

Využití CO₂ jako značkovacího plynu pro detekci netěsností vzduchotechnických zařízení

Use of CO₂ as a Tracer Gas for Leakage Detection in Air Handling Systems

Recenzent

Ing. Miroslav Kučera, Ph.D.

Příspěvek se zaměřuje na experimentální ověření využití CO₂ jako značkovacího plynu pro detekci netěsností vzduchotechnických zařízení, místo dnes rozšířeného značkovacího plynu fluoridu sírového (SF₆), kterého se týkají legislativní omezení. Ověření využitelnosti CO₂ je v závěru doplněno definováním nejistot měření.

Klíčová slova: značkovací plyn, netěsnost vzduchotechnické jednotky, detektor CO₂, SF₆

The paper focuses on the experimental verification of the use of CO₂ as a tracer gas for the detection of leakages in air handling systems, instead of the widely used tracer gas of sulphur hexafluoride (SF₆), which is subject to legislative restrictions. Verification of the applicability of CO₂ is accompanied by the definition of measurement uncertainties.

Keywords: tracer gas, air handling unit leakage, CO₂ detector, SF₆

ÚVOD

Hlavním účelem větracího systému je zajištění přívodu venkovního vzduchu do vnitřních prostor a odvod vzduchu znehodnoceného. Zda mezi jednotlivými proudy vzduchu dochází k předávání tepla, případně i vlhkosti, není pro obsah tohoto příspěvku podstatné. Pokud výše uvedenou funkci zajišťuje jedno větrací zařízení (bez cirkulace), kterým je dopravován odpadní i čerstvý vzduch, je nežádoucí, aby odpadní vzduch pronikal do čerstvého přívodního vzduchu. Konstrukce zařízení a tlakové poměry při provozu tomu musí být přizpůsobeny a výrobky jsou v tomto ohledu testovány např. podle ČSN EN 13141-7 [1] nebo ČSN EN 308 [2].

Z technického hlediska je jednou z možností testování netěsností tlaková metoda, při níž se měří průtok vzduchu, který je třeba k udržení stabilního tlaku v testovaném, optimálně uzavřeném prostoru. Při této metodě se nepracuje se značkovacím plynem. Není však použitelná pro jednotky s rotačním výměníkem, u kterých není možné vzduchotěsně oddělit jednotlivé sektory vzduchu z důvodu rotujícího výměníku. V tomto případě je třeba použít metodu založenou na detekci značkovacího plynu.

Princip měření netěsností s využitím značkovacího plynu spočívá v dávkování značkovacího plynu do odpadního odsávaného vzduchu (ETA) a jeho detekci v čerstvém přiváděném vzduchu (SUP) dle obr. 1, převzatého z ČSN EN 13141-7 [1].

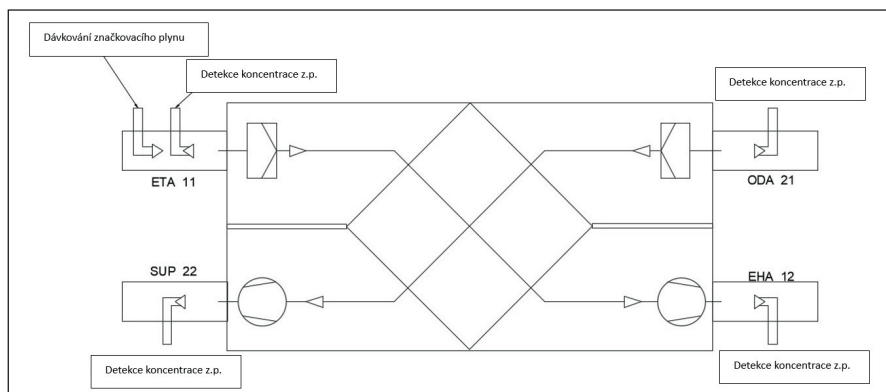
Nároky na značkovací plyn vzhledem k použití jsou toxická nezávadnost, chemická inertnost, technická a cenová dostupnost, možnost detekce velmi malých (malé desítky až jednotky ppm) koncentrací a technická a cenová dostupnost detektorů. Těmto nárokům vyhovuje syntetický, v přírodě se přirozeně nevyskytující a zejména v elektrotechnickém průmyslu desítky let využívaný fluorid sírový (SF₆).

