

Semiempirický model spalovací komory pyrolyzní pece

Jan Bartoň,

Chemopetrol, k. ú. o. Výzkumný ústav anorganické chemie, Ústí nad Labem

66.041.455
66.092.12

Redakci došlo 9. 8. 1958

V práci je uveden matematický model spalovací komory pyrolyzní pece, který uvažuje spalovací komoru jako nepřímý výměník tepla, v němž se teplo sdílí formálně konvekcí. Pro takto formalizovaný popis prostupu tepla ve spalovací komoře je charakteristická nízká hodnota součinitele prostupu tepla k , vysoká hodnota středního logaritmického teplotního rozdílu $\Delta t_{1,2}$ a hodnota opravného součinitele ϵ blízká jedničce.

Úvod

Vysoká energetická náročnost pyrolyzy vyžaduje mimo jiné poznat závislosti mezi způsobem vedení pyrolyzy a energetickou spotřebou na daném průmyslovém zařízení. V nedávné době jsme publikovali¹⁾ princip energetického modelu pyrolyzní pece, který je založen na naměřených hodnotách součinitele prostupu tepla pro nepřímé výměníky tepla tvořících průmyslovou pyrolyzní pec. Spalovací komora pyrolyzní pece, v níž se spaluje topný plyn ohřívající reakční směs proudící v trubkách na teplotu kolem 820–830 °C, byla v daném modelu¹⁾ identifikována statistickou závislostí mezi teplotou spalin na výstupu ze spalovací komory (tzv. teplota na jízku) a prosazením reakční směsi pece. Tento statistický model má zejména nevýhodu v tom, že ho lze aplikovat pouze pro okrajové podmínky, při nichž byla provedena měření na pece. Avšak často nás zajímá, jak se projeví v energetické náročnosti pyrolyzy změna okrajových podmínek pyrolyzy, tj. změna teplot médií nastříkovaných do pece.

Cílem předložené práce je prezentace semiempirického modelu spalovací komory pyrolyzní pece, který umožňuje počítat teplotu spalin na jízku pece pouze pomocí veličin měřených kolem spalovací komory pece.

V práci¹⁾ bylo uvedeno proudové schéma pyrolyzní pece. Detailnější schéma spalovací komory pyrolyzní pece je na obrázku 1 této práce. Ve spalovací komoře je nutné předat směsi uhlíků a procesní páry o teplotě $T_1 = 550$ až 600 °C během asi 0,4 sekundy takové množství tepla, aby T_2 bylo přibližně 830 °C a proběhla přitom vlastní endotermní reakce, jejíž reakční teplo $\Delta H_r \approx 1500$ až 1800 kJ na kilogram uhlíků nastříkovaných do pyrolyzní pece. Přímě měřeny jsou teploty $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$, průtoky reakční směsi m , topného plynu m_{TP} a koncentrace kyslíku ve spalinách c_{O_2} .

Teoretická část

Ve spalovací komoře pyrolyzní pece se uplatňuje složené sdílení tepla, a to radiací a konvekcí. Měření u průmyslové pyrolyzní pece, které informuje o teplotě proudů na vstupu a výstupu ze spalovací komory, je možné racionálně využít pro model sdílení tepla vztahem používaným pro nepřímé výměníky tepla

$$Q = kF\epsilon \Delta t_{1,2} \quad (1)$$

Předpokládejme, že by topné médium bylo spáleno

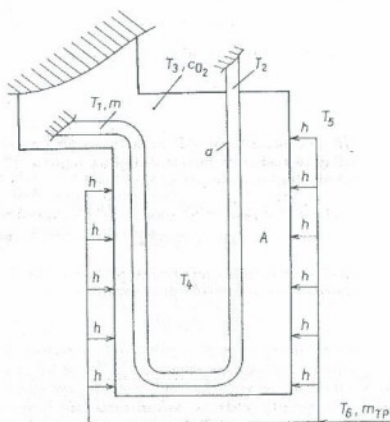
adiabaticky, takže by do spalovací komory vstupovaly spaliny s adiabatickou teplotou plamene T_4^* . Pro střední logaritmický rozdíl teplot $\Delta t_{1,2}$ potom plyne

$$\Delta t_{1,2} = \frac{(T_4^* - T_2) - (T_3 - T_1)}{\ln \frac{(T_4^* - T_1)}{(T_3 - T_2)}} \quad (2)$$

