



ČESKÉ
VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



ÚSTAV
TECHNIKY
PROSTŘEDÍ

PŘEDMĚT

EXPERIMENTÁLNÍ METODY V TECHNICE PROSTŘEDÍ

NÁZEV

NÁVOD K ÚLOZE

MÍSTNÍ STŘEDNÍ STÁŘÍ VZDUCHU

VYPRACOVAL

Ing. Martin Barták, Ph.D.

ROZSAH

6 stran

PŘÍLOHY

-

DATUM

prosinec 2016

1 Úvod

Požadavky na přívod čerstvého vzduchu do prostoru se běžně vyjadřují buď hodnotou průtoku vzduchu (obvykle vztáženou na 1 osobu) nebo intenzitou větrání, danou podílem objemového průtoku čerstvého vzduchu přiváděného do místnosti a objemu místnosti. Takový popis charakterizuje větrání místnosti pouze z celkového pohledu a nevystihuje to, že různá místa ve větraném prostoru mohou být různě „zásobována“ čerstvým vzduchem. Bez podrobnějšího rozboru je např. zřejmé, že místa zasažená primárním proudem přiváděného čerstvého vzduchu budou vykazovat vyšší kvalitu vzduchu než místa, kde proudění stagnuje nebo kde se vyskytují proudy, v nichž cirkuluje stále tentýž vzduch. Rozdíl v kvalitě vzduchu mezi uvedenými místy přitom nesouvisí s intenzitou větrání, takže pro lokální analýzu kvality vzduchu je třeba použít jiné veličiny. Jednou z možností, jak popsat kvalitu větrání lokálně, je stanovit *místní střední stáří vzduchu*.

2 Teoretický základ

Stáří vzduchu τ [s] v daném místě je čas, který strávila částice vzduchu v místnosti od okamžiku, kdy prošla přiváděcím otvorem, do okamžiku, v němž dosáhla daného bodu v prostoru. V místech, která jsou v blízkosti přiváděcích otvorů (v oblasti primárního proudu), je vzduch „mladý“, protože do těchto míst dospěje za krátkou dobu, po relativně krátké dráze od přiváděcího otvoru. V místech daleko od přiváděcích otvorů nebo v místech se stagnujícím prouděním, kam se molekuly čerstvého vzduchu dostanou po dlouhé době od vstupu do místnosti, je vzduch „starý“.

Stáří jednotlivých částic vzduchu je prakticky nezměřitelné. Protože se uvažuje, že částice vzduchu v sledovaném bodě prostoru mají určitou distribuci stáří (spektrum stáří), tj. že stáří molekul v daném bodě lze vyjádřit křivkou četnosti (distribuční funkcí), zavádí se pojem charakterizující tuto distribuci střední veličinou – *místní střední stáří vzduchu* $\tau_{stř}$ [s].

Matematické vyjádření stáří vzduchu je založeno na předpokladu náhodného výskytu částic vzduchu o různém stáří ve sledovaném bodě větraného prostoru, který chápeme jako spojité prostředí. To znamená, že stáří částic vzduchu je náhodnou veličinou τ (s), tvořící soubor hodnot charakterizovaný spojitou frekvenční distribuční funkcí stáří $\varphi(\tau)$ [s⁻¹]. Tato funkce vyjadřuje poměrný počet částic vzduchu (četnost φ) příslušných danému stáří τ v souboru. Veličina $\varphi(\tau) \cdot d\tau$ pak vyjadřuje poměrný počet částic vzduchu v souboru, které mají stáří v rozmezí τ až $\tau + d\tau$. Střední stáří částic o různém stáří (v rozmezí $\tau = 0$ až ∞) v daném bodě je dáno vztahem

