

MĚŘENÍ PROVOZNÍCH VELIČIN V CUKROVARNICTVÍ

Měření vlhkosti v plynech

MEASUREMENT OF PROCESS VARIABLES IN SUGAR INDUSTRY:
HUMIDITY MEASUREMENT IN GASES

Karel Kadlec, Dušan Kopecký – Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

Vlhkost, podobně jako teplota má vliv na celou řadu přírodních a technologických procesů, a proto zjišťování vlhkosti je důležitou součástí technologických měření. V tomto článku jsou uvedeny způsoby vyjadřování vlhkosti a metody využívané pro měření vlhkosti v plynech.

Vyjadřování vlhkosti

Absolutní vlhkost Φ vyjadřuje podíl hmotnosti vodní páry $m_{\text{H}_2\text{O}}$ k objemu vlhkého vzduchu V_{vl} . Jedná se vlastně o vyjádření hustoty vodní páry.

$$\Phi = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{vl}}} \quad (1)$$

Absolutní vlhkost závisí na teplotě a tlaku. Vzhledem k této skutečnosti se vyjádření absolutní vlhkosti v praxi používá velmi zřídka.

Molární zlomek x vyjadřuje podíl látkového množství vodní páry $n_{\text{H}_2\text{O}}$ a celkového látkového množství plynu, tj. vodní páry a vzduchu.

$$x_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{vzd}}} \quad (2)$$

Objemový zlomek φ_V vyjadřuje podíl objemu vodní páry a celkového objemu vlhkého plynu.

$$\varphi_V = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{vzd}}} \quad (3)$$

V případě ideálního plynu je objemový zlomek nezávislý na teplotě a tlaku plynu.

Relativní vlhkost φ je definována jako poměr molárního zlomku vodní páry při dané teplotě a celkovém tlaku k molárnímu zlomku nasycené vodní páry za stejné teploty a tlaku.

$$\varphi = \frac{x_{\text{H}_2\text{O}}}{x_{\text{H}_2\text{O, nas}}} \quad (4)$$

Relativní vlhkost můžeme vyjádřit ještě dalšími vztahy. Vztah (5) vyjadřuje relativní vlhkost jako poměr absolutní vlhkosti plynu Φ k vlhkosti plynu s nasycenými párami vody za téže teploty a tlaku.

$$\varphi = \frac{\Phi}{\Phi_{\text{nas}}} \quad (5)$$

Vztah (6) vyjadřuje relativní vlhkost jako poměr parciálního tlaku vodní páry k parciálnímu tlaku nasycené vodní páry.

$$\varphi = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2\text{O, nas}}} \quad (6)$$

Vyjádření vlhkosti formou relativní vlhkosti v % ($\varphi \cdot 100$) patří k nejčastěji využívaným způsobům v technické praxi (1).

Teplota rosného bodu t_{rb} odpovídá teplotě, na kterou musí být vlhký plyn izobaricky ochlazen, aby došlo k jeho úplnému nasycení, které je při teplotách nad 0 °C indikováno kondenzací vodní páry, pod 0 °C pak tvorbou námrazy. Při teplotě rosného bodu již vzduch není schopen přijímat žádnou vodní páru, vzduch je vodními parami nasycen.

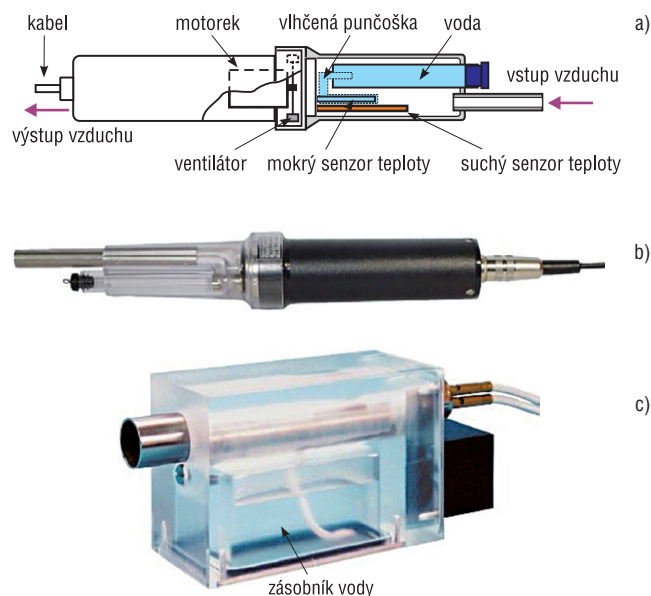
Metody a přístroje pro měření vlhkosti v plynech