Pro opravný součinitel ϵ ve vztahu (1) použijeme vztah podle práce²⁾

$$\epsilon = \frac{M}{R-1} \ln \left[\frac{(1-P)/(1-RP)}{2/P-1-R+M} \right] \quad (3)$$

kde $P = (T_3 - T_1) / (T_4^* - T_1)$, $R = (T_4^* - T_2) / (T_3 - T_1)$, $M = (1 + R^2)^{0,5}$



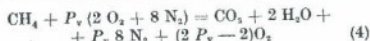
Obr. 1. Schéma spalovací komory pyrolyzní pece

A — spalovací komora; a — trubkový pyrolyzní reaktor; h — hořáky na topný plyn; T_1 — teplota směsi uhlíků a procesní páry na vstupu do spalovací komory; T_2 — teplota spalin na jízku pece; T_3 — teplota reakční směsi na výstupu z trubkového reaktoru; T_4 — teplota spalin na výstupu ze spalovací komory; T_5 — teplota vzduchu; T_6 — teplota topného plynu; m — průtok směsi uhlíků a páry; m_{TP} — průtok topného plynu, c_{O_2} — kyslík ve spalinách (% obj.).

Tabulka 1
Naměřené a vypočtené veličiny pro spalovací komoru pyrolyzní pece

	m [kg h ⁻¹]	S/O	T_1 [°C]	T_2 [°C]	T_3 [°C]	c_{O_2} [% obj.]	T_4^* [°C]	T_5 [°C]	\dot{Q} (10 ⁶) [kJ h ⁻¹]	k [kJ h ⁻¹ · m ⁻² K ⁻¹]	ε	$A_{1,2}$ [K]
1	40 935	0,735	598,6	828,6	1 160,1	2,67	1 742,1	21,1	6,64	581,5	0,956	723,4
2	37 777	0,745	584,4	827,9	1 119,5	2,84	1 730,9	22,7	6,28	571,9	0,947	703,1
3	34 324	0,745	566,5	828,2	1 079,3	3,24	1 701,8	23,3	5,90	564,4	0,936	677,2
4	39 249	0,845	578,7	829,5	1 126,1	3,31	1 698,5	23,8	6,18	590,9	0,947	695,8
5	35 598	0,847	582,5	829,8	1 110,9	3,04	1 712,8	19,1	6,16	572,4	0,945	690,6
6	35 246	0,631	581,8	829,7	1 107,0	3,28	1 698,3	21,5	5,14	577,7	0,944	693,5
7	33 414	0,546	583,6	827,5	1 096,7	3,86	1 698,3	24,5	5,96	578,1	0,943	662,8
8	40 519	0,500	618,5	827,4	1 181,9	1,98	1 793,2	17,4	6,91	583,5	0,962	746,6
9	39 359	0,528	610,7	826,8	1 165,2	3,17	1 696,7	17,4	6,72	605,9	0,958	701,9
10	38 522	0,548	597,4	826,4	1 148,6	2,72	1 734,7	17,5	7,09	593,9	0,954	714,9
11	36 467	0,398	587,9	827,4	1 126,7	3,17	1 703,6	19,2	6,33	585,6	0,949	693,9
12	35 110	0,647	579,9	827,6	1 108,7	3,24	1 698,4	18,8	6,08	569,0	0,945	685,6

Jestliže je topným plynem prakticky čistý methan, rovnici hoření methanu se vzduchem (vlhkosť vzduchu zanedbává) lze psát (všechny látky v plynné fázi)



ve které P_v značí přebytek vzduchu pro spalování methanu vůči stechiometrii hoření methanu. Pro koncentraci kyslíku ve spalnách [% obj.] platí

$$c_{O_2} = \frac{200 (P_v - 1)}{1 + 10 P_v} \quad (5)$$

a odtud

$$P_v = \frac{200 + c_{O_2}}{200 - 10c_{O_2}} \quad (6)$$

Pro adiabatickou teplotu plamene T_4^* platí⁽²⁾

$$\Delta H_T^* + \int_T^{T_4^*} [\sum_i n_i (C_{p,i})] dT = 0 \quad (7)$$

kde ΔH_T^* je reakční teplo spalení methanu při teplotě T . Spaliny se reakčním teplem ohřejí na teplotu T_4^* , přičemž obsahují n_i molů i -té složky. Platí

$$\sum_i n_i (C_{p,i}) = (C_p)_{\text{CO}_2} + 2(C_p)_{\text{H}_2\text{O}} + 8P_v(C_p)_{\text{N}_2} + (2P_v - 2)(C_p)_{\text{O}_2} \quad (8)$$

Pro závislosti molárních měrných tepel plynů obsažených ve spalnách na teplotě platí vztahy⁽⁴⁾

$$(C_p)_i = (C_{p,i})(T) \quad (9)$$

Pro různé hodnoty P_v , resp. c_{O_2} , tak obdržíme různé hodnoty adiabatické teploty plamene T_4^* . Prohlaš-li spalování methanu se vzduchem o teplotě T_2 , aproximujeme vliv teploty vzduchu na adiabatickou teplotu plamene T_4^* tím, že za T dosazujeme ve vztahu (7) teplotu vzduchu T_2 . Vliv teploty topného plynu na adiabatickou teplotu plamene zanedbáváme, neboť množství plynu tvoří asi 5 % z množství spalín vzniklých jeho spálením za obvyklých hodnot přebyteku vzduchu $P_v \approx 1,15$.

