

Výpočty

Základní výpočty v oblasti měření emisí stacionárních zdrojů znečišťování ovzduší zahrnují 3 okruhy úloh. Především je to výpočet hmotnostní koncentrace znečišťující látky z experimentálních údajů o složení odpadního plynu, dále výpočet průtoku odpadního plynu a konečně určení hmotnostního toku a specifické výrobní emise znečišťující látky. Běžně používané výpočtové vztahy a přepočtové koeficienty vycházejí z předpokladu, že stavové chování odpadního plynu lze s dostatečnou přesností popsat stavovou rovnicí ideálního plynu.

Výpočet hmotnostní koncentrace znečišťující látky

Způsob výpočtu hmotnostní koncentrace znečišťujících látek je dán způsobem, jakým je provedeno jejich stanovení. Při jednorázovém měření provedeném manuálními metodami závisí způsob výpočtu na zvolené metodě stanovení a lze jej nalézt v příslušných technických normách nebo odvodit s využitím znalosti základních chemických výpočtů.

Pokud je měření prováděno kontinuálně pracujícími analyzátory, je výsledek měření vyjádřen vždy jako objemový zlomek příslušné složky odpadního plynu. Proto algoritmus výpočtu hmotnostní koncentrace znečišťujících látek je v tomto případě pro všechny látky stejný. Pro volbu správného výpočtového vztahu nebo postupu je pouze nutné znát vztažné podmínky, které jsou pro konkrétní zdroje znečišťování ovzduší dány legislativními předpisy. V současné době jsou používány tyto vztažné podmínky:

- vztažné podmínky, kdy odpadní plyn je suchý, při normálních stavových podmínkách a zpravidla s daným referenčním obsahem kyslíku či jiné majoritní složky odpadního plynu (např. CO₂),
- vztažné podmínky, kdy odpadní plyn je vlhký, při normálních stavových podmínkách a někdy s daným referenčním obsahem kyslíku či jiné majoritní složky odpadního plynu (např. CO₂),
- vztažné podmínky, kdy vlhkost, teplota a statický tlak odpadního plynu odpovídají běžným provozním parametrům.

V dalších odstavcích jsou uvedeny nejběžnější vztahy pro výpočet hmotnostní koncentrace znečišťujících látek. Jejich odvození lze provést pomocí definičních vztahů pro objemový zlomek a hmotnostní koncentraci složky směsi a z vlastností ideálního plynu (stavová rovnice, Amagatův zákon).

Nejobecnější přepočet se provádí podle vztahu

$$\rho(ZL) = \varphi(ZL) \cdot M(ZL) \cdot \frac{p}{RT},$$

- kde $\rho(ZL)$ je hmotnostní koncentrace znečišťující látky (ZL) v odpadním plynu při teplotě T a tlaku p ,
- $\varphi(ZL)$ objemový zlomek znečišťující látky v odpadním plynu,
- $M(ZL)$ molární hmotnost znečišťující látky,
- p statický tlak odpadního plynu,
- R plynová konstanta (8,314 J · mol⁻¹ · K⁻¹),
- T termodynamická teplota odpadního plynu.

Pro přepočet experimentálně zjištěných objemových zlomků anorganických plynných znečišťujících látek (stanovení je prováděno kontinuálně pracujícími analyzátory s předřazeným chladičem plynů) na odpovídající hmotnostní koncentrace lze pro dané vztažné podmínky odvodit následující vztahy.

Vztažné podmínky a):

$$\rho_{N,r}(ZL) = \frac{p_N}{R \cdot T_N} \cdot \varphi(ZL) \cdot M(ZL) \cdot \frac{\varphi_{\text{air}}(\text{O}_2) - \varphi_r(\text{O}_2)}{\varphi_{\text{air}}(\text{O}_2) - \varphi_m(\text{O}_2)},$$

- kde $\rho_{N,r}(ZL)$ je hmotnostní koncentrace znečišťující látky při vztažných podmínkách a),
 p_N normální tlak (101,325 kPa),
 R plynová konstanta (8,314 J/(mol · K)),
 T_N normální teplota (273,15 K),
 $\varphi(ZL)$ objemový zlomek znečišťující látky v suchém odpadním plynu zjištěný měřením,
 $M(ZL)$ molární hmotnost znečišťující látky,
 $\varphi_{\text{air}}(\text{O}_2)$ objemový zlomek kyslíku v suchém spalovacím vzduchu,
 $\varphi_r(\text{O}_2)$ referenční objemový zlomek kyslíku pro vztažné podmínky a),
 $\varphi_m(\text{O}_2)$ objemový zlomek kyslíku v suchém odpadním plynu zjištěný měřením.