Pro určení vlhkosti v plynu existuje velké množství měřicích metod od jednoduchých a dlouho využívaných v praxi až po velmi sofistikované charakterizované složitým technickým zařízením.

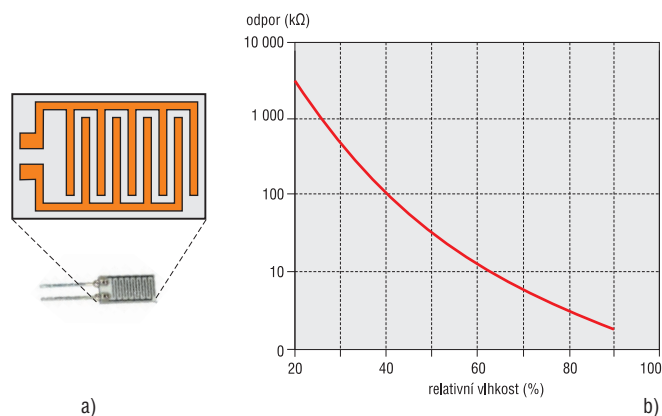
Psychrometrické vlhkoměry

Psychrometrický vlhkoměr patří k vlhkoměrům, které se používají již dlouhou dobu. Vlhkoměr je tvořen dvěma teploměry: „suchým“ a „mokrým“, který je opatřen vlhčenou punčoškou

Obr. 1. Psychrometrický vlhkoměr: a) schéma, b) ruční psychrometr FNAD 46, c) stacionární psychrometr FNAD 46-3 se zásobníkem vody pro vlhčení punčošky při dlouhodobém měření (www.ahlborn.cz)



Obr. 2. Odporový senzor vlhkosti

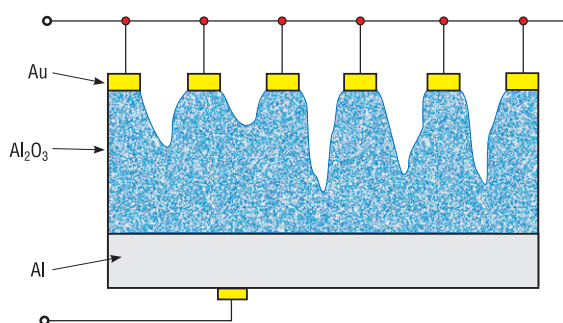


(v klasickém provedení se používají skleněné teploměry). Při proudění měřeného vzorku vzduchu psychrometrickým vlhkoměrem dochází k adiabatickému sycení vzduchu vodní parou. Odpařováním vody z „mokrého“ teploměru se odebírá výparné teplo z jeho těsného okolí, což způsobuje pokles teploty. Při měření musí být splněny určité podmínky, např. rychlost proudění vzduchu okolo teploměru musí dosahovat určité stanovené hodnoty. Při splnění těchto podmínek lze z naměřeného rozdílu teplot suchého a mokrého teploměru vypočítat parciální tlak vodní páry v měřeném vzduchu, a pak stanovit relativní vlhkost měřeného vzduchu. Relativní vlhkost se odečítá z tabulek nebo z psychrometrického diagramu; u automatických přístrojů je zpracování signálu řešeno vhodným programovým vybavením. Čím menší bude relativní vlhkost měřeného vzduchu, tím intenzivněji se bude odpařovat voda ze zvlhčovaného teploměru, a tím větší bude tzv. psychrometrický rozdíl.

