

MĚŘENÍ PROVOZNÍCH VELIČIN V CUKROVARNICTVÍ

Měření množství tepla

MEASUREMENT OF PROCESS VARIABLES IN SUGAR INDUSTRY: HEAT MEASUREMENT

Karel Kadlec – Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

Měření množství tepla je základním předpokladem pro platby za odebrané teplo, nebo pro hodnocení ekonomiky určité části provozu, či pro optimální provoz a řízení zdroje tepla. Z dlouhodobého hlediska poskytuje měření tepla informace pro posouzení velikosti tepelných ztrát a technického stavu zařízení.

Princip měřičů přeneseného tepla

Teoretickým základem měřičů tepla předávaného teplotnosnou látkou (voda, pára) je vztah pro výpočet tepelného výkonu:

$$P_q = Q_m \cdot (b_1 - b_2) \quad (1)$$

kde P_q je tepelný výkon (W), Q_m hmotnostní průtok teplotnosné látky ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$), b_1 , resp. b_2 měrné entalpie teplotnosné látky na vstupu resp. na výstupu tepelné sítě ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Měření tepla přenášeného kapalným médiem

Tepelný výkon P_q je podle rovnice (1) vypočten ze součinu hmotnostního průtoku teplotnosné látky Q_m a rozdílu měrných entalpií teplotnosné látky na vstupu a na výstupu tepelné sítě b_1 a b_2 . Měrnou entalpii kapalně teplotnosné látky b však není možné zjistit přímým měřením, ale pouze výpočtem ze vztahu:

$$b = c_p \cdot (t - t_{\text{ref}}) \quad (2)$$

kde c_p je měrná tepelná kapacita teplotnosné látky ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$), t teplota teplotnosné látky ($^{\circ}\text{C}$), t_{ref} referenční teplota (obvykle 0°C).

Jestliže hmotnostní průtok Q_m nahradíme průtokem objemovým Q_V ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) a podle vztahu (2) dosadíme do vztahu (1), pak dostaneme:

$$P_q = Q_V \cdot (\rho_1 \cdot c_{p1} \cdot t_1 - \rho_2 \cdot c_{p2} \cdot t_2) \quad (3)$$

kde jsou ρ a c_p hustoty ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) a měrné tepelné kapacity ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$) teplotnosné látky na vstupu (index 1) a výstupu (index 2) tepelné sítě. Hustota a měrná tepelná kapacita obecně závisí na teplotě.

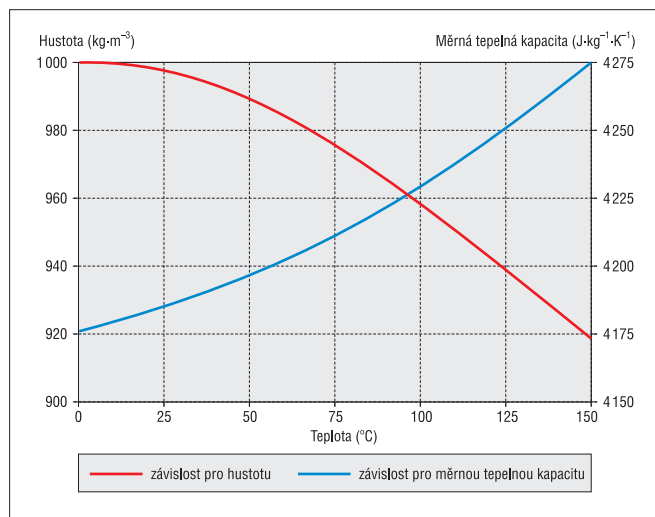
Pokud je teplotnosným médiem voda, pak v důsledku opačných průběhů hustoty a měrné tepelné kapacity v závislosti na teplotě (obr. 1.), lze v určitém rozmezí provozních teplot považovat hodnotu součinu hustoty a měrné tepelné kapacity za velmi málo závislou na teplotě a tento součin je pak možno nahradit tzv. tepelným součinitelem k ($\text{J} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{K})^{-1}$). V praxi jsou hodnoty tepelného součinitele uloženy v paměti vyhodnocovací jednotky a není nutné je nastavovat (3).