Objemový zlomek kyslíku v suchém spalovacím vzduchu $\varphi_{\text{air}}(\text{O}_2)$ je ve většině případů roven objemovému zlomku kyslíku v suchém okolním vzduchu, což v našich zeměpisných podmínkách činí 20,9 %. Některé technologické procesy využívají spalování s přídatným kyslíkem. Pak se hodnota $\varphi_{\text{air}}(\text{O}_2)$ vyjadřující objemový zlomek kyslíku ve fiktivním spalovacím vzduchu určí zpravidla látkovou bilancí spalovacího procesu s využitím údajů o spotřebě paliva (nejčastěji zemního plynu), přídatného kyslíku a z úplné chemické analýzy plynných složek spalín.

Vztažné podmínky b):

$$\rho'_{N,r}(ZL) = \frac{p_N}{R \cdot T_N} \cdot \varphi(ZL) \cdot M(ZL) \cdot (1 - \varphi'(\text{H}_2\text{O})),$$

- kde $\rho'_{N,r}(ZL)$ je hmotnostní koncentrace znečišťující látky při vztažných podmínkách B bez udaného referenčního obsahu kyslíku,
 $\varphi'(\text{H}_2\text{O})$ objemový zlomek vodní páry v odpadním plynu.

Vztažné podmínky c):

$$\rho'(ZL) = \frac{p}{R \cdot T} \cdot \varphi(ZL) \cdot M(ZL) \cdot (1 - \varphi'(\text{H}_2\text{O})),$$

- kde $\rho'(ZL)$ je hmotnostní koncentrace znečišťující látky při vztažných podmínkách c),
 p statický tlak plynu odpovídající obvyklým provozním podmínkám,
 T termodynamická teplota plynu odpovídající obvyklým provozním podmínkám.

Poněkud odlišná je struktura výpočetních vztahů pro vyjádření hmotnostní koncentrace celkového organického uhlíku při stanovení plamenovým ionizačním detektorem. Na rozdíl od předchozích případů se uvedeným detektorem zjišťuje obsah organických látek ve vlhkém odpadním plynu. Navíc kalibrace analyzátoru se neprovádí znečišťující látkou, ale zvolenou referenční látkou.

Vztažné podmínky a):

$$\rho_{N,r}(\text{TOC}) = \frac{P_N}{R \cdot T_N} \cdot \varphi'(\text{C}_3\text{H}_8) \cdot 3 \cdot M(\text{C}) \cdot \frac{1}{(1 - \varphi'(\text{H}_2\text{O}))} \cdot \frac{\varphi_{\text{air}}(\text{O}_2) - \varphi_r(\text{O}_2)}{\varphi_{\text{air}}(\text{O}_2) - \varphi_m(\text{O}_2)},$$

kde $\rho_{N,r}(\text{TOC})$ je hmotnostní koncentrace celkového organického uhlíku při vztažných podmínkách a),
 $\varphi'(\text{C}_3\text{H}_8)$ celkový obsah organických látek v odpadním plynu vyjádřený jako objemový zlomek kalibrační složky (propanu)¹ - veličina měřená přímo analyzátozem,
 A konstituční koeficient atomu uhlíku v molekule kalibrační složky použité certifikované referenční plynné směsi (např. pro methan $a = 1$, pro propan $a = 3$)
 $M(\text{C})$ molární hmotnost uhlíku (12,01 g/mol).

Vztažné podmínky b):

$$\rho'_N(\text{TOC}) = \frac{P_N}{R \cdot T_N} \cdot \varphi'(\text{C}_3\text{H}_8) \cdot 3 \cdot M(\text{C}),$$

kde $\rho'_N(\text{TOC})$ je hmotnostní koncentrace celkového organického uhlíku při vztažných podmínkách B bez udání referenčního obsahu kyslíku.

Vztažné podmínky c):

$$\rho'(\text{TOC}) = \frac{P}{R \cdot T} \cdot \varphi'(\text{C}_3\text{H}_8) \cdot 3 \cdot M(\text{C}),$$

kde $\rho'(\text{TOC})$ je hmotnostní koncentrace celkového organického uhlíku při vztažných podmínkách C.

¹ POZNÁMKA V České republice se stále ještě můžeme setkat s autorizovanými laboratořemi, které k nastavení měřicího rozpětí analyzátorů používají místo propanu methan. Tato praxe je v rozporu s mezinárodními a evropskými technickými normami pro měření emisí TOC. Zjištěné výsledky pak nejsou porovnatelné s výsledky naměřenými v ostatních evropských zemích.