U přístrojů s elektrickým výstupem a s elektronickým vyhodnocením signálu se k měření teploty používají odporové teploměry. Výsledný signál odpovídající měřené vlhkosti počítá elektronika přístroje z naměřené psychrometrické difference. Konstantní rychlost proudícího vzduchu je udržována regulací otáček elektromotoru ventilátoru (obr. 1.a). Přesnost psychrometru závisí na přesnosti použitých teploměrů. Na obr. 1.b, c jsou ruční a stacionární digitální psychrometry od firmy Ahlborn se dvěma kalibrovanými Pt100-čidly. Psychrometry jsou vybaveny automatickou kompenzací vlivu barometrického tlaku; čidlo atmosférického tlaku je integrováno v konektoru psychrometrického snímače (2).

Psychrometrická metoda měření vlhkosti je vhodná pro měření vysokých hodnot relativní vlhkosti. Naopak při měření nízkých hodnot relativní vlhkosti (pod 20 %) nedává přesné výsledky (nedochází k úplnému ochlazení mokrého teploměru).

Obr. 3. Mikroelektronický odporový senzor vlhkosti



Současné přístroje prodávané pod názvem **digitální psychrometr** nevyužívají původní psychrometrickou metodu měření. Relativní vlhkost měří na základě jiného funkčního principu, např. kapacitním senzorem. Ze změřené relativní vlhkosti a teploty měřeného vzorku (např. externím termočlánkem) dopočítávají teplotu vlhkého teploměru, přičemž využívají pouze psychrometrických tabulek uložených v paměti přístroje. Výstupem přístroje je obvykle relativní vlhkost, teplota, rosný bod, teplota vlhkého teploměru. Měřicí rozsah relativní vlhkosti bývá 20 až 90 %, přesnost ± 2 %.

Sorpční vlhkoměry

Sorpční vlhkoměry využívají hygrometrickou metodu a jsou založeny na změně fyzikálně-chemických vlastností materiálu v závislosti na rovnovážném stavu adsorpce a desorpce vodní páry z tohoto materiálu. Vlhkost sorbovaná materiálem může působit změny délky, objemu nebo hmotnosti, elektrického odporu, permitivity vhodných látek. Podle toho pak rozeznáváme sorpční vlhkoměry dilatační, rezonanční, odporové, kapacitní, aj.

Dilatační vlhkoměry využívají k měření vlhkosti změnu rozměru některých organických látek vlivem vlhkosti. Jako citlivý element se používají lidské vlasy, živočišné blány nebo syntetické organické látky. Tyto látky absorbují vodu v závislosti na relativní vlhkosti okolního vzduchu a změnou obsahu vody mění svoje rozměry – dilatují. Dilatace se přenáší mechanismem na ukazatel kalibrované stupnice. Nevýhodou těchto přístrojů je, že neposkytují elektrický výstupní signál.

Senzor **odporového vlhkoměru** je vytvořen tak, že na nevodivém substrátu (sklo, plast, keramika) jsou vytvořeny obvykle litografickou technikou dvě elektrody (nejčastěji platinové). Tyto elektrody jsou provedené nejčastěji ve formě dvou hřebínků (tzv. interdigitální uspořádání), a jsou napařeny na keramickém podkladu (obr. 2.a). Elektrody jsou pokryty hydrofilním materiálem, kterým mohou být iontové soli (např. LiCl, CaCl₂ aj.), směsi na bázi oxidů kovů (ZnO, Cr₂O₃, Fe₂O₃), nebo polymery (kopolymer styrenu a divinylbenzenu, polyamidy aj.). Množství sorbované vody vyvolá příslušnou změnu elektrického odporu. Elektrický odpor senzoru bývá 1 kΩ až 100 MΩ. Závislost odporu na relativní vlhkosti je přibližně exponenciální (obr. 2.b). Senzor je citlivý na orosení (kondenzaci) a nelze ho použít při vyšších teplotách. Vyhodnocovací obvod musí být napájen střídavým napětím, aby se předešlo polarizaci elektrod. Velikost odporu je závislá nejen na relativní vlhkosti, ale i na teplotě. Proto je potřeba měřicí systém teplotně stabilizovat.

