

Výpočet spotřeby tepla a vzduchu při hvozdění sladu spaliny zemního plynu

683.434.620.9
621.5 662.89

Ing. TOMÁŠ LEJSEK, CSc., Výzkumný ústav pivovarský a sladařský v Praze

Se snahou o racionální využití ušlechtilých druhů paliv stoupá i zájem o přímé použití spalin ze zemního plynu k hvozdění sladu. Výhodou je značné zjednodušení v systému vytápění hvozdu a snížení nákladů na stavbu, obsluhu i údržbu topeniště a zařízení rozvodu tepla. Odpadají kalorifery a popřípadě další převodníky tepla, jejich nepřijemné čištění, údržba i tepelné ztráty. Naproti tomu je nevýhodou, že při spalování vznikající voda zvyšuje vlhkost sušících spalin, a proto se zvyšuje spotřeba vzduchu a tepla k hvozdění.

Určení entalpie a vlhkosti spalin

Uvažujeme spalování plynu při součiniteli přebytku vzduchu = 1. Při teoreticky nutné hmotnosti vzduchu M_v kg na 1 kg plynu je hmotnost kouřových plynů součtem hmotnosti suchých plynů M_{sp} a vodní páry M_w :

$$1 + M_v = M_{sp} + M_w$$

Podle složení plynu je možno určit hmotnost suchých spalin M_{sp} . Hmotnost vodní páry obsažené v produktech spalování je součtem vlhkosti obsažené ve vzduchu, vody obsažené v palivu a hmotnosti vody získané spalováním vodíku. Spálením 1 kg vodíku se získá 9 kg vody.

$$M_w = x_v \cdot M_v + W + 9H$$

Měrná vlhkost produktů spalování bude

$$x_{sp} = \frac{M_w}{M_{sp}} = x_v \cdot \frac{M_v}{M_{sp}} + \Delta x$$

kde Δx je změna měrné vlhkosti ve spalovacím procesu.

$$\Delta x = \Delta x_h + \Delta x_w = 9 \frac{H}{M_{sp}} + \frac{W}{M_{sp}}$$

Protože hodnoty M_v a M_{sp} jsou stejného řádu a x_v velmi nepatrná ve srovnání se změnou měrné vlhkosti Δx , je možno s dostatečnou přesností použít

$$x_{sp} = x_v + \Delta x$$

Obvyklé složení zemního plynu je 96,4 % CH_4 , 1,7 % C_2H_6 , 1,6 % CO_2 a 0,3 % N_2 . V našem případě je tedy $\Delta x_w = 0$ a pro určení Δx_h použijeme známých hodnot [1] určených pro spalování metanu CH_4 ($\Delta x_h = 0,1405$ kg/kg) a pro malý podíl vyšších uhlovodíků hodnoty příslušné propanu C_3H_8 ($\Delta x_h = 0,1088$ kg/kg)

$$\begin{aligned} \Delta x_h &= 0,964 \cdot \Delta x_{\text{CH}_4} + 0,017 \cdot \Delta x_{\text{C}_3\text{H}_8} = \\ &= 0,964 \cdot 0,1405 + 0,017 \cdot 0,1088 = 0,137 \end{aligned}$$

Rovnice energetické bilance spalovacího procesu, označíme-li entalpii spalovaného plynu i_p a jeho spalné teplo H_0 , je

$$i_p + M_v \cdot i_v + H_0 = M_{sp} \cdot i_{sp}$$

Zanedbáním entalpie paliva i_p a se zřetelem na skutečnost, že hodnoty M_{sp} a M_v jsou řádově shodné a i_v

značně menší než $\frac{H_0}{M_{sp}}$, obdržíme

$$i_{sp} = i_v + \frac{H_0}{M_{sp}} = i_v + \Delta i$$

Poměr $H_0/M_{sp} = \Delta i$ značí změnu entalpie produktů spalování. Obdobně jako při stanovení vlhkosti spalin zjistíme

$$\Delta i_{\text{CH}_4} = 3490 \text{ kJ/kg} \text{ a } \Delta i_{\text{C}_3\text{H}_8} = 3340 \text{ kJ/kg}$$

a pak pro zemní plyn

$$\begin{aligned} \Delta i &= 0,964 \cdot \Delta i_{\text{CH}_4} + 0,017 \cdot \Delta i_{\text{C}_3\text{H}_8} = \\ &= 0,964 \cdot 3490 + 0,017 \cdot 3340 = 3421,1 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Určení entalpie a vlhkosti spalin smíšených se vzduchem na teplotu hvozdění

