

doc. Ing. Vladimír ZMRHAL, Ph.D.  
 ČVUT v Praze, Fakulta strojní,  
 Ústav techniky prostředí

# Hygienické hodnocení škodlivin ve vnitřním ovzduší a návrh větrání

## Hygienic Assessment of Pollutants in Indoor Environment and Ventilation Designing

Recenzent  
 prof. Ing. František Drkal, CSc.

Základní úlohou větrání je stanovení průtoku větracího vzduchu pro odvod škodliviny (znečišťující látky, vlhkosti) z prostoru. Průtok venkovního vzduchu se stanoví tak, aby koncentrace škodliviny unikající do prostoru byla v pracovní oblasti menší nebo rovna než přípustná koncentrace. Článek prezentuje univerzální vztah pro výpočet průměrné koncentrace během definovaného časového intervalu s proměnnými podmínkami produkce škodlivin či větrání.

**Klíčová slova:** větrání, škodlivina, nejvyšší přípustná koncentrace, přípustný expoziční limit

The determination of the ventilating air flow rate concerning the pollutants exhaust (harmful substances, humidity) from the room space is the essential task of ventilation process. The outside air flow rate is determined so that the concentration of the pollutant escaping in the space is to be lower or equal to the permitted concentration in the working area. The author presents a general-purpose relationship with respect to the calculation of the average concentration during the defined time interval with variable conditions of the pollutants production or ventilation in his article.

**Key words:** ventilation, pollutant, the highest permitted concentration, admissible exposure limit

### ÚVOD

Mezní hodnoty znečištění vnitřního pracovního ovzduší udávají přípustné expoziční limity PEL a nejvyšší přípustné koncentrace NPK. Uvedené hodnoty jsou dány hygienickým předpisem [1], kde je uveden seznam chemických látek, který obsahuje přípustné expoziční limity a nejvyšší přípustné koncentrace a seznam prachů s přípustnými expozičními limity.

K uvolňování chemických látek, nebo prachu dochází zejména v průmyslu např. v hutích, sklárnách, tiskárnách, stavebním a chemickém průmyslu apod. V případě, že je známa produkce škodliviny (např. ze spotřeby materiálu za určitý časový úsek), eventuálně její časový vývin, je možné navrhnout větrací zařízení s ohledem na zmíněné přípustné hodnoty (NPK a PEL).

### BILANCE ŠKODLIVINY

Na základě bilance škodliviny ve větraném prostoru (viz např. [2]) lze zjistit průběh koncentrace podle rovnice (1). Výchozím stavem při výpočtu je stav bez zdrojů škodlivin (pro  $\tau = 0$  je  $C = C_0$ ). Koncentrace škodliviny se s časem mění, dokud nenastane rovnovážný stav. Koncentrace v čase  $\tau$  bude

$$C = C_0 e^{-\frac{V}{O}\tau} + \left( \frac{M_s}{V} + C_p \right) \left( 1 - e^{-\frac{V}{O}\tau} \right) \quad (1)$$

kde je

$M_s$  hmotnostní tok škodliviny [g/h],

$V$  průtok vzduchu [ $\text{m}^3/\text{h}$ ],

$C_p$  koncentrace škodliviny v přiváděném vzduchu [ $\text{g}/\text{m}^3$ ],

$C_0$  koncentrace škodliviny na začátku intervalu  $\tau = 0$  [ $\text{g}/\text{m}^3$ ],

$O$  objem místnosti [ $\text{m}^3$ ],

$\tau$  časový interval [h].

Jestliže je větrání trvalé ( $\tau \rightarrow \infty$ ) dostaneme vztah pro stanovení výsledné koncentrace

$$C = \frac{M_s}{V} + C_p \quad (2)$$

Úlohou je většinou stanovení průtoku vzduchu  $V$  pro požadované  $C$  v čase  $\tau$  (může se jednat o průtok venkovního vzduchu  $V_e$ , v případě použití vzduchu oběhového hledáme celkový průtok přiváděného vzduchu  $V_p$ ).

Ze vztahu (2), který byl odvozen pro  $\tau \rightarrow \infty$ ,  $M_s = \text{konst.}$  vyplývá

$$V = \frac{M_s}{C - C_p} \quad (3)$$

kam se při dimenzování průtoku větracího vzduchu  $V$  dosadí za koncentraci  $C$  koncentrace přípustného expozičního limitu PEL. Je zřejmé, že pro  $\tau < \infty$  bude průměrná koncentrace  $C_{prům}$  v každém intervalu  $\tau$  nižší, než hodnota PEL, což pro dimenzování větrání vyhovuje.