Mikroelektronický odporový senzor vlhkosti je realizován na hliníkové elektrodě, na níž je vytvořena vrstvička oxidu hlinitého (tloušťka několik μm) překrytá extrémně tenkou vrstvou zlata, která propouští vodní páru (obr. 3). Odpor mezi zlatou a hliníkovou elektrodou je závislý na množství vody sorbované v porézní vrstvě Al₂O₃, a je tedy funkcí vlhkosti měřeného plynu.

Podobnou strukturu může mít i **kapacitní senzor vlhkosti**, jehož dielektrikum bude tvořeno z vhodného hygroskopického materiálu na bázi oxidu hlinitého nebo vhodného polymeru. Podstatnou součástí kapacitního vlhkoměru je kondenzátor, jehož dielektrikum tvoří tenká vrstvička materiálu vratně sorbujícího vlhkost z prostředí. Provedení kapacitního senzoru je podobné mikroelektronickým odporovým senzorům (obr. 4.). Dielektrikum, které tvoří obvykle film polymeru nebo kového oxidu (nejčastěji Al₂O₃, nebo SiO₂), je umístěno mezi zlatými elektrodami nebo překrývá interdigitální elektrody.

Při sorpci vlhkosti materiálem se mění elektrický odpor a kapacita, tzn. impedance. Výhodou měření kapacitní složky je na jedné straně mimořádná citlivost na změny vlhkosti v plynné fázi a na druhé straně relativně malá citlivost na znečištění povrchu senzoru. Jedna z elektrod je porézní (obvykle tenká zlatá vrchní elektroda), umožňující difúzi vodní páry do dielektrika. Snímače vlhkosti bývají doplněny senzory teploty (obr. 4.b, c), případně tlaku, jejichž údaje umožňují přepočítat vlhkost na vztažné podmínky.

Přestože množství sorbované vody je poměrně malé, díky její velké permitivitě jsou změny kapacity velmi dobře měřitelné; řádově činí 0,1 % z celkové kapacity na každé % rel. vlhkosti. Závislost kapacity senzoru na relativní vlhkosti je téměř lineární.

Kapacitní senzor si lze představit jako paralelní kombinaci pomyslného fixního kondenzátoru C_1 , jehož kapacita je dána geometrií senzoru s permitivitou dielektrika při nulové koncentraci vodní páry a pomyslného kondenzátoru C_2 s proměnnou kapacitou, která se mění v závislosti na množství vody absorbované v dielektriku (obr. 5.a). Zatímco permitivita čistého Al_2O_3 $\epsilon_r = 9$, tak permitivita vody je značně větší $\epsilon_r = 80$. Celková kapacita je dána součtem $C = C_1 + C_2$. Celková změna kapacity senzoru se vyhodnocuje vysokofrekvenčním elektronickým obvodem, jehož blokové schéma je na obr. 5.b.

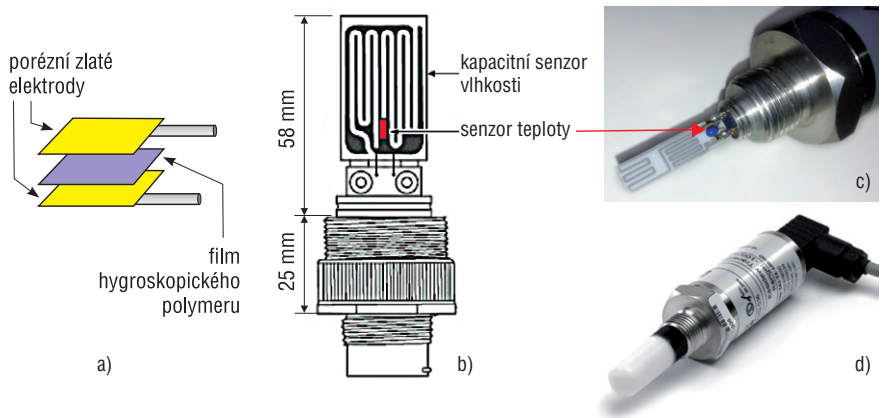
Kapacitní senzory se vyrábějí v integrovaném provedení s obvodu pro zpracování signálu, kdy výstupem je místo kapacity elektrické napětí nebo digitální signál odpovídající obsahu vlhkosti v plynu. Senzory se vyznačují: malou závislostí údaje na teplotě, odolností vůči kondenzaci, dobou odezvy řádu desítek sekund, přičemž dynamické chování senzoru se liší při nárůstu vlhkosti a při poklesu vlhkosti. Přesnost měření relativní vlhkosti je v jednotkách %. Senzory vykazují velmi dobrou citlivost a lze je použít pro měření vlhkosti plynů i kapalin.