Pro tok tepla ve spalovací komoře pyrolyzní pece platí entalpičká bilance

$$\dot{Q} = m \bar{c}_p (T_2 - T_1) + [m/(1 + S/O)] \Delta H_T \quad (10)$$

Vztahy (1), (2), (3) a (10) tvoří soustavu rovnic, jejíž řešením lze vypočítat neznámé hodnoty k , ε , \dot{Q} a $A_{1,2}$ ze známých hodnot m , T_1 , T_2 , T_3 , T_4^* , c_{O_2} , S/O , ΔH_T a F .

Výsledky a diskuse

Byla uspořádána série měření ustálených stavů pyrolyzní pece. Ustálený stav pece byl udržován po dobu asi 90 min, přičemž měřené veličiny byly snímány procesním počítačem se vzorkovací periodou 2 minuty. V tabulce 1 jsou uvedeny průměry měřených veličin spalovací komory pyrolyzní pece a hodnota adiabatické teploty plamene vypočtená podle vztahů (7) až (9).

Na pravé straně tabulky 1 jsou uvedeny hodnoty k , ε , $A_{1,2}$ a \dot{Q} vypočtené ze soustavy rovnic (1), (2), (3) a (10) za předpokladu $c_p = 3,1 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $F = 165 \text{ m}^2$, $\Delta H_T = 1 590 \text{ kJ kg}^{-1}$.

Z tabulky 1 je zřejmé, že pro sdílení tepla ve spalovací komoře pyrolyzní pece, popsané vztahem (1) pro prostup tepla konvekcí, je typická velká (nací síla prostupu tepla $A_{1,2}$ a nízká hodnota součinitele prostupu tepla. Korekční součinitel má hodnotu blízkou jedné, proto by redukce rovnice (1) na tříparametrový vztah položením $\varepsilon = 1$ způsobila jen malou chybu při stanovení součinitele prostupu tepla k .

Absolutní hodnota součinitele prostupu tepla odpovídá řádově hodnotě součinitele prostupu tepla v kotli na odpadní teplo, v němž se reakční směs z pyrolyzy používá na výrobu vysokotlaké páry⁽⁵⁾. Hodnoty součinitele prostupu tepla k dosahují podle⁽⁵⁾ 600 až 1000 $\text{kJ h}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ v závislosti na průtoku reakční směsi a stupni zanešení teplosměnných ploch kotle na odpadní teplo.

Vztah (1) je možné použít pro výpočet teploty na jízku pece T_3 . Pro tento účel je vhodné nalézt závislost součinitele prostupu tepla na zatížení pyrolyzní pece. Lineární dvojnásobnou regresí z dat v tabulce 1 byl nalezen vztah

$$k = 156,59 + 5,41 \cdot 10^{-6} \dot{Q} + 26,48 c_{O_2} \quad (11)$$

$$r = 0,981, S_E = 2,593$$

Ze vztahu (11) plyne, že součinitel prostupu tepla závisí zejména na tepelném toku \dot{Q} a koncentraci kyslíku ve spalnách, tj. přebytku vzduchu pro spalování.

V tabulce II jsou uvedeny naměřené hodnoty spotřeby topného plynu na pyrolyzní peči a modelem vy-

Tabulka II

Hodnoty spotřeby topného plynu naměřené a vypočtené z modelu (*)

č.	m_{TP}^m [kg h ⁻¹]	m_{TP}^v [kg h ⁻¹]	m_{TP}^m/m_{TP}^v
1	3 890	4 023	0,966
2	3 863	3 834	1,007
3	3 497	3 408	1,026
4	3 128	3 032	1,031
5	3 688	3 593	1,026
6	3 419	3 322	1,026
7	3 417	3 295	1,040
8	3 343	3 173	1,053
9	4 148	4 294	0,965
10	4 085	4 028	1,014
11	3 889	3 959	0,987
12	3 600	3 541	1,016
13	3 366	3 296	1,021

počtené hodnoty spotřeby topného plynu (označeno hvězdičkou), jehož popis byl uveden v práci¹⁾, přičemž teplota spalin na jízku pece byla počítána vztahem (1) s využitím závislosti (11). Z tabulky II je patrné, že se naměřené a vypočtené hodnoty liší vesměs méně než o 5 % rel.

