

HNĚDOUHELNÝ MULTIPRACH V TECHNOLOGICKÝCH PODMÍNKÁCH VÝROBY EXPANDOVANÉHO KAMENIVA

Petr Buryan

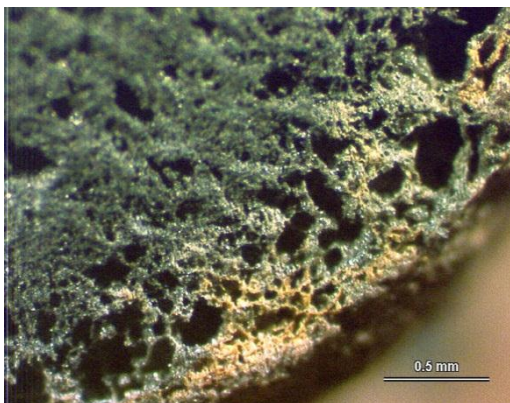
*Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5, Praha 6, 166 28
e-mail: buryanp@vscht.cz*

V práci je podána podrobná energetická bilance prokazující, že lze ekonomicky výhodně nahradit při výrobě expandovaného kameniva z cyprisových jíly z nadloží hnědohelného dolu pomocí rotační pece zemní plyn hnědohelným multiprachem. Posouzenou změnou paliva bude zajištěno snížení energetické náročnosti výroby a provozních nákladů bez negativního dopadu na kvalitu finálního výrobku.

Došlo 11. 1. 2013, přijato 4. 3. 2013

1. Úvod

Cyprisové jíly tvoří významnou část zemin podílejících se na skrývce hnědohelných dolů v Sokolovské uhelné pánvi. Při termickém zpracování zvětšují svůj objem, přičemž se vytváří velmi pórovitá struktura uzavřená slinutou povrchovou vrstvou (viz obr. 1). Zpracovávají se v rotačních pecích na velmi lehký granulát (Liapor), který je pevný, zdravotně nezávadný a neškodný k životnímu prostředí. V oblasti technologií ochrany životního prostředí je tento materiál považován za velmi perspektivní a s ohledem na ekonomiku velmi lukrativní. Jeho termické zpracování lze považovat za ojedinělé efektivní využití skrývkových hornin z hnědohelných dolů.



Obr. 1 Průřez částicí expandovaného kameniva

Jednou z moderních možností snížení nákladů na otop rotačních pecí spalujících doposud zemní plyn je přestavba hořákových soustav na spalování uhelného multiprachu. Základním podkladem pro návrh rekonstrukce je výpočet spotřeby tepelné energie při spalování hnědohelného multiprachu respektující vstup energie do systému a výstup energie ze systému.

2. Spotřeba energie

Při spalování hnědohelného multiprachu je oprávněné zvažovat následující rozhodující energetické toky, které lze rozdělit do následujících 10 dílčích kroků:

- Ohřev multiprachu na 100 °C.
- Vypaření vody obsažené v nafukovaném multiprachu.
- Ohřev multiprachu na teplotu vznícení.
- Ohřev vodní páry uvolněné z multiprachu na teplotu spalin na výstupu z rotační pece.
- Ohřev části popela ze spálení multiprachu na teplotu spalin na výstupu z rotační pece.
- Ohřev části popela ze spálení multiprachu na teplotu granulátu na výstupu z rotační pece.
- Ohřev vzduchu potřebného k nafukování multiprachu do rotační pece – $500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.
- Ohřev vzduchu potřebného k dokonalému spálení multiprachu v rotační peci – objem přesahující $500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (dosažení teoretické spotřeby vzduchu).
- Ohřátí přebytku vzduchu přesahující teoretický spalovací poměr $n = 1$.
- Komínová ztráta spojená s teoretickým objemem oxidu uhličitého a vodní páry vzniklým spálením multiprachu.

