skutočným tokom tepla z tela v danom prostredí a tokom tepla potrebnom pre optimálny komfort pri zadanej činnosti rovnicou (7) [3]:

$$PMV = [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot L \quad (7)$$

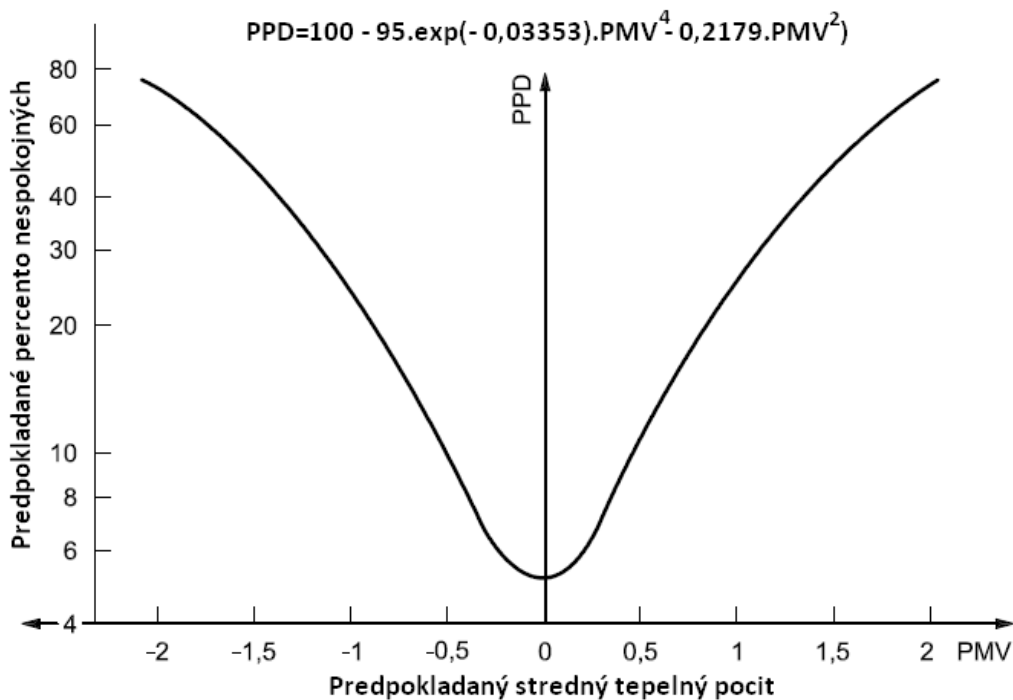
Kde L je tepelná záťaž na ľudskom tele a M je hodnota metabolizmu.

PPD

PPD index (Predicted Percentage of dissatisfied) – *predpokladané percento nespokojných* poskytuje informáciu o tepelnom diskomforte alebo nespokojnosti s tepelno-vlhkostnou mikroklimou tak, že stanovuje kvantitatívnu predpoveď percenta nespokojných z veľkej skupiny ľudí, ktorí sa pravdepodobne cítia príliš chladno alebo príliš teplo v danom prostredí (t.j. ich tepelný pocit by bol podľa ASHRAE stupnice ± 2 , resp. ± 3), keďže každý jednotlivec vníma tepelný pocit individuálne [5].

Ostatní z tejto veľkej skupiny sa bude cítiť tepelne neutrálne, mierne teplo alebo mierne chladno. Fanger dal PMV do súvislosti so subjektívnymi pocitmi človeka pre stanovenie percenta spokojnosti resp. nespokojnosti (PPD) ľudí s daným prostredím (viď obr. 2), (viď. vzťah 8) [3, 6].

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp \left[- \left(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2 \right) \right] \quad (8)$$



Obr. 2 - Grafické znázornenie vzťahu PMV a PPD [9].

Podľa tohto grafu za akceptovateľné môžeme považovať prostredie, s ktorým bude spokojných najmenej 80% užívateľov, t.j. nespokojných bude 20% [6].