### HYGIENICKÉ HODNOCENÍ ŠKODLIVIN

V České republice jsou závazné limitní koncentrace škodlivin ve vnitřním ovzduší pracovišť dány nařízením vlády č. 93/2012 Sb. [1]. Toto nařízení obsahuje kategorizaci látkových škodlivin (plynů, par, prachu). Limitní koncentrace jsou definovány přípustným expozičním limitem PEL a nejvyšší přípustnou koncentrací NPK. Pro chemické látky jsou zde uvedeny přípustné expoziční limity PEL a nejvyšší přípustné koncentrace NPK. Prach se hodnotí na základě přípustného expozičního limitu PEL.

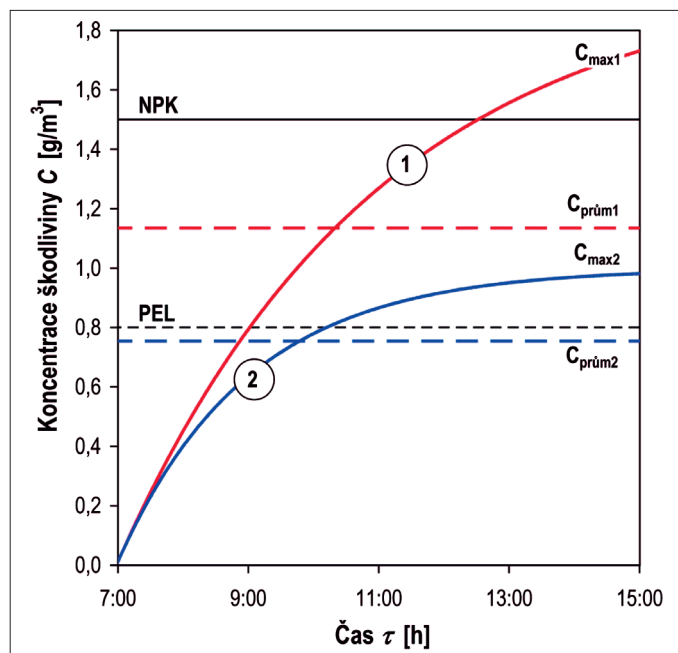
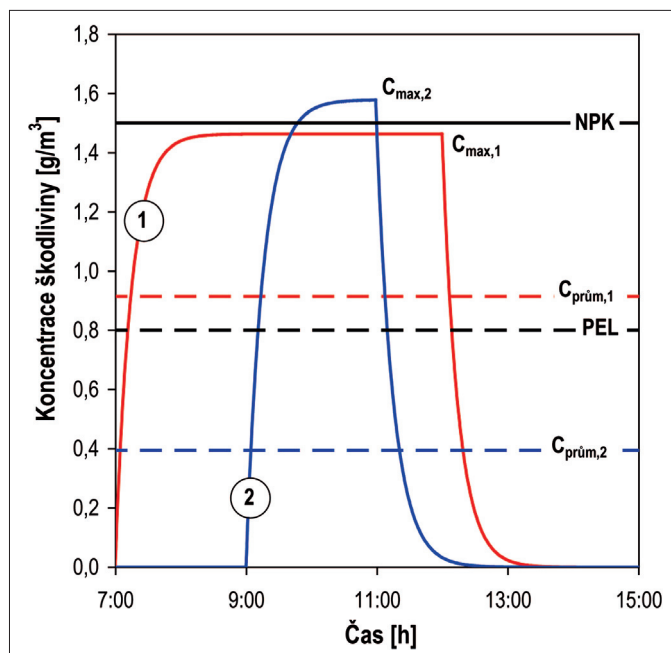
**Přípustný expoziční limit PEL** je celosměnový časově vážený průměr koncentrace plynů, par nebo aerosolů v pracovním ovzduší, jimž mohou být, podle současného stavu znalostí, vystaveni zaměstnanci při osmihodinové nebo kratší směně, aniž by u nich došlo i při celoživotní expozici k poškození zdraví, k ohrožení jejich pracovní schopnosti a výkonnosti.

**Nejvyšší přípustná koncentrace NPK-P** chemické látky v pracovním ovzduší je taková koncentrace chemické látky, které nesmí být zaměstnanec v žádném časovém úseku pracovní směny vystaven.