Výpočet objemového toku (průtoku) odpadního plynu

Na rozdíl od výpočtu hmotnostní koncentrace má předpoklad ideálního chování odpadního plynu podstatně větší vliv na nejistotu měření průtoku. Při běžných nárocích na celkovou nejistotu stanovení průtoku odpadního plynu (vyjádřeno relativní standardní nejistotou měření lineární rychlosti proudění $\pm 5\%$) lze v souladu s ustanoveními norem EN 13 284-1 *Stationary source emissions - Determination of low mass concentration of dust – Part 1: Manual gravimetric method* (ČSN EN 13284-1) a ČSN ISO 10780 *Stacionární zdroje emisí – Měření rychlosti a průtoku plynů v potrubí* (ČSN ISO 10780) odpadní plyn považovat za ideální plyn. Pak se při výpočtu průtoku na základě znalosti rychlostního pole zjištěného pomocí Prandtlových trubíc postupuje následujícím způsobem.

Nejdříve se vypočte střední hustota proudícího odpadního plynu z jeho složení (vliv kapalných a pevných částic aerosolu se považuje za zanedbatelný) podle vzorce:

$$\bar{\rho}' = \frac{\bar{p}}{R \cdot \bar{T}} \cdot \sum_{j=1}^k \bar{\varphi}'(B_j) \cdot M(B_j),$$

kde $\bar{\rho}'$ Je střední hustota proudícího odpadního plynu,
 \bar{p} střední statický tlak proudícího odpadního plynu,
 \bar{T} střední termodynamická teplota proudícího odpadního plynu,
 $\bar{\varphi}'(B_j)$ střední objemový zlomek j -té složky proudícího odpadního plynu,
 $M(B_j)$ molární hmotnost j -té složky proudícího odpadního plynu.

Vypočte se průměrná rychlost proudění odpadního plynu jako:

$$\bar{v}' = K_{PT} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{2 p_{d_i}}{\bar{\rho}'}} ,$$

kde \bar{v}' je střední rychlost proudění odpadního plynu ve zvoleném měřicím průřezu,
 K_{PT} kalibrační součinitel (případně funkce) Prandtlovy trubice,
 n Počet měřicích bodů,
 p_{d_i} diferenční tlak Prandtlovy sondy v i -tém měřicím bodě.

Vypočte se průměrný objemový tok odpadního plynu pro příslušné vztažné podmínky.

Vztažné podmínky a):

$$\bar{q}_{V_{N,r}} = \bar{v}' \cdot A \cdot \frac{\bar{p} \cdot T_N}{p_N \cdot \bar{T}} \cdot (1 - \varphi'(\text{H}_2\text{O})) \cdot \frac{\varphi_{\text{air}}(\text{O}_2) - \varphi_m(\text{O}_2)}{\varphi_{\text{air}}(\text{O}_2) - \varphi_r(\text{O}_2)},$$

kde $\bar{q}_{V_{N,r}}$ je průtok odpadního plynu při vztažných podmínkách A,
 A plocha měřicího průřezu.

Vztažné podmínky b):

$$\bar{q}'_{V_N} = \bar{v}' \cdot A \cdot \frac{\bar{p} \cdot T_N}{p_N \cdot \bar{T}},$$

kde \bar{q}'_{V_N} je průtok odpadního plynu při vztažných podmínkách B bez udání

referenčního obsahu kyslíku.

Vztažné podmínky c):

$$\bar{q}'_V = \bar{v}' \cdot A,$$

kde \bar{q}'_V je průtok odpadního plynu při vztažných podmínkách C.

Výše uvedené vztahy pro výpočet průtoku odpadního plynu vyhovují většině emisních měření.

Výpočet hmotnostního toku znečišťující látky

Průměrný hmotnostní tok $\bar{q}_m(\text{ZL})$ jednotlivých znečišťujících látek se v závislosti na vztažných podmínkách, pro něž byly vypočteny hmotnostní koncentrace znečišťujících látek a průtoky nosného plynu, určí alternativně ze vztahu:

$$\bar{q}_m(\text{ZL}) = \bar{\rho}_{\text{N,r}}(\text{ZL}) \cdot \bar{q}_{\text{V,N,r}} = \bar{\rho}'_{\text{N,r}}(\text{ZL}) \cdot \bar{q}'_{\text{V,N,r}} = \bar{\rho}'_{\text{N}}(\text{ZL}) \cdot \bar{q}'_{\text{V,N}} = \bar{\rho}'(\text{ZL}) \cdot \bar{q}'_V$$

Literatura

ČSN EN 13284-1 *Stacionární zdroje emisí - Stanovení nízkých hmotnostních koncentrací prachu - Manuální gravimetrická metoda*, ČNI Praha 2002.

ČSN ISO 10780 *Stacionární zdroje emisí - Měření rychlosti a průtoku plynů v potrubí*, ČNI Praha 1998.