Zásadní nevýhodou SF₆ je však vysoká schopnost vytvářet skleníkový efekt. Vyjádřeno hod-

notou GWP (Global Warming Potential), jehož číselná hodnota 1 je vztahena k molekule CO₂, je hodnota pro molekulu SF₆ 22 800. Jedna molekula SF₆ má tedy stejný efekt jako 22 800 molekul CO₂. Vrcholové orgány EU proto přijímají přísná opatření ke snížení emisí SF₆ a uživatelé se snaží najít vhodnou alternativu [3]. Pracovníci zkušební laboratoře společnosti Air-lab s.r.o., kteří experimenty uvedené v tomto příspěvku prováděli, si po důkladné analýze vybrali oxid uhličitý. Hovoří pro něj jeho dostupnost, nízká cena a nehořlavost, nezpůsobuje korozi zařízení, v používané koncentraci (do 1 %) není toxický, detektory jsou technicky i cenově dostupné.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentů bylo prokázat použitelnost CO₂ jako značkovacího plynu pro určení vnitřní netěsnosti vzduchotechnického zařízení. Pro splnění cíle bylo třeba prozkoumat a vyřešit několik otázek: dávkování, homogenizaci, přesnou detekci, plnění požadavků na nejistoty stanovení netěsnosti.



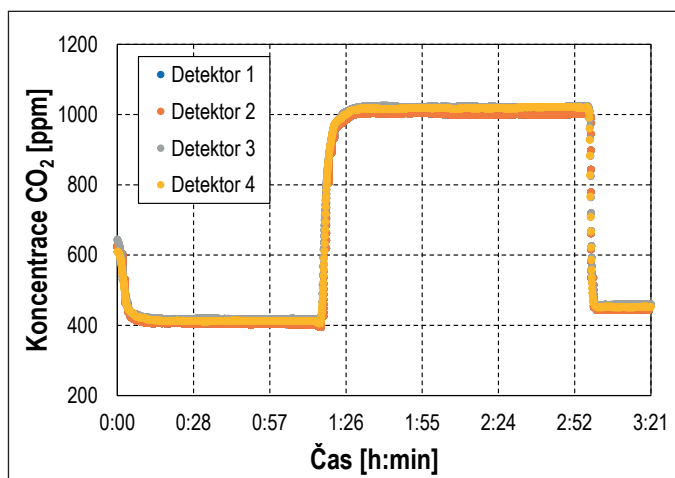
Obr. 1 Schéma měření vnitřní netěsnosti značkovacím plynem: ETA, resp. index 11 – odsávaný odpadní vzduch z interiéru; EHA, resp. index 12 – odpadní vzduch opouštějící vzduchotechnické zařízení; ODA, resp. index 21 – zařízení nasávaný čerstvý vzduch z venkovního prostředí; SUP, resp. index 22 – čerstvý vzduch dodávaný vzduchotechnickým zařízením do interiéru

Fig. 1 Schematic diagram of the internal leakage measurement with tracer gas: ETA or index 11 – exhaust air from the interior; EHA or index 12 – exhaust air leaving the air handling unit; ODA or index 21 – fresh air drawn into the unit from the outside; SUP or index 22 – fresh air supplied to the interior by the air handling unit

První fází zkoušek byl vývoj vhodného detektoru. Jeho základem je komerční senzor s vynikající stabilitou měření a velkým rozlišením, pracující na principu měření absorpce infračerveného světla molekulami CO_2 , označovaný jako IR (Infra Red) nebo NDIR (Non Dispersive Infra Red).