### Průměrná koncentrace

Průměrná koncentrace se často určuje zprůměrováním koncentrací vypočítaných v krátkých časových intervalech. Během definovaného časového intervalu (pracovní směny)  $\tau_p$  lze průměrnou koncentraci získat integrací rovnice (1) a vydělením intervalem  $\tau_p$

$$C_{prům} = \frac{1}{\tau_p} \int_0^{\tau_p} C d\tau \quad (4)$$


 Obr. 1 Průběh koncentrace při trvalém vývinu škodliviny vč. NPK a PEL ( $C_0 = 0$ )


Obr. 2 Průběh koncentrace při definovaném vývinu škodliviny během pracovní doby

odkud plyne

$$C_{prům} = \frac{1}{\tau_p} \frac{O}{V} \left( C_0 - \frac{M_s}{V} - C_p \right) \left( 1 - e^{-\tau_p \frac{V}{O}} \right) + \left( \frac{M_s}{V} + C_p \right) \quad (5)$$

Pro proměnné podmínky vývinu škodliviny (např. periodický vývin škodliviny apod.) v intervalech  $\tau_{p,i}$  lze vztah (5) zobecnit

$$C_{prům} = \frac{1}{\tau_{p,c}} \sum_{i=1}^n \left( \frac{O}{V_i} \left( C_{0,i} - \frac{M_{s,i}}{V_i} - C_p \right) \left( 1 - e^{-\tau_{p,i} \frac{V_i}{O}} \right) + \left( \frac{M_{s,i}}{V_i} + C_p \right) \tau_{p,i} \right) \quad (6)$$

kde  $C_{0,i}$  je koncentrace škodliviny na počátku sledovaného intervalu  $\tau_{p,i}$ , resp. na konci předchozího intervalu a stanoví se podle rovnice (1).

Součet časových intervalů v rovnici (6) je

$$\tau_{p,c} = \sum_{i=1}^n \tau_{p,i} = \text{směna} = 8 \text{ hodin} \quad (7)$$

kde  $n$  je počet časových úseků ve směně.

Průměrná koncentrace během osmihodinové směny by neměla přesáhnout přípustný expoziční limit

$$C_{prům,8} \leq PEL \quad (8)$$

## ILUSTRATIVNÍ PŘÍKLADY

Řešení větrání podle rovnice (3) s dosazením  $PEL$  za koncentraci  $C$  platí pro ustálený proces ( $\tau \rightarrow \infty$ ), kdy předpokládáme trvalý vývin škodliviny  $M_s = \text{konst.}$  a větrání. V mnoha případech však taková situace nemusí nastat. Následující analýzy vycházejí z předpokladu, že vstupními hodnotami do výpočtů jsou na sobě nezávislé (známé pro daný případ) hodnoty produkce škodliviny  $M_s$  a průtoku větracího vzduchu  $V$ .

### a) Trvalý vývin škodliviny během dne

Obr. 1 prezentuje případ, kdy na počátku pracovní doby se začne v prostoru vyvíjet škodlivina. Je zřejmé, že vývin škodliviny je poměrně pomalý a proces prakticky nedosáhne ustálení. Průběh koncentrace pro případ 1 představuje variantu s trvalým větráním intenzitou  $I_1$  ( $\text{h}^{-1}$ ), případ 2 odpovídá zvýšené intenzitě větrání  $I_2$  ( $\text{h}^{-1}$ ). Z prezentovaných závislostí je zřejmé, že v případě 1 je překročena  $NPK-P$  a průměrná koncentrace  $C_{prům1}$  výrazně převyšuje  $PEL$ . Případ 2 představuje variantu, kdy byl průtok vzduchu zvýšen na dvojnásobek. Maximální koncentrace  $C_{max2}$  i  $C_{prům2}$  již splňují oba hygienické požadavky  $PEL$  i  $NPK-P$ . V případě 2 jsou hygienická kritéria splněna i přes to, že se při návrhu nepostupovalo podle rovnice (3) s dosazením  $PEL$  za koncentraci  $C$  ( $C_{max2} > PEL$ ). Pokud by se tak postupovalo ( $C_{max2} = PEL$ ) průtok vzduchu bude vyšší, než v prezentovaném případě.