Vlhkoměry kondenzační

Kondenzační vlhkoměry využívají pro stanovení vlhkosti metody **měření teploty rosného bodu**. Princip metody vychází ze stanovení teploty povrchu vody, při níž se ustavuje dynamická rovnováha mezi množstvím vody vypařující se z povrchu a množstvím molekul vodní páry dopadajících na tento povrch z přilehlé vrstvy plynu. V rovnovážném stavu bude relativní vlhkost této hraniční vrstvy rovna 100 % a teplota bude odpovídat rosnému bodu. Z jeho teploty lze stanovit parciální tlak vodní páry a vypočítat vlhkost plynu.

Schéma uspořádání měřicí části kondenzačního vlhkoměru, označovaného někdy jako **zrcátkový** nebo **optický**, je na obr. 6. Proud vlhkého vzduchu obtéká kovové zrcátko vytvořené např. napařenou vrstvou zlata či rhodia na měděné destičce, která je chlazená či ohřívána Peltierovým článkem. Při postupném ochlazení dochází v okamžiku dosažení teploty rosného bodu k orosení zrcátka; stav orosení je vhodným způsobem detekován.

Obr. 4. Kapacitní senzor vlhkosti: a) principiální schéma, b) uspořádání senzoru, upraveno podle (3), c) keramický senzor snímače Michell (www.michell.com), d) snímač s převodníkem Michell (v ČR dodává Tectra, a. s., www.tectra.cz)



Prostřednictvím regulačního obvodu je proud Peltierova článku řízen tak, aby na zrcadle byla udržována teplota rosného bodu. Teplota rosného bodu je měřena vhodným teploměrem.

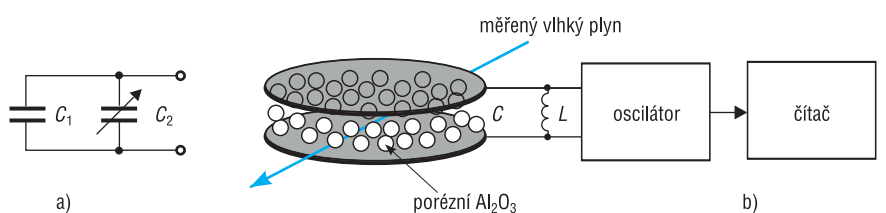
K detekci orosení, případně ojištění zrcátka se používá několik různých způsobů:

- **fotoelektricky** (při orosení zrcátka se změní intenzita dopadajícího záření na detektor);
- **konduktometricky** (místo kovového zrcátka je použita destička z dielektrického materiálu (např. sklo), jehož povrchový odpor se změní při orosení nebo ojištění);
- **piezoelektricky** (detekčním elementem je krystal kmitající s rezonanční frekvencí; při kondenzaci vlhkosti se mění hmotnost krystalu a také rezonanční frekvence);
- **radiačně** (povrch zrcátka je pokryt vrstvičkou radioaktivního materiálu a orosení zrcátka je detekováno jako zeslabení α nebo β záření vyzařovaného z jeho povrchu).