S využitím tepelného součinitele pak získáme základní vztah pro tepelný výkon předávaný vodou jako teplotnosným médiem:

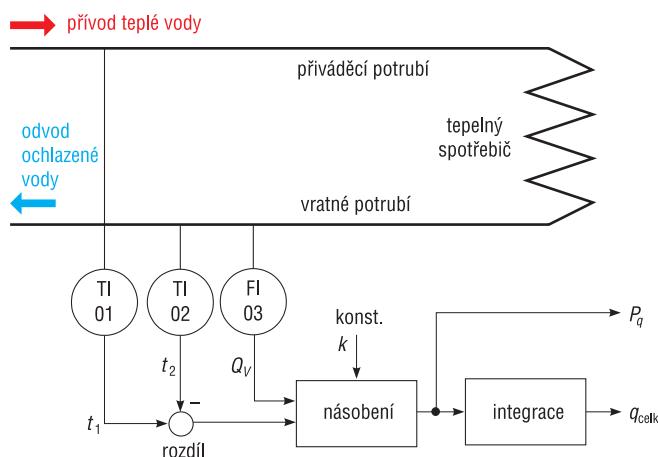
$$P_q = Q_V \cdot k \cdot (t_1 - t_2) \quad (4)$$

Z tohoto teoretického vztahu plyne, že pro vyhodnocení tepelného výkonu P_q je třeba měřit objemový průtok Q_V a teplotní rozdíl $(t_1 - t_2)$.

Obr. 1. Závislost hustoty a měrné tepelné kapacity vody na teplotě



Obr. 2. Základní uspořádání zařízení pro měření tepla předávaného vodou



Obr. 3. Přístroj SONOTHERM SN3070 pro měření tepla předávaného vodou



Celkové odebrané teplo q_{celk} (J nebo W·s) se získá integrací tepelného výkonu P_q za časový interval od τ_1 do τ_2 :

$$q_{\text{celk}} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} P_q \cdot d\tau \quad (5)$$

Zjednodušený výpočet podle vztahu (4) lze využít jen při měření v teplovodních sítích. V horkovodních sítích by zjednodušení znamenalo zanesení poměrně velkých chyb, protože jak hustota vody, tak její měrná tepelná kapacita se s teplotou značně mění. V těchto případech je nutno při výpočtu závislosti na teplotě respektovat a použít vztah (3).

Schéma na obr. 2. ukazuje obecné zapojení zařízení pro měření tepelného výkonu a spotřebovaného tepla předávaného kapalným teplosměnným médiem (nejčastěji vodou).

Základní součásti, které tvoří zařízení pro měření tepla přenášeného vodou, jsou: snímač průtoku FI 03, párované teploměry TI 01 a TI 02 a vyhodnocovací jednotka, která vypočítává tepelný výkon a předané teplo podle vztahů (4) a (5).

Jako snímače teploty se nejčastěji používají párované odporové teploměry Pt100 nebo Pt500 ve čtyřvodičovém zapojení. Průtok se měří ve větvi s ochlazenou vodou a k měření se u kompaktních měřičů využívají průtokoměry lopatkové nebo turbínové, ultrazvukové a indukční (za předpokladu dostatečné elektrické vodivosti vody), u výkonnějších průmyslových měřičů tepla se používají průtokoměry s primárními (škrticími) prvky (se clonou), ultrazvukové a vírové.

Mikroprocesorem řízená vyhodnocovací jednotka (kalorimetrické počítačové) vyhodnocuje množství tepla při zohlednění hustoty a měrné tepelné kapacity teplosměnného média, případně pomocí tepelného součinitele k . Vyhodnocovací jednotka je vybavena displejem, na kterém se zobrazují aktuální hodnoty tepelného výkonu a množství předávaného tepla, dále je možno zobrazit momentální průtok média, teploty na vstupu a výstupu, max. hodnoty apod.

Na obr. 3. je provozní měřidlo tepla SONOTHERM SN3070 (www.elis.cz). Přístroj je stanoveným měřidlem pro

Obr. 4. Ultrazvukový průtokoměr Krohne UFM 3030 v potrubí při měření tepla



absolutní měření tepla předávaného vodou. Měřicí systém se skládá z ultrazvukového průtokoměru, párových odporových snímačů teploty a vyhodnocovací elektroniky.

Průtokoměry pro průmyslové měření tepla musí splňovat řadu požadavků: musí mít malou nejistotu měření, dlouhodobou stabilitu a opakovatelnost měření i při náročných provozních podmínkách. Takovým požadavkům vyhovují např. ultrazvukové průtokoměry. Na obr. 4. je ultrazvukový průtokoměr Krohne UFM 3030 s velmi dobrými metrologickými parametry zapojený do měřicí trati při měření tepla (4).