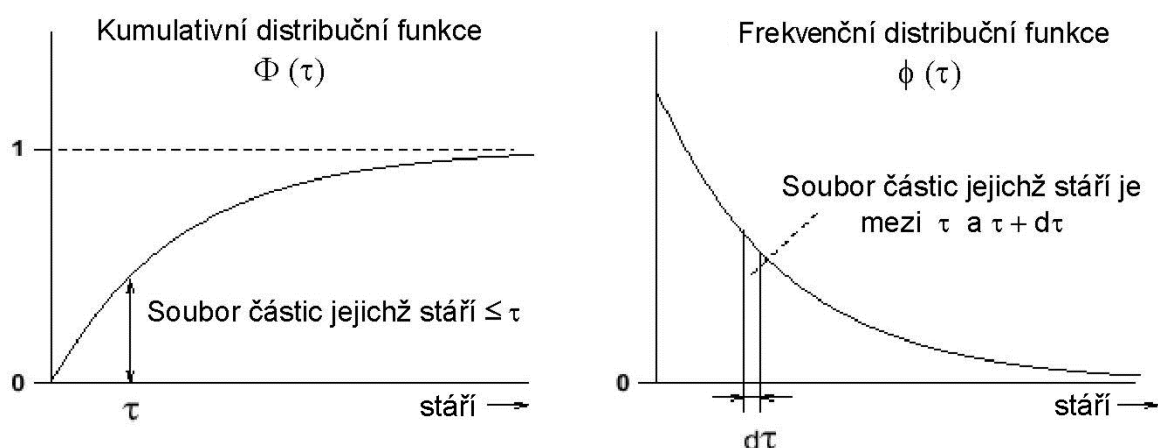
$$\tau_{stř} = \int_0^{\infty} \tau \cdot \varphi(\tau) d\tau$$

Frekvenční distribuční funkci $\varphi(\tau)$ odpovídá kumulativní distribuční funkce $\Phi(\tau)$ [-], vyjadřující podíl všech částic vzduchu v daném místě, které mají stáří *menší než* τ . Funkce $\varphi(\tau)$ je první derivací kumulativní funkce $\Phi(\tau)$, platí

$$\Phi(\tau) = \int_0^{\tau} \varphi(\tau) d\tau$$

K $\Phi(\tau)$ existuje doplňková funkce $1 - \Phi(\tau)$, vyjadřující podíl všech částic vzduchu v daném místě, které mají stáří *větší nebo rovné* τ . Tuto doplňkovou funkci lze použít k výpočtu místního středního stáří vzduchu.

$$\tau_{stř} = \int_0^{\infty} \tau \cdot \varphi(\tau) d\tau = \int_0^{\infty} [1 - \Phi(\tau)] d\tau$$



Obr. 1 Kumulativní a frekvenční distribuční funkce

Funkci $\Phi(\tau)$ lze považovat za místní bezrozměrnou koncentraci částic vzduchu, jejichž stáří je menší než τ . Funkce $\Phi(\tau)$ se označuje také jako podíl (část, frakce) mladšího vzduchu. Doplnková funkce $1 - \Phi(\tau)$, vyjadřuje frakci staršího vzduchu. Tato interpretace vede k metodám vyhodnocení stáří vzduchu na základě měření koncentrace značkovacích plynů přidaných v malém množství do vzduchu.

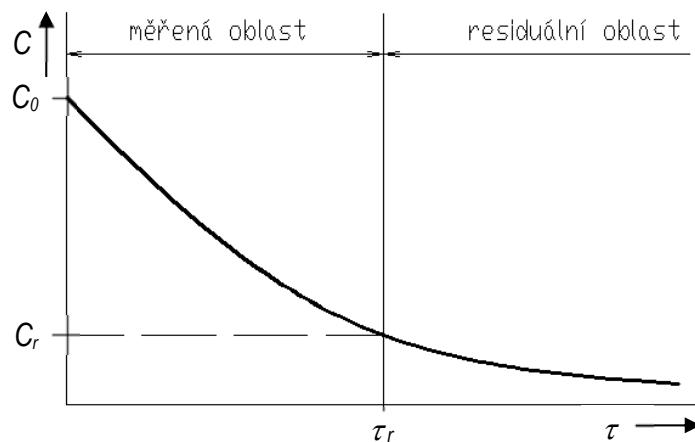
Jako značkovací lze použít plyn, který buď je, nebo není přirozenou složkou vzduchu. Výhoda užití plynu, který se ve vzduchu běžně vyskytuje (např. CO_2), je v dostupnosti a nižší ceně, nevýhodou je nutnost použít relativně vysoké koncentrace (běžná koncentrace CO_2 ve vzduchu je 400 až 500 ppm). Výhodou plynů, které se ve vzduchu běžně nevyskytují (např. hexafluorid sírový, SF_6) je možnost použít velmi nízké koncentrace (i jednotky ppm), nevýhodou může být horší dostupnost a vyšší cena, někdy i hygienické, ekologické nebo bezpečnostní limity. V každém případě je nutné omezit koncentraci značkovacího plynu tak, aby neovlivnil proudění vzduchu změnou jeho hustoty, což může vést k nežádoucímu vzniku vztlačových sil.