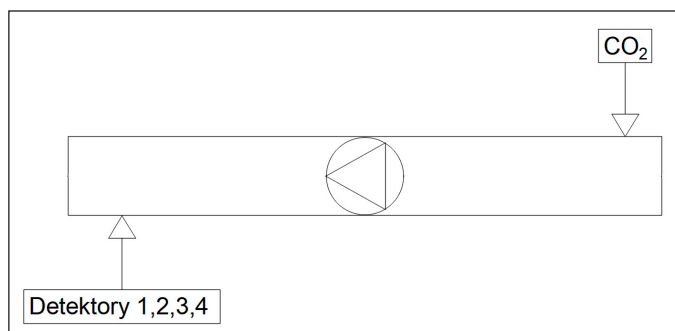
Senzor byl doplněn o softwarovou kompenzaci vlivu aktuální teploty a tlaku, vybaven čerpadlem pro zajištění vhodného průtoku vzduchu se značkovacím plynem a softwarovou aplikací pro ukládání naměřených dat. Jak bylo zmíněno v úvodu, SF_6 je syntetická látka, která se v ovzduší přirozeně nevyskytuje. Její koncentrace v čerstvém přiváděném vzduchu (SUP) je v případě absence netěsnosti nulová, její přítomnost naopak značí netěsnost. CO_2 je součástí atmosféry a jeho koncentrace se v důsledku mnoha vlivů v čase mění, a to v poměrně širokém rozmezí hodnot. V prostoru zkušební laboratoře byly změřeny koncentrace v rozsahu 380 až 580 ppm. Pro použití k detekci netěsností je třeba výrazně zvýšit koncentraci CO_2 v odsávaném odpadním vzduchu (ETA), aby se netěsnost projevila nezpochybnitelným zvýšením koncentrace CO_2 v čerstvém přiváděném vzduchu (SUP). Na základě zjištěného přirozeného rozmezí byla stanovena minimální hodnota koncentrace CO_2 v odsávaném odpadním vzduchu (ETA) 1000 ppm a použité senzory měly rozsah do 10 000 ppm. Řešení přirozeného kolísání koncentrace CO_2 spočívá v současném měření koncentrací ve třech sektorech (ETA, ODA a SUP) s využitím tří detektorů. Změřené koncentrace CO_2 v čerstvém nasávaném vzduchu ODA jsou odečítány od koncentrací změřených v čerstvém přiváděném vzduchu SUP a rozdíl je úměrný netěsnosti mezi sektory.

Pro kontrolu stability a opakovatelnosti měření detektorů byl použit kalibrační plyn (CO_2 v umělém vzduchu, tj. plynu o složení 21 % O_2 a 79 % N_2 , s koncentracemi 400 a 1000 ppm). Všechny čtyři detektory (čtvrtý byl používán pro monitorování koncentrace CO_2 v laboratoři) byly



Obr. 2 Výstupy detektorů z kalibračních plynů

Fig. 2 Calibration gases detectors output



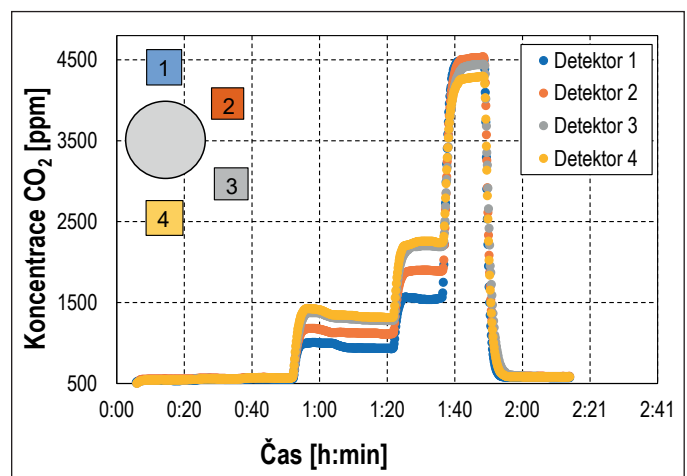
Obr. 3 Schéma aparatury pro měření homogenity značkovacího plynu

Fig. 3 Schematic diagram of the setup for measuring the tracer gas homogeneity

umístěny do uzavřeného boxu, do něhož byl napouštěn kalibrační plyn, který byl udržován v mírném přetlaku do 20 Pa. Průběh naměřených hodnot v čase dokládá obr. 2. Vyplývá z něj dlouhodobá (v řádu jednotek hodin) stabilita detektorů a rozložení naměřených hodnot ze všech detektorů v intervalu 20 ppm při koncentraci kalibračního plynu 400 ppm a 25 ppm při koncentraci kalibračního plynu 1000 ppm. Pro potvrzení opakovatelnosti bylo měření přerušeno, detektory vypnuty a znovu zapnuty. Dosažený výsledek potvrdil předešlé měření.