Při dané vlhkosti a teplotě spalin se může entalpie směsi měnit pouze v úzkých mezích podle měrného tepla suchých spalin, tyto rozdíly jsou však malé a lze

je zanedbat. Proto je možno k výpočtu sušení spalina-
mi použít i - x diagram vlhkého vzduchu. Bod charakte-
rizující stav produktů spalování paliva se určí podle i_{sp}
a x_{sp} . Při směšování s větším přebytkem vzduchu lze
výsledný stav nalézt pomocí směšovací úsečky v i - x
diagramu.

Problémem při určení výsledného stavu po směšování
je však obvykle nedostatečný rozsah i - x diagramu pro
velké hodnoty entalpie a měrné vlhkosti spalin. Řešení
jednodušeji nalezneme jako průsečík dvou přímek, a to
příslušné izotermy a směšovací přímky dané 2 body
(i_{sp} , x_{sp}) a (i_v , x_v), tedy řešením dvou lineárních
rovníc pro neznámé i , x :

$$i = 1,005 \cdot t + (2501 + 1,85 \cdot t) \cdot x$$

(pro teploty -20 až $+100$ °C),

$$i - i_{sp} = \frac{i_{sp} - i_v}{x_{sp} - x_v} (x - x_{sp}) = \frac{\Delta i}{\Delta x_h} (x - x_{sp})$$

Směšovací poměr spalin se vzduchem pro dosažení
požadované teploty hvozdění dané teplotou izotermy je

$$\frac{M_{sp}}{M_{vs}} = \frac{i - i_v}{i_{sp} - i}$$

Ideální spotřeba tepla a vzduchu při sušení spalinami

Předpokládáme, že hvozď pracuje jako teoretická su-
šárna, bez tepelných ztrát a bez přídavného přívodu
tepla, teplota vstupujícího materiálu se rovná teplotě
vysušeného materiálu a sušení probíhá za předpokladu
udržení konstantní entalpie sušícího média až do jeho
úplného nasycení $\varphi_2 = 100\%$. Množství potřebného su-
šícího média pak bude

$$l = \frac{1}{x_2 - x}$$

kg/kg odpařené vody.

Množství tepla

$$q = l \cdot (i - i_v)$$

kJ/kg odpařené vody.

Obdobně se určí i spotřeby skutečného sušení, při ře-
šení v i - x diagramu však musíme počítat s hodnotami
tepelných změn materiálu, vlivem okolí i s reálným na-
sycením odcházejícího vzduchu.

Příklad výpočtu

Vzduch nasávaný z okolí do topeniště i hvozdu má
teplotu $t_v = 10$ °C, absolutní vlhkost $x_v = 0,006$ kg/kg,
entalpii $i_v = 25,1$ kJ/kg (6 kcal/kg), relativní vlhkost je
75 % [obr. 1].

Vlhkost spalin

$$x_{sp} = x_v + \Delta x_h = 0,006 + 0,137 = 0,143 \text{ kg/kg.}$$

Entalpie spalin

$$i_{sp} = i_v + \Delta i = 25,1 + 3421,1 = 3446,2 \text{ kJ/kg.}$$

Dotahovací teplota 80 °C:

Entalpie a vlhkost sušícího média

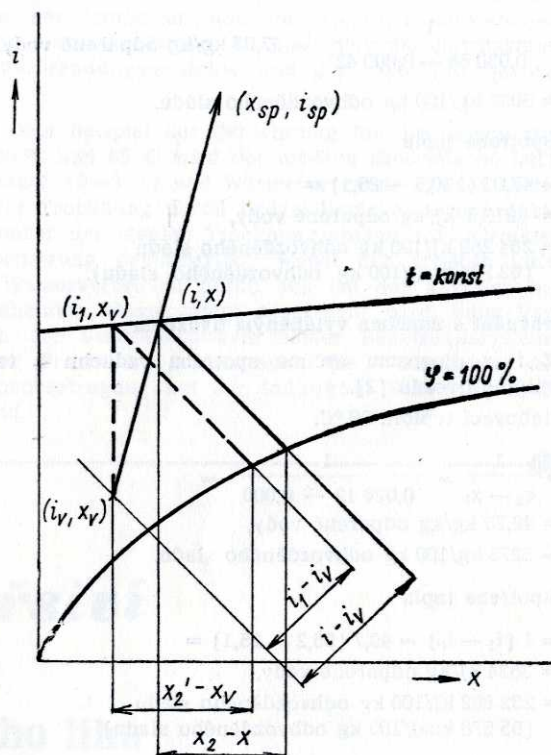
$$i = 1,005 \cdot t + (2501 + 1,85 \cdot t) \cdot x$$

$$i - i_{sp} = \frac{\Delta i}{\Delta x_h} (x - x_{sp})$$

$$i = 1,005 \cdot 80 + (2501 + 1,85 \cdot 80) \cdot x = 80,4 + 2649 \cdot x$$

$$i = \frac{3421,1}{0,137} (x - 0,143) + 3446,2 = 24\,971,5 \cdot x - 124,7$$

$$x = 0,009\,19 \text{ kg/kg}$$



Obr. 1. Příklad výpočtu v i - x diagramu

$$i = 104,7 \text{ kJ/kg}$$

Směšovací poměr

$$\frac{M_{sp}}{M_{vs}} = \frac{i - i_v}{i_{sp} - i} = \frac{104,7 - 25,1}{3446,2 - 104,7} = \frac{1}{42}$$

Spotřeba sušící směsi spalin

$$l = \frac{1}{x_2 - x} = \frac{1}{0,0288 - 0,0092} = 51,02 \text{ kg/kg odpařené vody}$$

Spotřeba tepla

$$q = l (i - i_v) = 51,02 (104,7 - 25,1) = 4062,9 \text{ kJ/kg odpařené vody}$$

V přepočtu na 100 kg odhvozděného sladu, při od-
sušení z relativní vlhkosti $u_1 = 42\%$ na $u_2 = 3,8\%$, tedy
odpaření 65,85 kg vody:

$$l = 3360 \text{ kg/100 kg odhvozděného sladu,}$$

$$q = 267\,542 \text{ kJ/100 kg odhvozděného sladu}$$

(63 901 kcal/100 kg odhvozděného sladu).

Pro srovnání uveďme ještě stejný výpočet za před-
pokladu použití vyšší dotahovací teploty 85 °C:

Entalpie a vlhkost sušícího média

$$i = 1,005 \cdot 85 + (2501 + 1,85 \cdot 85) \cdot x = 85,4 + 2658,3 \cdot x$$

$$i = 24\,971,5 \cdot x - 124,7$$

$$x = 0,009\,42 \text{ kg/kg}$$

$$i = 110,5 \text{ kJ/kg}$$

Směšovací poměr

$$\frac{M_{sp}}{M_{vs}} = \frac{1}{39}$$

Spotřeba sušící směsi spalin

$$l = \frac{1}{0,03068 - 0,00942} = 47,03 \text{ kg/kg odpařené vody,}$$

$$= 3097 \text{ kg/100 kg odhvozděného sladu.}$$

Spotřeba tepla

$$q = 47,03 (110,5 - 25,1) =$$

$$= 4013,5 \text{ kJ/kg odpařené vody,}$$

$$= 264\,289 \text{ kJ/100 kg odhvozděného sladu}$$

$$[63\,124 \text{ kcal/100 kg odhvozděného sladu).}]$$

Porovnání s nepřímo vytápěným hvozdem

Z $i-x$ diagramu určíme spotřebu vzduchu a tepla ideálního hvozdů [2].