Závěr

Popis spalovací komory pyrolyzní pece, založený na vztahu pro vstup tepla v nepřímém výměníku tepla, bez považovat za jednoduchou a průmyslové praxi vyhovující abstrakci. Energetický model pyrolyzní pece, v němž je pro výpočet teploty spalin na jízku použito

matematického modelu popsaného v předložené práci, má širší hranice použitelnosti při modelových výpočtech vlivu okrajových podmínek pyrolyzy na její energetickou náročnost. Nejdůležitější podmínkou je to, aby topná tepla Q ve spalovací komoře pyrolyzní pece byl v hranicích daných experimentálními podmínkami.

Seznam symbolů

- C_p — měrné teplo [kJ mol⁻¹ K⁻¹]
- c_p — střední měrné teplo [kJ kg⁻¹ K⁻¹]
- CO_2 — koncentrace kyslíku ve spalinách [% obj.]
- F — výměnná plocha sdílení tepla ve spalovací komoře [m²]
- HH_r — reakční teplo pyrolyzy [kJ kg⁻¹]
- HH_T — spalovací teplo methanu [kJ mol⁻¹]
- k — součinitel prostupu tepla [kJ h⁻¹ m⁻² K⁻¹]
- m — průtok reakční směsi [kg h⁻¹]
- m_{TP} — průtok topného plynu [kg h⁻¹]
- n_j — obsah složky j ve spalinách [mol]
- P_j — parametry přebytku vzduchu pro spalování
- \dot{Q} — tepelný tok ve spalovací komoře [kJ h⁻¹]
- r — korelační koeficient vícenásobné lineární regrese
- S_{Σ} — standardní chyba odhadu lineární regrese
- S/O — poměr hmotnosti páry k hmotnosti uhlovodíků v reakční směsi
- T — teplota [°C]
- $\Delta h_{r,n}$ — střední teplotní logaritmický rozdíl [K]
- T_{ad}^* — adiabatická teplota plamene [°C]
- ϵ — opravný součinitel středního teplotního logaritmického rozdílu

Literatura

1. Bartoň J., Tichý V., Oháňka V.: Hung. J. Chem. Ind. (v tisku).
2. Bowman R. A., Müller A. C., Nagle W. M.: Trans. ASME, květen 1940, str. 283.
3. Hála E.: Úvod do chemické termodynamiky, str. 48, Academia, Praha 1975.
4. Himmelblau D. H.: Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering, str. 493, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 1974.
5. Bartoň J., Růžička J., Oháňka V.: Chem. prům. 38, 636 (1988).

Krystalizace taveniny na šupinkovacím válci

Antonín Řežábek, Alois Jaroš,
Výzkumný ústav chemické technologie, Bratislava,
Pavol Popálený,
Bratislavské automobilové závody, Bratislava

66.065.5

Redakci došlo 7. 9. 1988

V práci je odvozen matematický model šupinkovacího válce. Platnost modelu je ověřována experimentem. Odvozené vztahy mohou být prokazatelně používány při návrhu podobných zařízení.

Úvod

Práce byla vykonána v rámci přípravy podkladů pro výrobu gumárenského antioxidantu DUSANTOX. Protože jsme v literatuře nenašli žádné vztahy popisující šupinkovací proces, odvodili a otestovali jsme si potřebné funkce sami.

Krystalizace z taveniny na ochlazovaném šupinkovacím válci je poměrně častá finální úprava tuhých produktů chemického průmyslu. O konkrétních případech použití této operace se zmiňuje Perry¹⁾, který rovněž předkládá tabulku o kvalitativním vlivu ně-

Tabulka I

Vliv procesních parametrů na produktivitu a vlastnosti šupinek¹⁾

procesní parametr	výstupní parametry šupinek			
	kapacita	tloušťka	velikost	teplota
otáčky válce	+	—	—	+
ponor válce	+	+	+	+
teplota taveniny	—	—	—	+
teplota chladiwa	—	—	—	—

Při zvyšování procesního parametru výstupní parametr stoupá (+), klesá (—)

ktých procesních parametrů na produktivitu zařízení a vlastnosti šupinek (tab. 1).

Mullin²⁾ ve své knize referuje o mechanismu krystalizace z taveniny, ovšem pro případ, kdy krystalizační