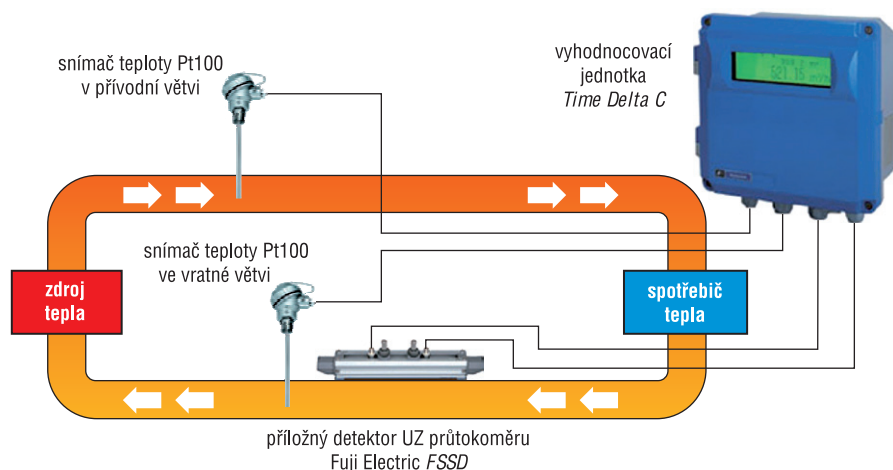
Pro vyhodnocování spotřeby tepla lze využít dvoukanálovou vyhodnocovací jednotku Time Delta C od společnosti Fuji Electric (v ČR dodává Amtek, spol. s r. o., dále jen Amtek). Zařízení, které umožňuje měření teploty ve dvou místech a současně měření průtoku ultrazvukovým příložným průtokoměrem je ukázáno na obr. 5.

Měření tepla přenášeného vodní párou

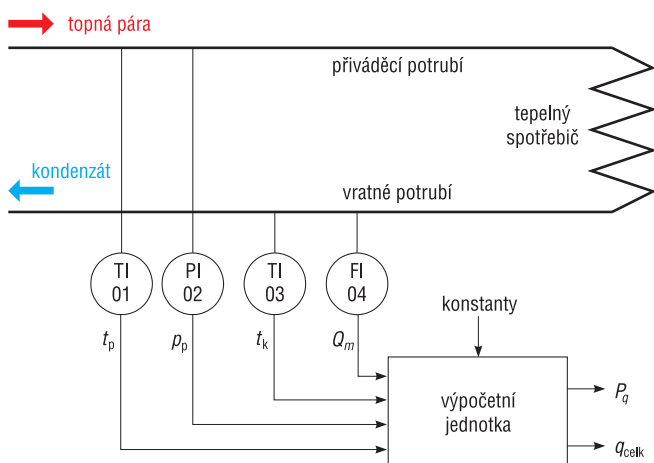
Pro tepelný výkon předávaný kondenzující párou P_q platí vztah:

$$P_q = Q_m \cdot c_{\text{páry}} \cdot (t_p - 100) + Q_m \cdot \Delta_{\text{vyp}} H + Q_m \cdot c_{\text{vody}} \cdot (100 - t_k) \quad (6)$$

Obr. 5. Měření spotřeby tepla s dvoukanálovou vyhodnocovací jednotkou Time Delta C



Obr. 6. Základní uspořádání zařízení pro měření tepla předávaného párou



kde je Q_m hmotnostní průtok vody, $c_{páry}$, c_{vody} měrné tepelné kapacity páry a vody (obecně závisí na teplotě), $\Delta_{vyp}H$ měrná výparná entalpie vody (měrné skupenské teplo kondenzační), t_p teplota páry v příváděcí potrubí tepelné sítě, t_k teplota kondenzátu ve vratném potrubí tepelné sítě. Jednotlivé členy v rovnici (6) představují tepelné výkony předávané:

- ochlazením přehřáté páry na teplotu kondenzace (100 °C),
- kondenzací páry,
- ochlazením vody na teplotu odcházejícího kondenzátu.

Parametry, které se měří, jsou vyznačeny ve schématu na obr. 6. Jsou to teplota t_p a tlak p_p páry, teplota t_k kondenzátu, průtok Q_m teplotnosného média. Může se měřit buď průtok páry (přímá metoda) (1), nebo průtok kondenzátu (nepřímá metoda) (2). Měří-li se objemové průtoky, pak jsou ve výpočetní jednotce přepočteny na hmotnostní průtoky.

Při poklesu parametrů páry pod mez sytosti (mokrý pára) se používá pro výpočet množství tepla tzv. náhradní metoda, při které se výpočet doplňuje korekčním součinitelem dohodnutým mezi dodavatelem a odběratelem tepla (1, 2).