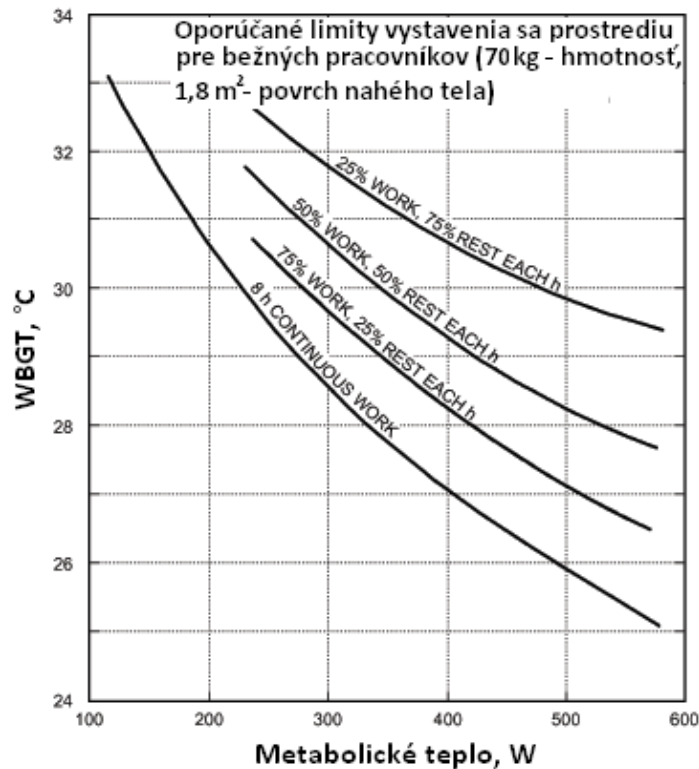
WBGT

WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) – *teplota vlhkého a guľového teplomeru* je najčastejšie používaným empirickým indexom pre hodnotenie potenciálu horúceho stresu (indexom horúceho stresu prostredia) a bol špeciálne vyvinutý pre priemyselné prostredie [10]. Slúži pre približné ohodnotenie extrémne horúcich prostredí a charakterizuje záťaž zamestnancov sálavým teplom [4]. Bol vyvinutý *Yaglou a Minardom* v roku 1957 v USA, a je obsiahnutý v ISO EN 27243 [5].

WBGT kombinuje účinok teploty suchého teplomeru t_a , prirodzene vetraného (nie nútene aspirovaného) vlhkého teplomeru t_{nv} , a teploty čierneho guľového teplomeru t_g podľa vzťahu (9). Táto forma rovnice sa zvyčajne používa tam, kde je prítomné slnečné sálanie. V uzavretých priestoroch je rovnica (9) zjednodušená odstránením t_a , a použitím koeficientu 0,3 pre t_g [10].

$$WBGT = 0,7t_{nv} + 0,2t_g + 0,1t_a \quad (9)$$

Obrázok 3 zahŕňa prípustné limity pri vystavení horúcemu prostrediu, vyjadrené ako pracovný čas za hodinu, pre zdravého aklimatizovaného jedinca, pre rôzne hodnoty WBGT [11].



Obr. 3 - Odporúčané limity stresu z tepla pre aklimatizovaných pracovníkov [11].

Pre hlbšiu analýzu extrémne horúceho prostredia sa doporučuje použiť index PHS (Predicted Heat Strain) – *index tepelného strainu*, ktorý bol vyvinutý počas projektu zameraného na hodnotenie prechodných podmienok v horúcom pracovnom prostredí v roku 2004 [4].

Ďalšie indexy tepelno-vlhkostnej mikroklimy pre hodnotenie mierneho, horúceho aj studeného prostredia uvádzam rozdelené podľa prostredia v ktorom sa dajú použiť, v chronologickom poradí ich vzniku [4, 5]:

a) *Horúce prostredie:*

DI (Discomfort Index) – *index nekomfortu* (Tennenbaum a kol., 1959), **RSI** (Relative Strain Index) – *index relatívneho strainu* (Belding a Hatch, 1992), **THI** (Temperature Humidity Index) – *index teploty a vlhkosti*, (Thom, 1994), **PT** (Perceived Temperature) – *vnímateľná teplota* (Staiger a kol., Jendritzki a kol. 1997), **PSI** (Physiological Strain Index) – *index fyziologického strainu* (Moran a kol., 1998), **MDI** (Modified Discomfort Index) – *upravený index nekomfortu* (Moran a kol., 1999), **PET** (Physiological Equivalent Temperature) – *fyziologická ekvivalentná teplota* (1999), **VDI** (Verein Deutscher Ingenieure) – *Zväz nemeckých inžinierov* (Nemecko, 1999), **ESI** (Environmental Stress Index) – *index environmentálneho stresu* (Moran a kol., 2001), **WBDT** (Wet-bulb Dry Temperature) – *teplota vlhkého a suchého teplomeru* (Wallace a kol., 2005), **RHDT** (Relative Humidity Dry Temperature) – *teplota pri relatívnej vlhkosti* (Wallace a kol., 2005).

b) *Mierne prostredie:*

DI, HD, T_{eq}, RSI, THI, PT, PET, VDI

c) *Chladné prostredie:*

WCI (Wind-Chill Index – *index chladného vzduchu*, Siple a Passel 1945), **DI, T_{eq}, IREQ** (International Required Clothing Insulation and Clothing Effects – *medzinárodná požadovaná hodnota izolácie odevu*, ISO 11079, 1993), **THI, PT, PET, VDI**.

DISKUSIA

Jednou z najdôležitejších noriem tepelného komfortu v USA a celosvetovo, vytváranou a publikovanou v USA, je ASHRAE Standard 55, ktorá sa venuje problematike tepelno – vlhkostnej mikroklimy. Často spomínanou

normou v literatúre pre hodnotenie tepelného komfortu je aj ISO 7730. Obe tieto normy používajú PMV a PPD indexy, inak spolu označované ako tzv. statický model tepelného komfortu. Normy založené na statickom modeli pri aplikovaní do praxe však iba v minimálnej miere berú do úvahy vonkajšiu klímu, fyziologickú a psychologickú adaptáciu a sú limitované v ich praktickom použití.