2.1 Metoda poklesu koncentrace

Jednou z metod zjišťování místního středního stáří vzduchu je *měření poklesu koncentrace* značkovacího plynu (ZP). Předpokladem je rovnoměrné rozložení ZP na počátku v celém prostoru, tj. homogenní počáteční koncentrační pole $C_0 = \text{konst.}$ Spuštěním větrání se do prostoru přivádí čerstvý vzduch. Koncentrace ZP v přiváděném vzduchu je nulová, takže dochází k ředění ZP v prostoru, místní koncentrace $C(\tau)$ s rostoucím časem klesá. V daném místě mají částice vzduchu označované plynem o koncentraci $C(\tau)$ stáří větší nebo rovné τ . Naopak částice vzduchu, které do tohoto místa ještě nedorazily, mají stáří menší než τ . Poměrná koncentrace $C(\tau)/C_0$ vyjadřuje poměrný počet všech částic vzduchu, jejichž stáří je větší nebo rovné τ . Doplnková funkce $(1 - C(\tau)/C_0)$ vyjadřuje naopak poměrný počet všech částic, které mají stáří menší než τ a odpovídá tedy kumulativní distribuční funkci $\Phi(\tau)$. Místní stáří vzduchu tedy bude

$$\tau_{stř} = \int_0^{\infty} [1 - \Phi(\tau)] d\tau = \int_0^{\infty} \left[1 - \left(1 - \frac{C(\tau)}{C_0} \right) \right] d\tau = \frac{1}{C_0} \int_0^{\infty} C(\tau) d\tau$$

Požadavek na nekonečně dlouhé měření, který vyplývá z výše uvedeného vztahu, lze vyřešit na základě toho, že od určité fáze má pokles koncentrace ZP v jakémkoliv místě prostoru exponenciální charakter. V této fázi lze pokles koncentrace v čase až k nulové hodnotě dopočítat.



Obr. 2 Měřená a residuální oblast poklesu koncentrace značkovacího plynu

Jakmile měření poklesu koncentrace dospěje do exponenciální fáze, lze integrál z residuální (zbytkové) části křivky v intervalu od τ_r do $\tau = \infty$ vypočítat podle vztahu

$$\int_{\tau_r}^{\infty} C(\tau) d\tau = \int_{\tau_r}^{\infty} C(\tau_r) \cdot e^{-k(\tau-\tau_r)} d\tau = C(\tau_r) \cdot e^{k\tau_r} \int_{\tau_r}^{\infty} e^{-k\tau} d\tau = \frac{C_r}{k}$$

kde $C_r = C(\tau_r)$ je počáteční koncentrace residuální oblasti a k [s⁻¹] odpovídá sklonu přímky, do které se zobrazí exponenciální pokles koncentrace v semilogaritmických souřadnicích.

Koncentrace C ve výše uvedených rovnicích mohou být uvažovány buď jako hmotnostní v kg/m³ nebo jako molární v kmol/m³, případně v ppm (parts per milion).

3 Použité přístroje a zařízení

- těsná laboratorní komora (4,2x3,6x3) m s odvodem vzduchu mimo budovu (na střechu)
- vzduchotechnická jednotka s přívodem čerstvého vzduchu do laboratorní komory
- malé cirkulační ventilátory umístěné v laboratorní komoře
- INNOVA 1312 – opto-akustický analyzátor plynů
- INNOVA 1303 – dávkovací a vzorkovací jednotka
- řídicí počítač se softwarem INNOVA 7620
- GILLIAN Gilibrator 2 – přesný bublinkový průtokoměr
- plastové kapiláry pro dávkování a vzorkování značkovacího plynu
- plyn SF₆ v tlakové lahvi s redukčním ventilem
- teploměr pro měření teploty vzduchu
- staniční barometr