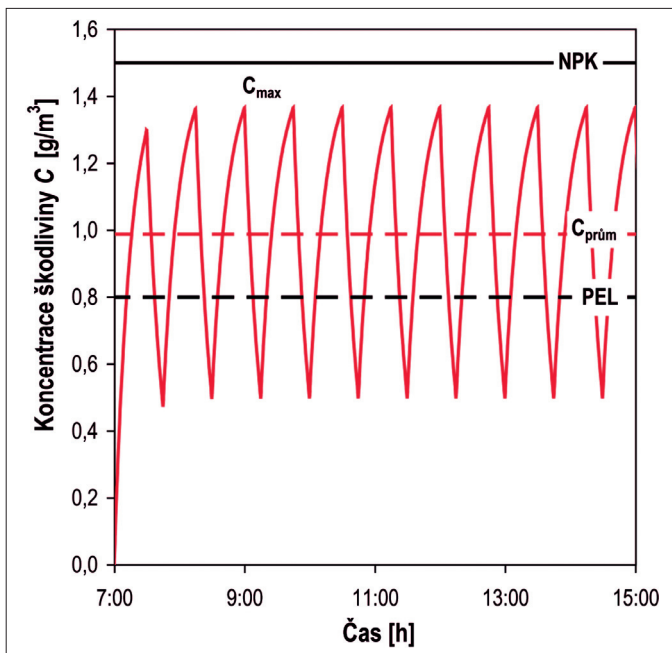
### b) Proměnný vývin škodliviny během dne

Na obr. 2 jsou znázorněny dva případy, kdy dochází k proměnnému vývinu škodliviny během dne. V obou případech je po celou pracovní dobu v provozu větrání  $V = \text{konst.}$

Případ 1 předpokládá v době od 7.00 do 12.00 hodin vývin škodliviny. Zbytek pracovní doby se již chemická látka neuvolňuje. Podmínka dodržení nejvyšší přípustné koncentrace  $NPK-P$  je v tomto případě splněna, ovšem průměrná koncentrace za směnu překračuje přípustný expoziční limit  $PEL$ . Případ 2 znázorňuje vývin škodliviny v době od 9.00 do 11.00 hodin. Z prezentovaného grafu je zřejmé, že tentokrát došlo k překročení nejvyšší přípustné koncentrace  $NPK-P$ . Oba ilustrativní případy jsou z hygienického hlediska nevyhovující a je potřeba upravit větrání, nebo dobu vývinu škodliviny. V podobných případech se jeví jako vhodné při návrhu větrání ověřit jak nejvyšší přípustnou koncentraci  $NPK-P$ , tak přípustný expoziční limit  $PEL$ .

### c) Periodický vývin škodliviny

Při periodickém vývinu škodliviny dochází k opakovanému procesu. Příklad znázorněný na obr. 3 odpovídá situaci, kdy každých 30 minut dochází k vývinu škodliviny. Během technologického procesu je v provozu trvalé větrání. Je zřejmé, že uvedený proces vyhovuje z hlediska nejvyšší přípustné koncentrace  $NPK-P$ , ovšem z hlediska přípustného expozičního limitu  $PEL$  je nevyhovující. Řešením je zvýšení intenzity větrání, nebo prodloužení časového intervalu, kdy nedochází k vývinu škodliviny.



Obr. 3 Průběh koncentrace při periodickém vývinu škodliviny

### Současný vznik různých škodlivin

Z hlediska působení škodlivin na člověka se rozlišují případy, kdy lze působení škodlivin sčítat a kdy škodliviny působí vzájemně nezávisle.

#### a) Působení škodlivin se sčítá

Vyskytují-li se v ovzduší dvě, nebo více látek, které působí na stejný orgánový systém člověka, předpokládá se, že působí aditivně (jejich účinek se sčítá), pokud nejsou k dispozici dostupné informace o opaku. Pro chemické látky platí [1], že součet poměrů jejich naměřených koncentrací k jejich PEL resp. NPK-P nesmí přesahovat hodnotu 1.

$$\frac{C_1}{PEL_1} + \frac{C_2}{PEL_2} + \dots + \frac{C_n}{PEL_n} \leq 1 \quad (9)$$

$$\frac{C_1}{NPK - P_1} + \frac{C_2}{NPK - P_2} + \dots + \frac{C_n}{NPK - P_n} \leq 1 \quad (10)$$

kde  $C_1$  až  $C_n$  jsou naměřené koncentrace jednotlivých látek,  $PEL_1$  až  $PEL_n$  a  $NPK - P_1$  až  $NPK - P_n$  jsou hodnoty stanovené podle příslušného nařízení vlády [1], kde jsou uvedeny limitní hodnoty PEL a NPK-P ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) pro 480 látek.