Pro posouzení energetické náročnosti je hlavním předpokladem vstup energie v hodnoceném systému. Představuje výhřevnost hnědohelného multiprachu spalovaného v rotační peci.

Zjednodušeným ukazatelem ztrát je vyjádření sumy ztracené energie předané novým vystupujícími hmotnostními proudům za panujících termodynamických podmínek výroby. Spotřeba $800 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ multiprachu byla spojena s úsporou 300 m^3 zemního plynu.

Pro vyčíslení jednotlivých dílčích pochodů spojených se ztrátou tepelné energie byly použity následující vstupní parametry [1-4]:

spotřeba multiprachu	800 $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$
obsah vody	4,7 % hm.
obsah popela	15,9 % hm.
elementární analýza:	
C	39,2 % hm.
H	4,4 % hm.
$S_{\text{spal.}}$	0,64 % hm.
O + N	dopočet do 100 % hm.
Výhřevnost	23,8 MJ/kg

Dále byla pro výpočet použita následující data:

teplota vznícení multiprachu ve zvířeném stavu	443 °C
teplota spalin na výstupu z rotační pece	350 °C
teplota popela ze spáleného multiprachu na výstupu z rotační pece strženého ve spalínách	350 °C
podíl popela ze spáleného multiprachu na výstupu z rotační pece strženého spalínami	95 %
teplota popela ze spáleného multiprachu na výstupu z rotační pece	1150 °C
podíl popela ze spáleného multiprachu na výstupu z rotační pece obsaženého v produktu expandace	5 %

Jednotlivé hmotnostní a bilanční údaje použité při výpočtech byly převzaty z provozních dat výroby Lia-poru.

Vyhodnocení spotřeby tepelné energie je podrobně rozvedeno následujících kapitolách a to tak, aby bylo možné k jednotlivým dílčím hodnotám přistupovat operativně s cílem jejich potřebné optimalizace, resp. aplikovat uváděná data v dalších procesech.

2.1. Ohřev multiprachu na 100 °C

Hnědouhelný multiprach o teplotě cca 20 °C se po nafukování do rotační pece nejdříve musí ohřát na teplotu 100 °C, kdy se z něj odpaří vlhkost. K ohřevu 800 kg multiprachu/h se potřebné množství tepelné energie vypočte dle následujícího vzorce:

$$Q_1 = m_{mul} \times c_{p,mul} \times (t_2 - t_1) \quad (1)$$

kde:

m_{mul}	hmotnost multiprachu (800 kg.h ⁻¹)
$c_{p,mul}$	měrné teplo multiprachu za konstantního tlaku (1,72 kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
t_2	teplota varu vody (100 °C)
t_1	teplota nafukovaného multiprachu (20 °C)

Dosazením do vztahu (1) získáme hodnotu 109,86 MJ.h⁻¹ potřebnou pro ohřátí multiprachu na teplotu, kdy se z něj odpaří vlhkost.

2.2. Vypaření vody z multiprachu na 100 °C

K vypaření vody z 800 kg multiprachu hodinově ohřátého na 100 °C se potřebné množství tepelné energie vypočte dle následujícího vzorce:

$$Q_2 = m_{mul} \cdot h_{vody} \cdot W_{mul} \quad (2)$$

kde:

m_{mul}	hmotnost multiprachu (800 kg.h ⁻¹)
h_{vody}	výparné teplo vody při 100 °C (2260 kJ.kg ⁻¹)
W_{mul}	obsah vlhkosti v multiprachu (4,7 % hm.)

Dosazením do vztahu (2) získáme hodnotu 84,98 MJ.h⁻¹.