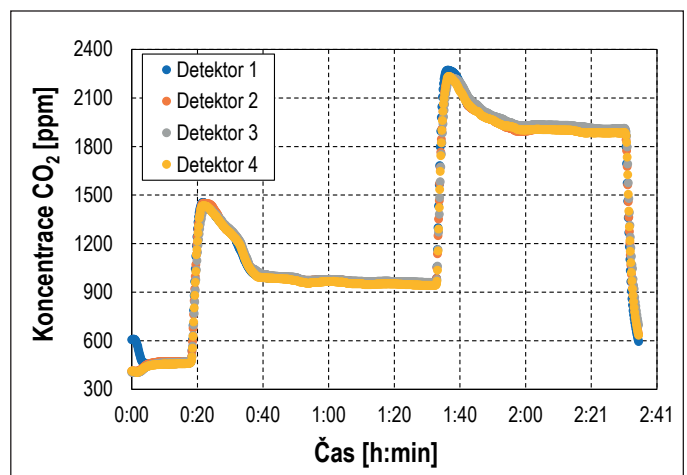
V dalším kroku byla sestavena jednoduchá pokusná aparatura dle obr. 3 zaměřená na prozkoumání homogenity značkovacího CO_2 v proudícím vzduchu. Bylo použito vzduchotechnické potrubí o průměru 100 mm, pro přívod vzduchu axiální ventilátor. Průtok vzduchu byl měřen vrtulkovým anemometrem a dosahoval 270 m^3/h .

První výsledky měření v nejjednodušším uspořádání (dávkování CO_2 hadičkou před ventilátorem, odběry buď v různých vzdálenostech za ventilátorem, nebo v jedné vzdálenosti po obvodu potrubí) ukázaly značnou nehomogenitu koncentrací CO_2 , navíc závislou na absolutní hodnotě koncentrace CO_2 , jak ukazuje graf na obr. 4 se záznamem měření 4 detektorů umístěných ve stejné vzdálenosti za ventilátorem v různých pozicích po obvodu potrubí. Vzhledem k vyšší hustotě CO_2 oproti vzduchu byla očekávána jeho vyšší koncentrace ve spodní části potrubí, což bylo potvrzeno, ovšem pro koncentrace vyšší než 4100 ppm toto neplatí.



Obr. 4 Nehomogenní rozdělení koncentrace značkovacího plynu a vliv dávkovaného množství v potrubí o průměru 100 mm

Fig. 4 Inhomogeneous distribution of tracer gas concentration and effect of dosage amount in a 100 mm diameter pipe



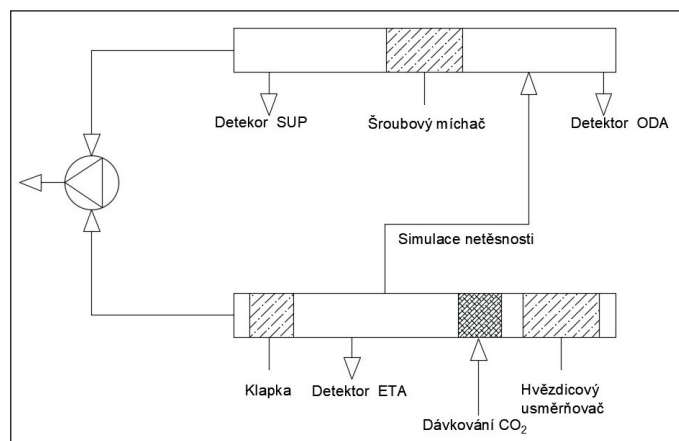
Obr. 5 Dosažená výsledná homogenita značkovacího plynu

Fig. 5 Achieved final homogeneity of the tracer gas

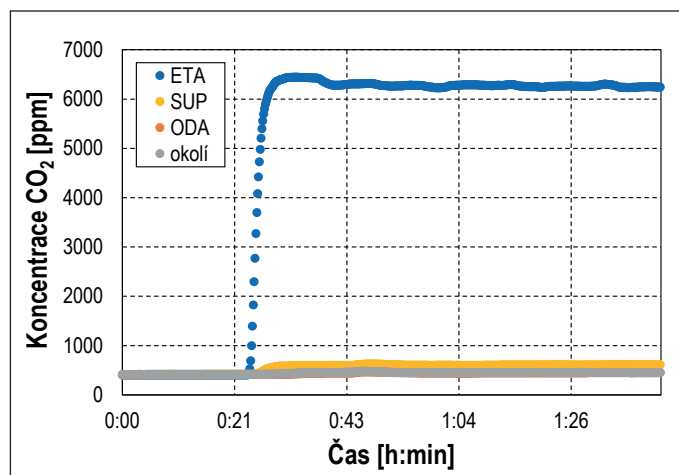
Pro dosažení homogenity byla realizována řada postupných kroků, a to jak v oblasti dávkování CO₂, tak v oblasti míchání. Jejich účinnost byla posuzována při shodném principu uspořádání experimentu na potrubí o průměrech 125 a 160 mm (podle dostupnosti usměrňovačů a homogenizátorů), kritériem pro hodnocení byla šířka intervalu, ve kterém leží naměřené hodnoty koncentrací. Dosažené výsledky jsou zobrazeny v grafu na obr. 5, který dokládá výrazné zlepšení homogenity CO₂ v širokém rozsahu koncentrací.