Při trvalém větrání ( $\tau \rightarrow \infty$ ) odpovídá průtok větracího vzduchu součtu průtoků vzduchu potřebných pro odvod každé dílčí škodliviny

$$V_1 = \frac{M_{s1}}{PEL_1} + \frac{M_{s2}}{PEL_2} + \dots + \frac{M_{sn}}{PEL_n} \quad (11)$$

kde je

$M_{si}$  hmotnostní tok škodliviny  $i$  [ $\text{g}/\text{h}$ ],

$PEL_i$  přípustný expoziční limit příslušné látky  $i$  [ $\text{g}/\text{m}^3$ ].

Přípustné expoziční limity směsi prachu  $PEL_s$  s různým  $PEL_1, PEL_2, \dots, PEL_n$  se stanoví výpočtem z PEL jednotlivých prachů podle vzorce

$$PEL_s = \left[ \frac{x_1}{100 \cdot PEL_1} + \frac{x_2}{100 \cdot PEL_2} + \dots + \frac{x_n}{100 \cdot PEL_n} \right]^{-1} \quad (12)$$

kde  $x_1$  až  $x_n$  jsou hmotnostní podíly látek v %,  $PEL_1$  až  $PEL_n$  jsou přípustné expoziční limity látek 1 až  $n$ .

#### b) Škodliviny působí vzájemně nezávisle

Nelze-li aditivní účinek jednotlivých látek předpokládat, koncentrace každé jednotlivé složky nesmí překročit její PEL, resp. NPK-P. Průtok větracího vzduchu je nutné stanovit pro každou škodlivinu samostatně

$$V_1 = \frac{M_{s1}}{PEL_1}; V_2 = \frac{M_{s2}}{PEL_2}; \dots; V_n = \frac{M_{sn}}{PEL_n} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (13)$$

a větrací zařízení dimenzovat na maximální hodnotu průtoku vzduchu

$$V = \max(V_1; V_2; \dots; V_n) \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (14)$$

### Plynulá změna vývinu škodliviny

Výše uvedené postupy odpovídají konstantnímu vývinu škodliviny  $M_s = \text{konst.}$  Produkce škodliviny však může být v čase proměnná, např. při sušení nalaokovaných předmětů, kdy dochází k odpařování laku. Je-li znám průběh hmotnostního toku škodliviny v závislosti na čase  $M_s = f(\tau)$ , je možné obecnou diferenciální rovnicí popisující bilanci plyných škodlivin v prostoru zapsat ve tvaru

$$M_s(\tau) d\tau - V_e C d\tau = O d\tau \quad (15)$$

což vede k řešení nehomogenní diferenciální rovnice

$$\frac{dc}{d\tau} + \frac{V_e}{O} C = \frac{1}{O} M_s(\tau) \quad (16)$$

Rovnice (15) platí pro případ, kdy přiváděný vzduch neobsahuje danou škodlivinu ( $C_p = 0$ ). Řešením rovnice (16) dostaneme průběh koncentrace v závislosti na čase. Průměrná koncentrace se pak stanoví na základě rovnice (4). Příklad řešení problému s vývinem škodliviny popsaným expoziční funkcí je uveden například v literatuře [3].

### ZÁVĚR

Příspěvek krátce komentuje problematiku hodnocení znečištění vnitřního ovzduší na základě hygienických předpisů a prezentuje analytický vztah pro výpočet průměrné koncentrace škodliviny v prostoru. Na příkladech řešení je poukázáno na důležitost znalosti průměrné koncentrace během pracovní směny pro různé případy vývinu škodliviny. Uvedená metodika slouží zejména pro hodnocení výskytu škodlivin v prostoru a poskytuje projektantům hlubší informace k pochopení dané problematiky. Poznatky mohou posloužit zejména projektantům průmyslové vzduchotechniky, kteří navrhují větrací zařízení tak, aby výrobní proces splňoval závazné předpisy při různých podmínkách provozu. Rovněž lze optimálním návrhem ovlivnit i výslednou spotřebu energie na větrání a větrání.

Kontakt na autora: Vladimír.Zmrhal@fs.cvut.cz

#### Použité zdroje:

- [1] Nařízení vlády č. 93/2012 Sb., kterým se mění nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci, ve znění nařízení vlády č. 68/2010 Sb.
- [2] Nový, R., a kol. Technika prostředí. 2000, Vydavatelství ČVUT, Praha. ISBN 80-01-02108-4.
- [3] Oppl, L. Průmyslové větrání. Vysokoškolské skriptum. ČVUT v Praze. 1970. ■