2.3. Ohřev multiprachu na teplotu vznícení ve zvířeném stavu

Suchý hnědouhelný multiprach zahřátý na 100 °C se po zbavení vody musí před vznícením zahřát na odpovídající teplotu. K ohřátí 800 kg suchého multiprachu hodinově se potřebné množství tepelné energie vypočte dle následujícího vzorce:

$$Q_3 = (m_{mul} - W_{mul}) \cdot c_{p,mul} \cdot (t_2 - t_1) \quad (3)$$

kde:

m_{mul}	hmotnost suchého multiprachu (800 kg.h ⁻¹)
$c_{p,mul}$	specifické měrné teplo multiprachu za konstantního tlaku (1,72 kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
t_2	teplota vznícení multiprachu ve zvířeném stavu (443 °C)
t_1	teplota nafukovaného multiprachu zbaveného vody (100 °C)
W_{mul}	obsah vlhkosti v multiprachu (4,7 % hm)

Dosazením do vztahu (3) získáme hodnotu 448,89 MJ.h⁻¹ tepelné energie, potřebnou pro zahřátí suchého multiprachu na teplotu vznícení v rotační peci.

2.4. Ohřev vodní páry uvolněné z multiprachu na teplotu spalin na výstupu z rotační pece

Z hnědouhelného multiprachu zahřátého na cca 100 °C se vodní pára ohřeje následně ze 100 °C na teplotu spalin opouštějících rotační pec, tj. na 350 °C. Množství energie, potřebné pro ohřátí této vodní páry na teplotu spalin se vypočte dle následujícího vzorce:

$$Q_4 = V_{H_2O,mul} (C_{p,voda-2} \cdot t_2 - C_{p,voda-1} \cdot t_1) \quad (4)$$

kde:

$V_{H_2O,mul}$	objem vody z multiprachu 800.0,047 = 37,6 kg.h ⁻¹ ~ 46,79 m ³ .h ⁻¹
$C_{p,voda-2}$	střední měrná entalpie vody při 350 °C (1,627 kJ.m ⁻³ .K ⁻¹)
$C_{p,voda-1}$	střední měrná entalpie vody při 100 °C (1,578 kJ m ⁻³ .K ⁻¹)
t_2	teplota spalin (350 °C)
t_1	teplota počátku ohřevu této fáze (100 °C)

Dosazením do vztahu (4) získáme hodnotu 19,26 MJ.h⁻¹ tepelné energie potřebné pro ohřev vlhkosti z nafukovaného multiprachu na teplotu spalin.

2.5. Ohřev části popela ze spáleného multiprachu na teplotu spalin na výstupu z rotační pece

95 % popela ze spáleného hnědouhelného multiprachu je dle předpokladu strženo spalínami do navazujících částí odlučovacích zařízení. Pro výpočet je předpokládáno, že teplota těchto tuhých látek bude rovna teplotě spalin, tj. cca 350 °C. Energetický podíl takto ohřáté části popela z 800 kg multiprachu hodinově vyjádřený v množství ztrátové tepelné energie se vypočte dle následujícího vzorce:

$$Q_5 = 0,95 \times m_{pop} \cdot c_{pop} \cdot (t_2 - t_1) \quad (5)$$

kde:

m_{pop}	hmotnost popela multiprachu ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)
$c_{p, mul}$	specifické měrné teplo multiprachu za konst. tlaku ($1,48 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
t_2	teplota spalin ($350 \text{ }^\circ\text{C}$)
t_1	teplota popela multiprachu na počátku této fáze ($100 \text{ }^\circ\text{C}$)
0,95	podíl popela strženého spalinami

Dosazením do vztahu (5) získáme následující hodnotu tepelné energie potřebné pro zahřátí podílu popela multiprachu na teplotu při které odchází spolu se spalinami z rotační pece:

$$Q_5 = 800 \cdot 0,159 \cdot 0,95 \cdot 1,48 \cdot (350 - 100) = 14,62 \text{ MJ/h}$$