Dotahovací teplota 80 °C:

$$l = \frac{1}{x_2 - x_1} = \frac{1}{0,02612 - 0,006} =$$

$$= 49,70 \text{ kg/kg odpařené vody,}$$

$$= 3273 \text{ kg/100 kg odhvozděného sladu.}$$

Spotřeba tepla

$$q = l (i_1 - i_w) = 49,7 (96,2 - 25,1) =$$

$$= 3534 \text{ kJ/kg odpařené vody,}$$

$$= 232\,692 \text{ kJ/100 kg odhvozděného sladu}$$

$$[55\,578 \text{ kcal/100 kg odhvozděného sladu).}]$$

Dotahovací teplota 85 °C:

Spotřeba vzduchu

$$l = \frac{1}{0,02772 - 0,006} =$$

$$= 46,04 \text{ kg/kg odpařené vody,}$$

$$= 3032 \text{ kg/100 kg odhvozděného sladu.}$$

Spotřeba tepla

$$q = 46,04 (101,4 - 25,1) =$$

$$= 3513 \text{ kJ/kg odpařené vody,}$$

$$= 231\,321 \text{ kJ/100 kg odhvozděného sladu}$$

$$[55\,250 \text{ kcal/100 kg odhvozděného sladu).}]$$

Závěr

Z určených hodnot teoretické spotřeby sušícího média vyplývá poněkud větší spotřeba u sušení spalinami zemního plynu, než u nepřímo otápěného hvozdů. Rozdíl 2–3 % však nemá velký význam a při rekonstrukcích bude ventilátor hvozdů vyhovovat oběma způsobům ohřevu. I potřebný celkový příkon ventilátoru bude zhruba stejný. Množství sušícího média při sušení spalinami je sice větší, ale zmenší se hydraulický odpor vynecháním ohříváků.

Teoretická spotřeba tepla sušení spalinami je vyšší o 14–15 % (při teplotě okolního vzduchu 10 °C a relativní vlhkosti 75 %, při teplotě vzduchu o 10 °C nižší se rozdíl zvýší o 1 % a naopak). Neznačená to ovšem, že hvozď s nepřírodným ohřevem bude vykazovat nižší spotřebu energie. Vyšší je pouze spotřeba na vlastní proces sušení, ale rozhodující jsou účinnosti přenosu tepla, kde u parního nebo nepřímého ohřevu spalinami přistupují ztráty ve výměnících, v rozvodu tepla i komínová ztráta.

Literatura

- [1] VALCHAŘ, J., (ed.) et al.: Základy sušení, SNTL, Praha 1967
- [2] LEJSEK, T., Kvasný průmysl, 10, 1964, 5, 103
- [3] NEPUSTIL, S., Sborník přednášek konference „Racionalizace využívání paliv a energie v piv.-slad. průmyslu“, Hradec Králové, 1977, s. 19

Lejsek T.: Výpočet spotřeby tepla a vzduchu při hvozdění sladu spalinami zemního plynu. Kvas. prům. 24, 1978, č. 8, s. 172–175.

Výpočet spotřeby tepla a vzduchu při sušení spalinami závisí v určení entalpie a měrné vlhkosti spalin a k dalšímu výpočtu lze s dostatečnou přesností použít $i-x$ diagramu vlhkého vzduchu. Pro určení stavu směsi spalin se vzduchem činí potíže obvykle nedostatečný rozsah $i-x$ diagramu, a proto se k řešení použila rovnice izotermy pro danou hvozdící teplotu a rovnice přímky procházející body, které určují stav spalin a okolního vzduchu.

Na příkladu výpočtu pro teploty 80 °C a 85 °C se ukazuje zvětšená teoretická spotřeba vzduchu (2–3 %) a tepla (14–15 %) při sušení spalinami zemního plynu oproti ideální sušárně s nepřímým ohřevem vzduchu, způsobená obsahem vodních par vzniklých při spalování. Při porovnání skutečných spotřeb obou způsobů ohřevu v praxi jsou však ještě rozhodující účinnosti přenosu tepla u nepřímého ohřevu.