PMV sa ukázal užitočný pre vyhodnotenie rovnovážnych (ustálených) tepelných prostredí, avšak skutočné tepelné prostredia nie sú vždy rovnovážne [7].

Viacero iných odborníkov poukázalo na nedostatky indexu PMV. Napr: *Williamson a kolektív* v roku 1995, *Karyono* v roku 1996, *Humphreys a Nicol* v roku 1996, *Kumar, Singh, a Sud* v roku 2010, *Anuj Kumar, I. P. Singh, S. K. Sud* v roku 2010 ktorí pripomienkujú, že PMV výrazne nadhodnocuje nekomfort z tepla t.j. tepelný pocit, pretože tepelné vnímanie ľudí nedosiahne rovnovážnu hodnotu pokiaľ nie sú vystavení rovnakým tepelným podmienkam po dlhšie časové obdobie [2].

Používanie PMV pre dynamické tepelné podmienky nie je správny prístup. Vo všeobecnosti používanie analytických indexov v reálnych podmienkach nie je správny prístup [7].

ZÁVER

Analýza tepelného komfortu ovplyvňuje vývoj stanovísk a noriem zaoberajúcich sa problematikou tepelno-vlhkostnej mikroklímy vnútorného prostredia budov. V súčasnosti už existujú adaptívne normy, (napr. norma ASHRAE Standard 55) založené na adaptívnom prístupe hodnotenia tepelno-vlhkostných podmienok v interiéri, ktorý zohľadňuje aj napr. vonkajšiu klímu, lokalitu atď. Celkovo adaptívny prístup je perspektívou vedúcou k zvýšeniu komfortu pracovníkov, citlivejšiemu algoritmu pre kontrolu tepelno-vlhkostnej mikroklímy a zníženiu spotreby energie v budovách.

♦♦ *Tento príspevok vznikol v rámci projektu KEGA 032 TUKE-4/2012.*

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- [1] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: ASHRAE Handbook-Fundamentals (SI Edition), 2009. 986 s. ISBN: 978-1-933742-55-7
- [2] AULICIEMS, Andris – SZOKOLAY, Steven V.: Thermal comfort. In: Passive and Low Energy Architecture International Design tools and techniques. Brisbane: The University of Queensland - Department of Architecture, 2007. 66 s. ISBN 0-86776-729-4
- [3] FANGER, P. O.: Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering. Kodaň: Danish Technical Press, 1970. 244 s. ISBN 8757103410
- [4] d'AMBROSIO ALFANO, Francesca Romana – PALELLA, Boris Igor - RICCIO Giuseppe: Thermal Environment Assessment Reliability Using Temperature-Humidity Indices. In: Industrial health, 2011, roč. 49, s. 95-106. ISSN:0019-8366
- [5] EPSTEIN, Yoram – MORAN, Daniel S.: Thermal comfort and the heat stress indices. In: Industrial Health, 2006, č. 3, roč. 44, s. 388-398. ISSN:0019-8366
- [6] JOKL, Miloslav - ŠENITKOVÁ, Ingrid: Interná mikroklíma budov. Košice : TUKE, 1993. 159 s. ISBN 80-7099-201-8
- [7] UGURSAL, Ahmet – CULP, Charles H.: An Empirical Thermal Comfort Model for Transient Metabolic Conditions. ASHRAE Transactions, 2012, roč. 118, č. 1, s. 742-750. ISSN 0001-2505.
- [8] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: ASHRAE, Fundamentals., 2001. s. 544, ISBN: 1883413885
- [9] KRÁLIKOVÁ, Ružena – ANDREJIOVÁ, Miriam: Stanovenie mikroklimatických parametrov v horúcom pracovnom prostredí. Hodnotenie kvality prostredia 2011, Ročník: II, Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta. Elfa, s.r.o., September 2011. ISSN 1338-3922.
- [10] STN EN 27243: 1998 Horúce prostredia. Stanovenie tepelnej záťaže pracovníka podľa ukazovateľa WBGT (teploty mokrého a guľového teplomeru).

- [11] Occupational exposure to hot environments: CDC GOV. [online]. Washington: CDC GOV, 1986. Aktualizované 17-12-2012 [cit 2012-10-10]. Dostupné na internete: <<http://www.cdc.gov/niosh/docs/86-113/86-113.pdf>>

ADRESA AUTOROV

Hana SOKOLOVÁ, Ing., Katedra environmentalistiky, Strojnícka fakulta, Technická univerzita v Košiciach, Park Komenského 5, 042 00 Košice, e-mail: hana.sokolova@tuke.sk

Ružena KRÁLIKOVÁ, Doc. Ing. PhD., Katedra environmentalistiky, Strojnícka fakulta, Technická univerzita v Košiciach, Park Komenského 5, 042 00 Košice, e-mail: ruzena.kralikova@tuke.sk.

RECENZENT

Vojtech KOLLÁR, prof. Ing., PhD., Katedra bezpečnostného manažmentu, Ústav verejnej správy, Vysoká škola ekonómie a manažmentu verejnej správy v Bratislave, Furdekova 16, 851 04 Bratislava 5, Slovenská republika