Druhá část popela ze spáleného hnědouhelného multiprachu ve výši cca 5 % je po spálení nafukovaného multiprachu stržena vyráběným produktem do navazujících chladících částí zařízení. Pro výpočet je předpokládáno, že teplota těchto tuhých látek bude rovna teplotě výrobku, tj. cca $1150 \text{ }^\circ\text{C}$. Energetický podíl takto ohřátého podílu popela z 800 kg multiprachu hodinově vyjádřený v množství tepelné energie se vypočte dle následujícího vzorce:

$$Q_6 = m_{pop} \times c_{pop} \times (t_2 - t_1) \quad (6)$$

kde:

m_{pop}	hmotnost popela multiprachu ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)
$c_{pop, mul}$	měrné teplo popela multiprachu za konstantního tlaku ($1,48 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
t_2	teplota produktu ($1150 \text{ }^\circ\text{C}$)
t_1	teplota popela multiprachu na počátku této fáze ($100 \text{ }^\circ\text{C}$)
0,05	podíl popela odcházejícího s produktem vypalování

Dosazením do vztahu (6) získáme následující hodnotu tepelné energie potřebné pro zahřátí podílu popela multiprachu na teplotu při které odchází spolu se spalinami z rotační pece:

$$Q_5 = 800 \cdot 0,159 \cdot 0,05 \cdot 1,48 \cdot (1150 - 100) = 3,48 \text{ MJ/h}$$

2.6. Ohřev vzduchu potřebného k nafukování multiprachu do rotační pece

Pro zafukování $800 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ hnědouhelného multiprachu o teplotě cca $20 \text{ }^\circ\text{C}$ se do rotační pece spotřebuje cca 500 m^3 okolního (vlhkého) vzduchu o teplotě cca $20 \text{ }^\circ\text{C}$. K ohřevu uvedeného množství vzduchu na teplotu vystupujících spalin (nejdříve je vzduchu, tzn. směs kyslíku a dusíku ohřáta na teplotu vznícení multiprachu. Po ohřátí kyslík ze vzduchu shoří a zbylý dusík je poté ochlazen na teplotu vystupujících spalin. Pro zjednodušení výpočtu není v tomto kroku předpokládána účast kyslíku na spalovacím procesu) se spotřebuje množství tepelné energie, která se vypočte dle následujících vztahů (a) a (b), tzn., že vlastní postup výpočtu se rozdělí na ohřátí suchého vzduchu a na ohřátí vzdušné vlhkosti:

a) ohřátí suchého vzduchu

Množství tepelné energie k ohřevu 500 m^3 suchého vzduchu o teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$ na teplotu $350 \text{ }^\circ\text{C}$ se vypočte dle následujícího vztahu:

$$Q_a = V_{vzd} \cdot c_{s, vzd} \cdot (t_2 - t_1) \quad (a)$$

kde:

V_{vzd}	objem suchého vzduchu ($500 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)
$c_{s, vzd}$	specifické měrné teplo suchého vzduchu při $350 \text{ }^\circ\text{C}$ ($1,326 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
t_2	teplota spalin ($350 \text{ }^\circ\text{C}$)
t_1	teplota nafukovaného vzduchu s multiprachem ($20 \text{ }^\circ\text{C}$)

Dosazením do výše uvedeného vztahu (a) získáme následující hodnotu tepelné energie potřebnou pro zahřátí vzduchu nafukovaného s multiprachem na teplotu při které odchází spolu se spalinami z rotační pece:

$$Q_a = 500 \cdot 1,326 \cdot (350 - 20) = 232,05 \text{ MJ/hod}$$

b) ohřátí vzdušné vlhkosti

Množství tepelné energie k ohřevu vzdušné vlhkosti obsažené v 500 m^3 vzduchu o teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$ na teplotu $350 \text{ }^\circ\text{C}$ se vypočte dle následujícího vztahu:

$$Q_b = V_{vzd} \cdot \varphi \cdot c_{v, p} \cdot (t_2 - t_1) \quad (b)$$

kde:

V_{vzd}	objem suchého vzduchu ($500 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)
φ	obsah vlhkosti (dle tabulek zohledňující tenzi vodní páry při $20 \text{ }^\circ\text{C}$ a při 60 % vlhkosti objem představuje 1,4 %)
$c_{v, p}$	specifické měrné teplo vodní páry při $350 \text{ }^\circ\text{C}$ ($1,627 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
t_2	teplota spalin ($350 \text{ }^\circ\text{C}$)
t_1	teplota nafukovaného vzduchu s multiprachem ($20 \text{ }^\circ\text{C}$)

Dosazením do výše uvedeného vztahu (b) získáme následující hodnotu tepelné energie potřebné pro zahřátí vzdušné vlhkosti vzduchu nafukovaného s multiprachem na teplotu při které odchází spolu se spalinami z rotační pece:

$$Q_b = 500 \cdot 0,014 \cdot 1,627 \cdot (350 - 20) = 3,99 \text{ MJ/h}$$

Celkové množství tepelné energie pro ohřev $500 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ okolního vzduchu k nafukování multiprachu získáme součtem vztahu (a) a (b), tj.

$$Q_7 = Q_a + Q_b = 236,04 \text{ MJ/h} \quad (7)$$

pozn.: Pro přesný výpočet by bylo potřebné vypočítat ohřev vzduchu na $443 \text{ }^\circ\text{C}$, tj. na teplotu vznícení multiprachu, poté předpokládat, že kyslík ze vzduchu vyhoří a zbylý dusík se před výstupem z rotační pece „ochladí“ na $350 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.7. Ohřev vzduchu potřebného k dokonalému spálení multiprachu přiváděného do rotační pece

Protože k ohřevu nafukovaných 800 kg.h⁻¹ multiprachu je potřebné podstatně více vzduchu než spotřebovaných 500 m³.h⁻¹ je potřebné tento teoretický objem vzduchu pro ideální spalování multiprachu, tj. pro teoretické neboli stechiometrické množství vzduchu (n = 1), nejprve vypočítat. Základní rovnice spalování multiprachu pro účely této studie lze shrnout takto:

C	+	O ₂	=	CO ₂
12,01 kg	+	22,39 m ³	=	22,26 m ³
1 kg	+	1,804 m ³	=	1,85 m ³
2 H ₂	+	O ₂	=	2 H ₂ O
4,03 kg	+	22,39 m ³	=	44,8 m ³
1 kg	+	5,553 m ³	=	11,11 m ³
S	+	O ₂	=	SO ₂
32,06	+	22,39 m ³	=	21,89 m ³
1 kg	+	0,698 m ³	=	0,693 m ³

Z uvedených spalovacích rovnic vyplývá, že molární objem skutečných plynů se liší od hodnoty molárního objemu ideálního plynu, který je roven pro všechny plyny 22,4 m³/kmol. Odchylka je dána hustotou skutečných plynů a par při 0 °C a 0,101 MPa. Při následujících výpočtech bude používána hodnota molárního objemu ideálního plynu 22,4 l/mol s tím, že výpočet nebude ideálně přesný.

Teoretickou spotřebu vzduchu pro spálení 800 kg multiprachu vypočítáme pomocí následujících vztahů, kdy vypočteme nejprve spotřebu kyslíku ze vzduchu, od které odečteme množství kyslíku obsaženého v multiprachu. Takto získaný objem přepočteme následovně na objem vzduchu potřebného pro stechiometrické spálení multiprachu

Uhlík	800·0,57·22,4/12	=	851,20	m ³ .h ⁻¹
Síra ^{*)}	800·0,007·22,4/32	=	3,92	m ³ .h ⁻¹
Vodík	800·0,044·22,4/4	=	197,12	m ³ .h ⁻¹
Kyslík z uhlí	800·0,128·22,4/32	=	127,68	m ³ .h ⁻¹
Celkem		=	924,56	m ³ .h ⁻¹