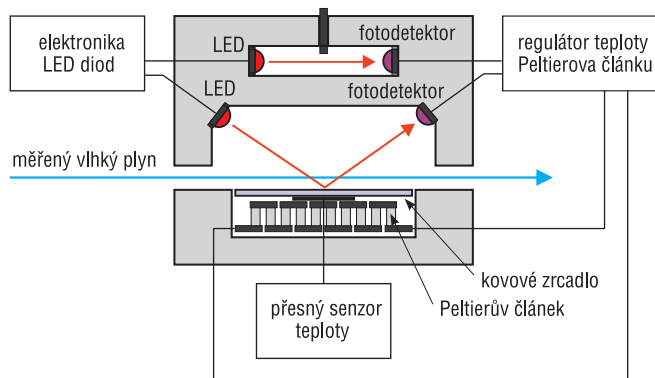
Teplota zrcátka se měří obvykle miniaturním kovovým či polovodičovým odporovým teploměrem, nebo termočlánkem. Výstupním signálem je buď hodnota teploty rosného bodu, nebo jiný údaj vyjadřující vlhkost plynu.

Zrcátkové měřicí systémy jsou velmi přesné, avšak obsahují velmi zranitelnou optickou soustavu, kterou protéká měřený plyn. Vzhledem k tomu, že měřený plyn ve většině průmyslových aplikací není zcela čistý, může docházet při kontinuálním měření ke změnám optických vlastností měřicí cely. Znečištění zrcadla může způsobit chybu měření vlhkosti, a proto některé systémy bývají vybaveny automatickým čištěním zrcadla. Optické systémy jsou však vynikající pro ověřování a kalibraci vlhkoměrů pracujících na jiném fyzikálním principu nebo pro krátkodobá kontrolní měření.

Obr. 5. Měření vlhkosti kapacitním senzorem



Obr. 6. Schéma optického (zrcátkového) kondenzačního vlhkoměru



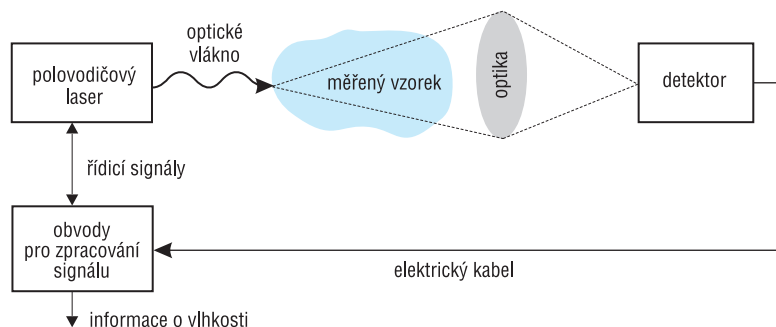
IČ vlhkoměry a mikrovlnné vlhkoměry

U moderních vlhkoměrů se využívá absorpce infračerveného a mikrovlnného záření vodní parou přítomnou v plynné směsi. Metody využívající absorpci či reflexi infračerveného nebo mikrovlnného záření se využívají u moderních bezdotykových snímačů pro měření vlhkosti v kapalinách i pevných látkách. Tyto přístroje jsou zpravidla vysoce selektivní, protože využívají charakteristické absorpční pásy molekul vody, respektive vysokou relativní permitivitu vody. Výhodou kapalných či pevných fází oproti fází plynné je hmotnější prostředí, které způsobuje vyšší míru absorpce, a tím i dostatečnou změnu signálu, kterou lze snadno vyhodnocovat. Principy přístrojů pro měření vlhkosti kapalných či pevných fází budou popsány v příštím čísle časopisu.

Při měření vlhkosti v plynné fázi je situace komplikovanější, protože obsah vody v plynném prostředí je zpravidla nižší a pro získání měřitelné změny signálu je nutné zajistit delší měřicí dráhu, kterou bude záření procházet. V některých případech obsahuje měřený vzorek řadu interferujících složek a pak je nutné spektrometr naladit na daný charakteristický pás. Pokroky v technice infračervených analyzátorů však umožnily zkonstruovat nové typy vysoce selektivních IČ analyzátorů, které pracují na principu laserové absorpce a uvedené problémy překonávají.