K měření teploty se používají párované odporové teploměry ve čtyřvodičovém zapojení, k měření průtoku se používají měřidla se škrticími orgány, ultrazvukové a vírové průtokoměry.

Výpočetní jednotka obsahuje matematický člen pro výpočet tepelného výkonu a množství přeneseného tepla. Při výpočtech jsou respektovány potřebné korekce měrných tepelných

kapacit a hustoty v závislosti na provozní teplotě a tlaku. Mikroprocesorem řízená výpočetní jednotka poskytuje na displeji údaje o tepelném výkonu, množství tepla, průtoku a proteklém množství teplotnosného média, teplotách, tlaku i o příslušných součinitelích a konstantách.

Na obr. 7. a 8, jsou ukázky přístrojové techniky využívané pro měření množství tepla předávaného v parních tepelných sítích. Na obr. 7. je ultrazvukový měřič průtoku kondenzátu *Ultraheat UH50* (www.landisgyr.eu) s vyhodnocovací jednotkou pro měření množství tepla.

Na obr. 8. a je vírový průtokoměr s integrovanou tlakovou a teplotní kompenzací *Optiswirl 4200 C* (www.krohne.cz). K měření tedy nejsou zapotřebí další snímače pro měření tlaku a teploty páry; jako výstup je k dispozici údaj o hmotnostním průtoku. Obr. 8. b ukazuje clonové měřidlo průtoku s integrovaným teplotním snímačem *Rosemount 3051SFC* (www.emersonprocess.cz).

Použití měřičů tepla

Měřiče tepla pro kapalná teplotnosná média je možno využít k měření tepla nebo chladu. Nacházejí uplatnění v komunálních teplárenských sítích, při vytápění a chlazení průmyslových objektů a využívají se zejména jako fakturační měřidla. Měřiče tepla přenášeného párou lze využít při používání páry k čištění a sterilizaci v potravinářském a farmaceutickém průmyslu. Investice do měření tepla se vyplatí, protože umožní efektivněji využívat teplotnosná média, a tím snižovat provozní náklady.

Některé přístroje jsou vybavené datalogerem (záznamníkem dat), který umožňuje ukládání naměřených hodnot do paměti v požadovaném formátu včetně časového údaje, který je důležitý např. při fakturaci. Používá-li se měřidlo pro fakturaci, musí se jednat o stanované pracovní měřidlo ve smyslu § 3 zákona o metrologii č. 505/1990 Sb., a tato měřidla podléhají povinnému úřednímu ověření.

Měřidla tepla bývají vybavena komunikačním rozhraním (Ethernet, Modbus nebo M-Bus) a díky tomu lze měřidlo integrovat do řídicího a informačního systému závodu či teplárenské sítě.

Obr. 8. Průtokoměry využívané v sestavách pro měření tepla v páře: a) vírový průtokoměr *Optiswirl 4200 C*, b) průřezový kompaktní průtokoměr *Rosemount 3051SFC*Obr. 7. Ultrazvukový měřič kondenzátu *Ultraheat UH50*

Souhrn

V článku jsou popsány metody používané jednak pro měření tepla přenášeného kapalným médiem, jednak pro měření tepla přenášeného vodní párou. Je vysvětlen teoretický popis funkce měřičů tepla, skladba měřicího zařízení a ukázky provozních přístrojů.

Klíčová slova: měření tepla; principy měřičů tepla; použití měřičů tepla.

Literatura

1. *Měření tepla v páře přímou a náhradní metodou STEAMTHERM ST 4000*. ELIS Plzeň, [online] www.elis.cz/cs/produkty/merice-tepla-v-pare/system-mereni-tepla-v-pare-steamtherm-st4000.html, cit. duben 2017.
2. *Měření tepla v páře nepřímou a náhradní metodou STEAMTHERM ST 5000*. ELIS Plzeň, [online] www.elis.cz/cs/produkty/merice-tepla-v-pare/system-mereni-tepla-v-pare-steamtherm-st5000.html, cit. říjen 2016.
3. KADLEC, K.: Měření množství tepla. *Automa*, 2016, (4), s. 8–10.
4. KOMP, P.: Měření průtoku horké vody v průmyslu v soupravách pro měření množství tepla. *Automa*, 2010, (11), s. 46–47.

Kadlec K.: Measurement of Process Variables in Sugar Industry: Heat Measurement

The paper describes methods used both for the measurement of heat transferred by liquid medium and for the measurement of heat transferred by steam. The article explains the operating principle of heat meters, describes the construction of measuring devices and provides examples of their use in practice.

Key words: heat measurement; principles of heat meters; application of heat meters.

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