^{*)} není ze 100 % spalitelná

Kyslík z uhlí je započten místo vzduchu. Přepočet objemu kyslíku na objem vzduchu:

$$987,47 \cdot 100/21 = 4402,67 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

S multiprachem se nafukuje jenom 500 m³.h⁻¹. Proto je třeba dodat dalšími proudy:

$$4402,67 - 500 = 3902,67 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \text{ vzduchu}$$

Množství tepelné energie k ohřevu 3902,67 m³ vzduchu o teplotě 20 °C na teplotu 350 °C rovnající se ztrátě tepla, kterou tento vzduch ve formě komínové ztráty představuje, se vypočte dle následujícího vztahu:

$$Q_8 = V_{\text{vzd}} \cdot c_{s,\text{vzd}} \cdot (t_2 - t_1)$$

kde:

V _{vzd}	objem suchého vzduchu (500 m ³ .h ⁻¹)
c _{s, vzd}	specifické měrné teplo suchého vzduchu při 350 °C (1,326 kJ.kg ⁻¹ K ⁻¹)
t ₂	teplota spalin (350 °C)
t ₁	teplota nafukovaného vzduchu s multiprachem (20 °C)

Dosažením do výše uvedeného vztahu získáme následující hodnotu tepelné energie potřebné pro zahřátí vzduchu potřebného ke spálení multiprachem na teplotu, při které odchází spolu se spalinami z rotační pece:

$$Q_{8a} = 390267 \times 1,326 \times (350 - 20) = 170644 \text{ MJ} / \text{h}$$

I v tomto případě bude vzduch obsahovat vzdušnou vlhkost. Aplikací dat výpočtu hodnoty tepelné energie Q_{7b} zde získáme hodnotu

$$Q_{8b} = 390267 \times 0,014 \times 1,627 \cdot (350 - 20) = 31,1 \text{ MJ} / \text{h}$$

Celkové množství tepelné energie pro ohřev 500 m³.h⁻¹ okolního vzduchu k nafukování multiprachu (8) získáme součtem vztahů (8_a) a (8_b), tj.

$$Q_8 = Q_{8a} + Q_{8b} = 1737,55 \text{ MJ} / \text{h} \quad (8)$$

Poznámka: Zpřesnění výpočtu by představovala následující úvaha – Vzduch se nejprve ohřeje na teplotu vznícení multiprachu, tj. 443 °C. Poté následuje “vyhoření“ kyslíku, tj. úbytek objemu na 79 %. Zbytkový dusík postupně předá část energie protiproudě postupujícímu jilu až se ochladí na teplotu spalin vystupujících z pece, tj.

$$Q_{5,N2} = V_{N2} \cdot c_{s,N2} \cdot (t_2 - t_1)$$

kde:

V _{N2}	objem suchého dusíku - m ³ .h ⁻¹ vypočteme jej z celkového stechiometrického objemu vzduchu násobený 0,79
c _{s, N2}	specifické měrné teplo suchého dusíku při 350 °C (0,552 kJ.kg ⁻¹ K ⁻¹)
t ₂	teplota spalin (350 °C)
t ₁	teplota nafukovaného vzduchu s multiprachem (20 °C)

Q_{5,N2} = 390267 × 0,79 × 0,552 × (350 - 20) = 545,02 MJ / h I tento vzduch musí obsahovat vlhkost, proto i zde je vhodné do jeho ohřevu zahrnout vzdušnou vlhkost.