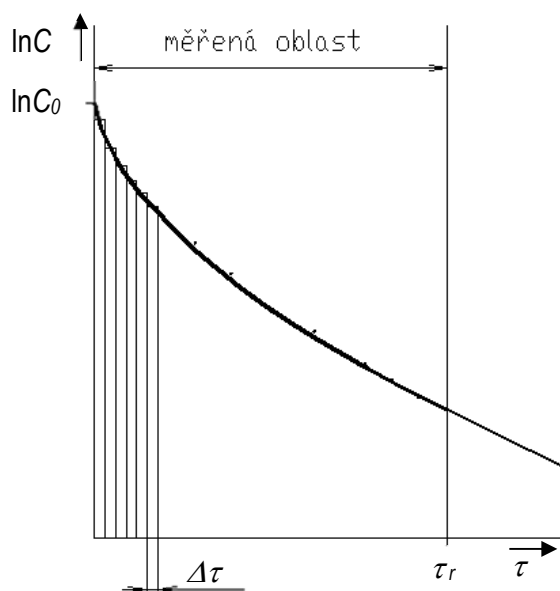
4 Postup měření

1. Změří se tlak a teplota vzduchu.
2. V laboratorní komoře se rozmístí kapiláry pro přívod a vzorkování (měření koncentrace) značkovacího plynu. Souřadnice vzorkovacích míst se zapíší a přiřadí ke vstupům do dávkovací a vzorkovací jednotky INNOVA 1303. Současně lze připojit max. 6 odběrných míst.
3. Komora se těsně uzavře, spustí se cirkulační ventilátory, do komory se dopraví značkovací plyn SF₆ tak, aby jeho koncentrace nepřesáhla 20 ppm. K tomu se použije předem vypočtené množství plynu, které se odměří přesným průtokoměrem GILLIAN Gilibrator 2.
4. Dosažená počáteční koncentrace SF₆, její časová stálost a rovnoměrné rozložení se ověří přístrojem INNOVA, který zůstane dále v činnosti až do konce měření.
5. Pokud je koncentrační pole homogenní a ustálené, zastaví se cirkulační ventilátory. Po několika minutách (aby zaniklo cirkulační proudění) se spustí VZT jednotka, která zajistí konstantní průtok přiváděného čerstvého vzduchu.
6. Zaznamenávají se hodnoty koncentrace SF₆, dokud není dosaženo exponenciálního poklesu ve všech měřených bodech. Měření pokračuje do doby, kdy je ve všech bodech naměřeno dostatečně hodnot koncentrace v reziduální oblasti. Jeden měřicí cyklus trvá cca 30 až 60 minut.

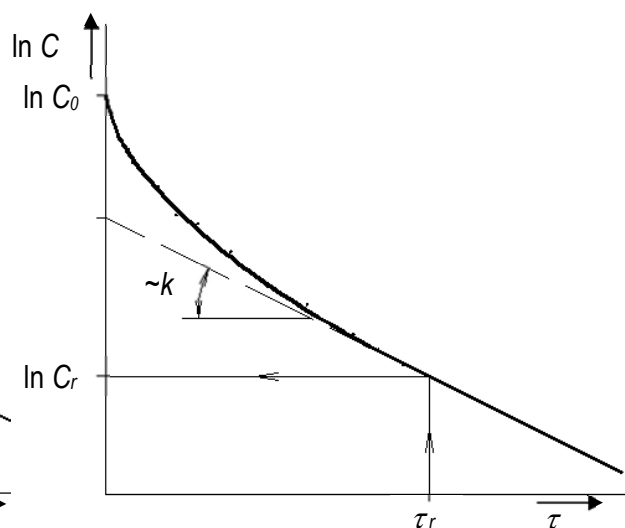
5 Zpracování naměřených hodnot

Vzorkování hodnot koncentrací probíhá s konstantním časovým krokem $\Delta\tau$ v délce několika sekund až několika desítek sekund (interval lze nastavit). V měřené oblasti, která zahrnuje N časových kroků, je tedy hodnota integrálu pod křivkou poklesu koncentrace

$$\int_0^{\tau_r} C(\tau) d\tau \approx \sum_{i=0}^N C_i \Delta\tau = \Delta\tau \sum_{i=0}^N C_i$$



Vyhodnocení v měřené oblasti



Vyhodnocení v reziduální oblasti

Zobrazením poklesu koncentrace v semilogaritmických souřadnicích se zjistí reziduální oblast (exponenciální průběh se zde zobrazí jako přímka). Vyhodnotí se koncentrace C_r na počátku reziduální oblasti a směrnice k přímky poklesu v reziduální oblasti.

Výsledná hodnota místního středního stáří vzduchu je

$$\tau_{stř} = \frac{\Delta\tau \sum_{i=0}^N C_i + \frac{C_r}{k}}{C_0} \text{ [s]}$$

Měření lze vyhodnocovat s užitím softwaru INNOVA 7620 nebo z naměřených hodnot koncentrací (např. v tabulkovém procesoru Excel), případně lze výsledky získané oběma postupy porovnávat. Kontrolní měření lze provádět v odváděcím otvoru laboratorní komory, kde je místní střední stáří vzduchu rovno převrácené hodnotě intenzity větrání I [s^{-1}].

$$\tau_{stř, OT} = \frac{1}{I} = \frac{O}{\dot{V}}$$

kde O [m^3] je objem místnosti a \dot{V} [m^3/s] je průtok přiváděného čerstvého vzduchu.