Po vyřešení homogenního dávkování CO₂ byla aparatura upravena tak, aby simulovala vzduchotechnické zařízení s vnitřní netěsností. Bylo použito vzduchotechnické potrubí o průměrech 125 mm (SUP) a 160 mm (ETA) a vhodný axiální ventilátor. Vrtulkovým anemometrem na jeho výstupu byl změřen průtok 350 m³/h. Netěsnost byla simulována propojením úseků potrubí ETA a SUP hadičkou dle obr. 6 a proudění vzduchu obohaceného kalibračním plynem ze sektoru ETA do sektoru SUP bylo zajištěno vytvořením většího podtlaku v sektoru SUP klapkou na sektoru ETA.

Následně byl proveden test detekce netěsnosti. Byl spuštěn ventilátor a detektory CO₂. Bylo ověřeno, že po stabilizaci vykazují všechny 4 detektory hodnoty koncentrace v intervalu širokém 15 ppm. Poté bylo zahájeno dávkování CO₂ do systému cestou ETA (odpadní odsávaný vzduch). Pokles koncentrace dodávaného CO₂ patrný z grafu na obr. 5 je způsoben postupným snižováním průtoku redukčním ventilem v důsledku jeho ochlazení při vyšších (15 až 20 l/min) průtocích CO₂.



Obr. 6 Schéma aparatury pro simulaci netěsnosti vzduchotechnického zařízení
Fig. 6 Schematic diagram of the setup for simulating leakage of an air handling system



Obr. 7 Průběh koncentrací značkovacího plynu při simulaci netěsnosti
Fig. 7 Concentration profile of tracer gas in the leakage simulation

Pro jeho stabilizaci byl v experimentu úspěšně použit redukční ventil se zabudovaným elektrickým ohřevem. Bezprostředně po zahájení dávkování CO₂ do odpadního odsávaného vzduchu (ETA) detektor na pozici SUP (přívod čerstvého vzduchu do interiéru) zaregistroval důsledek uměle vytvořené netěsnosti. Systém byl ponechán beze změny více než 1 hodinu. Průběh měřených koncentrací CO₂ dokumentuje graf na obr. 7.

Stanovení netěsnosti a nejistoty měření

Pro stanovení netěsnosti byly využity hodnoty naměřené ve 30minutovém úseku (180 změřených bodů).

Vzorec pro výpočet vnitřní netěsnosti vyjádřené veličinou *EATR* (Exhaust Air Transfer Ratio) je dle normy ČSN EN 308 definován jako:

$$EATR = \frac{(c_{22} - c_{21})}{(c_{11} - c_{21})} \quad (1)$$

kde *c* s příslušnými indexy jsou koncentrace značkovacího plynu v daných místech testovací aparatury [ppm].

Průměrné hodnoty naměřených a vypočítaných veličin ze 30minutového měřeného úseku jsou uvedeny v tab. 1, kde poslední sloupec obsahuje vypočítanou hodnotu vnitřní netěsnosti (*EATR*).

Tab. 1 Naměřené průměrné koncentrace značkovacího plynu a výpočet parametru *EATR*

Tab. 1 Measured average tracer gas concentrations and calculation of the *EATR* parameter

	ETA (11) (<i>c</i> ₁₁)	ODA (21) (<i>c</i> ₂₁)	SUP (22) (<i>c</i> ₂₂)	<i>c</i> ₂₂ - <i>c</i> ₂₁	<i>c</i> ₁₁ - <i>c</i> ₂₁	<i>EATR</i>
Koncentrace CO₂ [ppm]	6271	447	604	157	5824	0,027

Norma ČSN EN 308 udává požadavky na rozšířené nejistoty měření koncentrací značkovacího plynu, a to formou vzorce, kde jako proměnné figurují jednotlivé koncentrace značkovacího plynu ve třech třídách přesnosti, viz tab. 2. Je zde také uveden požadavek na snížení hodnoty rozšířené nejistoty o 30 % v případě, že je pro měření použito více nezávislých měřidel, k čemuž v našem případě dochází.