Лейсек, Т.: Расход воздуха и тепла в солодосушилках, работающих на продуктах сгорания природного газа Квас. прум. 24, 1978, № 8, стр. 172–175.

Для расчета расхода воздуха и тепла в солодосушилках, работающих на продуктах сгорания природного газа, необходимо предварительно определить энтальпию и удельную влажность продуктов сгорания данного состава. После этого можно воспользоваться диаграммой $i-x$ для влажного воздуха. Определение состояния смеси продуктов сгорания с воздухом бывает в некоторых случаях сопряжено с трудностями из-за недостаточного диапазона диаграммы $i-x$. Задача в таком случае решается с помощью уравнения изотермы и уравнения прямой, проходящей через точки, показывающие состояние продуктов сгорания и окружающего воздуха.

Приведен пример, охватывающий температуры 80 °C и 85 °C. По сравнению с идеальной солодосушилкой с косвенным нагреванием воздуха теоретический расход воздуха в солодосушилках, работающих на продуктах сгорания природного газа, на 2–3 % выше. Расход тепла выше на 14–15 %. Причину следует искать в присутствии водяного пара, образующегося в процессе сгорания газа. Сравнение разных практических методов сушки возможно лишь при условии учета к. п. д. теплопередачи в установках с косвенным обогревом.

Lejsek T.: Calculating Heat and Air Consumption in Malt Drying Kilns Using Combustion Products of Natural Gas. Kvas. prům. 24, 1978, No. 8, pp. 172–175.

To calculate heat and air consumption in a malt drying kiln, using combustion products of natural gas, it is necessary to know the enthalpy and specific humidity of combustion products. If these two data are available, it is easy to determine consumption from a $i-x$ diagram of humid air. Sometimes it may be difficult to specify the state of the air + combustion products mixture because of insufficient range of the available $i-x$ diagram. In such a case the solution is obtainable from two equations — the equation of the isotherm and the equation of the straight line connecting points determining the state of combustion products and air.

From an example covering two temperatures, viz. 80 °C and 85 °C, it can be seen, that theoretical air consumption in a kiln using natural gas is by 2–3 % higher than in an ideal drying kiln with indirect air heating. The figures for higher heat consumption are 14–15 %. The difference is due to the presence of

water vapour in the combustion products. For reliable comparison of various heating methods the efficiency of indirect heat transfer must be taken into account.

Lejsek T.: Berechnung des Wärme- und Luftverbrauchs beim Darren des Malzes durch Erdgas-Verbrennungsprodukte. Kvas. prům. 24, 1978, No. 8, S. 172—175.

Die Berechnung des Wärme- und Luftverbrauchs bei der Trocknung durch Verbrennungsprodukte besteht in der Bestimmung der Enthalpie und der spezifischen Feuchtigkeit der Verbrennungsprodukte; zu den weiteren Berechnungen kann mit genügender Genauigkeit auch das i - x -Diagramm der feuchten Luft angewendet werden. Bei der Bestimmung des Zustandes des Gemisches Verbrennungsprodukte + Luft resultieren oft Schwierigkeiten aus dem ungenügenden Umfang des

i - x -Diagramms. Deshalb wurden zur Lösung die Gleichungen der Isotherme und der Geraden angewendet, welche durch die Punkte hindurchgeht, die den Zustand der Verbrennungsprodukte und der Außenluft bestimmen.

An dem Beispiel der Berechnung für die Temperaturen 80 °C und 85 °C wird der erhöhte theoretische Luftverbrauch (2—3 %) und Wärmeverbrauch (14 bis 15 %) bei der Trocknung durch Erdgas-Verbrennungsprodukte gegenüber der idealen Trocknungsanlage mit indirekter Luftbeheizung demonstriert, wobei der erhöhte Luft- und Wasserverbrauch durch den bei der Verbrennung entstehenden Wasserdampf verursacht wird. Beim Vergleich der Verbrauchswerte beider Beheizungssysteme in der Praxis ist jedoch auch die Wirksamkeit der Wärmeübertragung bei der indirekten Beheizung maßgebend.