2.8. Ohřátí přebytku vzduchu přesahujícího teoretický spalovací poměr dokonalého spalování multiprachu v rotační peci

Vzhledem k tomu, že významná část spalovacího vzduchu potřebná pro dosažení teoretického objemu spalovacího vzduchu bude předehřáta na cca 450 °C po průchodu chladičem, lze v této fázi spíše očekávat, že zde bude po vyčíslení dat získaných připravovaným provozním pokusem spíše dosažena jistá úspora. Proto v této fázi

$$Q_9 = 0 \quad (9)$$

2.9. Komínová ztráta spojená s teoretickým objemem oxidu uhličitého a vodní páry ve spalínách vzniklých ze spalení multiprachu

2.9.1 Oxid uhličitý

Objem oxidu uhličitého vzniklého ze spalovaných 800 kg.h⁻¹ hnědouhelného multiprachu o obsahu uhlíku rovném 56 % hm v rotační peci se vypočte dle vztahu

$$V_{CO_2} = m_{mul} \cdot C_{uhl} \cdot 22,4 / M_C \quad (10-1)$$

kde:

V_{CO_2}	objem oxidu uhličitého - m ³ .h ⁻¹
C_{uhl}	obsah uhlíku v multiprachu - % hm.
22,4	molární objem oxidu uhličitého - m ³ /kg
M_C	molekulová hmotnost uhlíku - 12 kg/mol

Dosazením do výše uvedeného vztahu (10-1) získáme následující hodnotu tepelné energie potřebnou pro zahřátí oxidu uhličitého na 350 °C, tj. na teplotu při které odchází spolu se spalínami z rotační pece:

$$Q_{10-1} = 851,2 \times 1,914 \times (350 - 20) = 521034 MJ/h$$

Pro vyčíslení hledaného rozdílu v energetických tocích je potřebné ale odečíst od této veličiny obdobné množství energie, které je spojeno s oxidem uhličitým vzniklým z původně spalovaného zemního plynu.

Zvolíme-li, že spalovaný multiprach hodinově snižuje průměrně spotřebu zemního plynu o cca 300 m³, potom můžeme předpokládat, že z tohoto objemu podle spalovací rovnice vznikne 300 m³ oxidu uhličitého. Výše uvedenou rovnicí proto můžeme upravit na tvar

$$Q_{10-1} = (851,2 - 300) \cdot 1,914 \cdot (350 - 20) = 3481 MJ/h$$

a tak získáme energii ztrát spojenou s oxidem uhličitým obsaženým ve spalínách.

2.9.2 Vodní pára

Objem vodní páry vzniklé spaláním 800 kg.h⁻¹ hnědouhelného multiprachu o obsahu vodíku 4,9 % hm. v rotační peci se vypočte dle vztahu:

$$V_{H_2O} = m_{mul} \cdot C_{H_2} \cdot 22,4 / M_{H_2} \quad (10-2)$$

kde:

V_{H_2O}	objem vodní páry - m ³ .h ⁻¹
m_{mul}	hmotnost multiprachu - kg.h ⁻¹
C_{H_2}	obsah vodíku v multiprachu - % hm.
22,4	molární objem vodní páry - m ³ kmol ⁻¹
M_{H_2}	molekulová hmotnost vodíku - 2 kg.kmol ⁻¹

Dosazením do uvedeného vztahu odpovídající technologické a fyzikálně-chemické údaje zjistíme, že hodinově v rotační peci vznikne

$$V_{H_2O} = 800 \times 0,044 \times 22,4 / 2 = 394,24 m^3$$

Pro vyčíslení hledaného rozdílu v energetických tocích je potřebné odečíst od této veličiny obdobné množství energie, které je spojeno v tomto případě s vodní parou vzniklou z původně spalovaného zemního plynu.

Snižuje-li spalovaný multiprach hodinově průměrně spotřebu zemního plynu o cca 300 m³, potom

z tohoto objemu podle spalovací rovnice vznikne 600 m³ vodní páry. Porovnáním výše uvedeného objemu vodní páry vzniklého spaláním multiprachu s 600 m³ je zřejmé, že v tomto případě vzniklý objem vodní páry je menší o cca 205,76 m³ (600 - 394,24), tzn., že v případě vodní páry bude komínová ztráta menší. Tuto hodnotu vypočteme dle vztahu:

$$Q_{10-2} = V_{H_2O} \cdot c_{p,H_2O} \cdot (t_2 - t_1) \quad (10-3)$$

kde:

V_{H_2O}	objem vodní páry - m ³ .h ⁻¹
c_{p,H_2O}	střední specifické měrné teplo vodní páry při 350 °C (1,626 kJ.m ⁻³ .K ⁻¹)
t_2	teplota spalín (350 °C)
t_1	teplota nafukovaného multiprachu (20 °C)

Vyčíslením výše uvedeného vztahu (10-2) získáme následující hodnotu tepelné energie, o kterou bude komínová ztráta v případě spalování uhelného multiprachu při teplotě spalín 350 °C nižší:

$$Q_{10-2} = 205,76 \times 1,626 \times (350 - 20) = 11041 MJ/h$$

Poznámka: Vyjdeme-li v teoretické úvaze z uvedených 394,24 m³.h⁻¹ příslušejících vodní páře vznikající z multiprachu v porovnání se spalovací rovnicí CH₄ + 2 O₂ = CO₂ + 2 H₂O, tzn., že z každého objemu zemního plynu vníká dvojnásobný objem vodní páry, potom do úspory cca 197 m³.h⁻¹ zemního plynu je tento rozdíl nulový. Nad 197 m³ je již objem vodní páry menší.

2.9.3 Celkové vyhodnocení

Spojením dat vypočtených pro oxid uhličitý a vodu v případě hodinové náhrady 300 m³ zemního plynu za 800 m³ multiprachu získáme následující hodnotu komínové ztráty (10) spojenou se změnou paliva:

$$Q_{10} = Q_{10-1} - Q_{10-2} = 3481 - 11041 = 237,7 MJ.h^{-1} \quad (10)$$

3. Závěr

Součtem jednotlivých dílčích technologických energetických toků získáme celkovou energetickou náročnost odpovídající spalování hnědouhelného multiprachu Q_R .

$$Q_R = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10}$$

Po dosazení jednotlivých výše uvedených dílčích hodnot získáme celkovou sumu ve výši

$$Q_R = 2957,74 MJ.h^{-1}.$$

V přepočtu na spalovanou hmotnost a výhřevnost hnědouhelného multiprachu rovnající se 21,43 MJ/kg získáme hodnotu ztrát Q_Z pro pokrytí rozdílů mezi spalováním zemního plynu a multiprachu v rotační peci při výrobě expandovaného kameniva. Tato dle provedeného teoretického zjednodušeného výpočtu při odhadnuté úspoře zemního plynu 300 m³.h⁻¹ činí:

$$Q_Z = \frac{Q_R}{800 \times 21,43} \cdot 100 = \frac{2957,74}{17144} \cdot 100 = 17,3 \% hm.$$

Předložená teoretická studie bude využita v další etapě provozních realizačních výstupů jako podklad pro zpřesnění provozních poznatků a k minimalizaci energetické náročnosti výroby, tzn. i provozních nákladů.

Poděkování

Práce byla realizována s podporou, kterou autoři obdrželi v rámci úkolů MSM ČR 604 613 7304 a MPO ČR FR-TI1/539.

Literatura

1. Buryan P., Maršák J.: Expandace cyprisových jíílů, Stavební obzor 18, (7) 213-218 (2009).
2. Buryan P., Maršák J.: Ovlivnění expandace cyprisových jíílů, Stavební obzor 19, (4) 120-125 (2010).
3. Buryan P.: Kapalné produkty bitumenu cyprisových jíílů, Paliva 2, (1) 13- 20 (2010).
4. Katalog výrobků Sokolovská uhelná a.s., právní nástupce.

Summary

*Petr Buryan
Institute of Chemical Technology, Prague
e-mail:buryanp@vscht.cz*

Lignite multidust in technological conditions of production expanded clay

This study is focused on the energy balance that declares it can be more cost efficient to replace natural gas with coal dust during the production of expanded clay using the rotary kiln.