Tab. 2 Požadavky na rozšířené nejistoty měření koncentrace značkovacího plynu dle normy ČSN EN 308

Tab. 2 Requirements for expanded uncertainties of the tracer gas concentration measurement according to ČSN EN 308

Koncentrace značkovacího plynu	Rozšířená nejistota měření pro třídu přesnosti		
	TP1	TP2	TP3
<i>c</i> ₁₁	0,05 (<i>c</i> ₁₁ - <i>c</i> ₂₁)	0,10 (<i>c</i> ₁₁ - <i>c</i> ₂₁)	0,10 (<i>c</i> ₁₁ - <i>c</i> ₂₁)
<i>c</i> ₂₁ , <i>c</i> ₂₂	0,006 (<i>c</i> ₁₁ - <i>c</i> ₂₁)	0,01 (<i>c</i> ₁₁ - <i>c</i> ₂₁)	0,02 (<i>c</i> ₁₁ - <i>c</i> ₂₁)

TP – třída přesnosti

Určení rozšířených nejistot měření detektorem popsaným v experimentální části vychází z deklarace mezní chyby výrobcem detektoru ve tvaru:

$$\Delta_{\max}(c_{\text{měř}}) = \pm(25 + 0,03 c_{\text{měř}}) \quad [\text{ppm}] \quad (2)$$

Maximální povolené rozšířené nejistoty vypočítané pro jednotlivé třídy přesnosti podle vzorců v tab. 2 pro naměřené průměrné koncentrace značkovacího plynu (pro jedno i více měřidel) a rozšířené nejistoty stanovené na základě rovnice (2) jsou uvedeny v tab. 3.

Tab. 3 Vypočítané maximální povolené a dosažené rozšířené nejistoty
 Tab. 3 Calculated maximum allowed and achieved expanded uncertainties

Koncentrace [ppm]		Rozšířená nejistota měření koncentrací dle požadavku normy pro jednotlivé třídy přesnosti						Rozšířená nejistota měření koncentrací – experiment
		TP1	TP-S 1	TP 2	TP-S 2	TP 3	TP-S 3	
c_{11}	6271	291	204	582	407	582	407	203
c_{21}	447	35	25	58	41	116	81	37
c_{22}	604	35	25	58	41	116	81	41

TP – třída přesnosti

TP-S – třída přesnosti snižená

Z porovnání maximálních, normou povolených nejistot vypočítaných dle vzorců v tab. 2 a rozšířených nejistot provedeného měření plyne, že metoda je využitelná pro měření v třídách přesnosti 2 a 3. Pro využití ve třídě přesnosti 1 je nutné snížit mezní chybu detektoru a tím rozšířené nejistoty měření.

ZÁVĚR

Provedené experimenty ukazují, že je možné CO₂ využít jako značkovací plyn pro detekci netěsností. Jeho výhody jsou vyváženy nároky na prove-

dení experimentu a detekci, ale tyto nároky je možné z technického hlediska splnit. Dosažené nejistoty měření umožňují dle informativních příkladů uvedených v normě ČSN EN 308 provádět:

- 1) funkční testy komponent pro zpětné získávání tepla v laboratorních podmínkách,
- 2) výkonové testy a testy pro účely certifikace vzduchotechnických jednotek se zpětným získáváním tepla (s komponenty pro ZZT zabudovanými výrobcem do vzduchotechnické jednotky) v laboratorních podmínkách,
- 3) in-situ výkonové testy v reálných podmínkách.

Zejména druhý bod pokrývá 90 % poptávky zkušební laboratoře po těchto typech měření, a proto je i s omezením na třídy přesnosti 2 a 3 metoda využitelná.

Kontakt na autora: david.petrides@air-lab.cz

Použité zdroje:

- [1] ČSN EN 13141-7. *Větrání budov – Zkoušení výkonu součástí/výrobků pro větrání obytných budov – Část 7: Zkoušení výkonu příváděcích a odváděcích potrubních větracích jednotek pro nucené větrání (včetně zpětného získávání tepla)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021, 60 s. Třídící znak 127131.
- [2] ČSN EN 308. *Výměníky tepla – Zkušební postupy pro stanovení výkonnosti tepelně rekuperačních komponent vzduch-vzduch*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022, 86 s. Třídící znak 696308.
- [3] Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 517/2014 ze dne 16. dubna 2014 o fluorovaných skleníkových plynech a o zrušení nařízení (ES) č. 842/2006. In: *Úřední věstník Evropské unie*. 2014, svazek 57, L 150, s. 195–230. ISSN 1977-0626. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517&from=EN>