Velmi aktuální metodou, která se postupně dostává do oblasti průmyslového měření, je absorpční spektroskopie s laditelným diodovým laserem TDLAS (*Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy*). Tuto metodu lze využít na měření koncentrace různých plynů (např. methanu) i pro měření vodní páry. Kromě toho lze zároveň vyhodnocovat také další parametry měřeného plynu, jako je teplota, tlak, rychlost a hmotnostní průtok.

Obr. 7. Schéma laserové absorpce využívající laditelnou laserovou diodu (TDLAS), upraveno podle (4)



Principiální schéma je na obr. 7. Základní součástí je polovodičová dioda (např. InGaAsP/InP laditelná v IČ oblasti od 900 nm do 1,6 μm nebo InGaAsP/InAsP laditelná od 1,6 μm do 2,2 μm). Ladění probíhá buď teplotně (lze ladit v širokém rozsahu vlnočtů, ale s delší časovou prodlevou), nebo změnou budicího proudu diody (lze přeladovat rychle v úzkém pásmu vlnočtů).

Dioda je naladěna na absorpční pásy molekul vody a při průchodu měřeným prostředím dochází podle Lambert-Beerova zákona k absorpci záření a tento úbytek je detekován pomocí fotodiody. Při skenování absorpčního spektra lze získat také informaci o teplotě měřeného plynu, která je počítána z poměrů integrálů dvou absorpčních pásů a dále je možno na základě posunu absorpčního pásu dopočítat i rychlost proudícího média pomocí Dopplerova efektu. TDLAS dosahuje velmi nízkých detekčních limitů v řádu jednotek ppb a je limitována pouze šumem laserové diody a velikostí absorpce.

Souhrn

V příspěvku jsou popsány funkční principy vlhkoměrů využívaných k měření vlhkosti v plynné fázi (psychrometry, sorpční vlhkoměry (dilatační, odporové a kapacitní), optické (zrcátkové) kondenzační vlhkoměry a moderní IČ a mikrovlnné vlhkoměry). Úvodní část článku poskytuje přehled o tom, jak lze vyjádřit parametry vlhkosti.

Klíčová slova: měření vlhkosti v plynech, psychrometr, sorpční vlhkoměry, IČ a mikrovlnné vlhkoměry.

Literatura

1. KOPECKÝ, D.; KADLEC, K.: *Měření vlhkosti*. In KADLEC, K. ET AL. (EDIT.): *Měření a řízení chemických, potravinářských a biotechnologických procesů*. Ostrava: Key Publishing, 2017, s. 362–390.
2. *Digitale Psychrometer FNAD 46 und FNAD 46-3*. Katalog 06/2018. Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH.
3. LIPTÁK, B. G.: *Process Measurement and Analysis*. CRC Press Boca Raton, 2003.
4. WEGELIN, V.: *Moisture in Air*. In LIPTÁK, B. G. (EDIT.): *Instrument and Automation Engineers' Handbook*. Fifth edition, Vol. II, Analysis and Analyzers, CRC Press Boca Raton, 2017.

Kadlec K., Kopecký D.: Measurement of Process Variables in Sugar Industry: Humidity Measurement in Gases

This paper describes the functional principles of hygrometers utilized for measuring humidity in the gaseous phase (psychrometers, sorption hygrometers (of mechanical, resistive and capacitive type), optical dew-point hygrometers and modern IR and microwave hygrometers). The introductory part of this article gives an overview of how humidity parameters can be expressed.

Key words: humidity measurement in gases, psychrometers, sorption hygrometers, IR and microwave hygrometers.

Kontaktní adresa – Contact address:

doc. Ing. Karel Kadlec, CSc., Vysoká škola chemicko-technologická, Fakulta chemicko-inženýrská, Ústav fyziky a měřicí techniky, Technická 5, 166 28 Praha 6 – Dejvice, Česká republika, e-mail: karel.kadlec@vscht.cz