

μ_f — viskozita vzduchu [Pa s]

$Ar = a^2 \sqrt{\rho} g (\rho_{sk} - \rho) / \mu_f^2$ — Archimédovo kritérium

$Re_{mf} = U_{mf} \rho_f \mu_f / \mu_f$ — Reynoldsovo kritérium u prahu fluidace

$Re_{ms} = U_{ms} \rho_s \mu_f / \mu_f$ — Reynoldsovo kritérium u prahu postování

$Re_t = U \rho_s \mu_f / \mu_f$ — Reynoldsovo kritérium při pádové rychlosti

Literatura

- Geldart D.: Powder Technol. 7, 285 (1973). — 2. Cranfield R. R., Geldart D.: Chem. Eng. Sci. 29, 935 (1974). — 3. Outipović N. M., Jovanović G. N., Fitzgerald T. J.: AIChE J. 24, 543 (1978). — 4. Hartman M., Svoboda K., Veselý V., Ziblkowski D.: Chem. listy 81, 1233 (1987). — 5. Hartman M., Svoboda K., Veselý V.: Chem. listy 79, 247 (1985). — 6. Wen C. Y., Yu Y. H.: AIChE J. 12, 610 (1966). — 7. Broadhurst T. E., Becker H. A.: AIChE J. 21, 238 (1975). — 8. Lucas A., Arnaldos J., Casal J., Puigjaner L.: Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 25, 426 (1986). — 9. Turton R., Levenspiel O.: Powder Technol. 47, 83 (1986).

Optimalizace čištění kotle na odpadní teplo při pyrolyze uhlovodíků

Jan Bartoň,

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

Vladimír Tichý, Bedřich Beneš,

Chemopetról, k. p. CHZ ČSSP, Litvínov

621.565.342

685.63

621.565.93/94.004.5/6

Redakci došlo 29. 9. 1987

V práci je navržen mechanismus vzniku koku při pyrolyze uhlovodíků v průmyslovém kotli na odpadní teplo. Při pyrolyze benzínu vzniká koks pravděpodobně povrchově katalyzovanou reakcí s vysokou aktivační energií. Při použití plynového oleje se uplatní kromě této reakce nalepování látek s vysokým bodem varu na povrch. Nalepování má vysokou formálně zápornou aktivační energii, reakce na povrchu úsad nízkou kladnou aktivační energii. V práci je dále navržena cílová nákladová funkce N pro optimalizaci doby čištění kotle na odpadní teplo. Z rozboru plyme, že kotle z pyrolyzy benzínu stačí čistit asi po 100 dnech provozu, kotel z pyrolyzy plynového oleje je nutné čistit asi po 30 dnech provozu.

Úvod

Kotel na odpadní teplo je trubkový chladič, v němž jsou reakční produkty vycházející z pyrolyzního hadu s teplotou 780–840 °C chlazený vroucí vodou. Reakční produkty (pyrolyzní plyn) proudí trubkami, zatímco v mezitrubkovém prostoru vše voda za tlaku 11 až 12 MPa (320–325 °C). V kotli na odpadní teplo se pyrolyzní plyn ochladí na teplotu 400 až 600 °C.

V předloženém článku je uveden příklad optimalizace provozních podmínek kotle na odpadní teplo, jehož činnost je významně ovlivněna tvorbou koksových úsad uvnitř trubek. Tyto úsady zhoršují přestup tepla, a tím i energetický výkon kotle na odpadní teplo.

Rozbor problému

Mechanismus tvorby koku na povrchu trubek kotle je složitý.

V práci¹⁾, analyzující funkci kotle na odpadní teplo, a práci²⁾, zabývající se simulací tvorby koku v kotli na odpadní teplo, jsou navrženy 4 možné mechanismy vzniku koku v kotli:

A) Vrstva koku vzniká nevratnou reakcí látek s povrchem.

B) Pro tvorbu koku jsou rozhodující mechanické procesy, tj. nalepování látek na povrch trubky.

C1) Tvorba koku je ovlivněna předřazenými vratnými reakcemi, pro něž je rozhodující teplota reakční směsi (reakce probíhají v plynné fázi).

C2) Tvorba koku je ovlivněna předřazenými vratnými reakcemi, pro něž je rozhodující teplota povrchu vrstvy koku (reakce probíhají na povrchu trubky, resp. úsad).

Jednotlivé mechanismy tvorby koku mohou vést k tvorbě koku v různých místech. Pro mechanismus A je typický nárůst koku zejména na vstupu pyrolyzního plynu do trubek kotle. Pro mechanismus B je typické usazování (nalepování) látek zejména na konce trubek v místech, kde má ochlazený pyrolyzní plyn nejnižší teplotu. Mechanismus C1 se vyznačuje maximem tloušťky vrstvy koku přibližně uprostřed trubek kotle. Při mechanismu C2 je typické postupné narůstání vrstvy koku od vstupu pyrolyzního plynu směrem ke konce trubek, přičemž se maximální výška vrstvy koku posouvá postupně s délkou provozu kotle ke střední části trubek.

Při vzniku koku mechanismem A se rychlost vzniku koku významně snižuje s poklesem teploty povrchu trubky, takže se zanášá pouze malá část výměnné plochy. Teplota pyrolyzního plynu za kotlem je po dlouhou dobu provozu kotle konstantní. Kotel je náchylný k náhlému upepání trubek na vstupu do kotle.

Při vzniku koku mechanismy C1 a C2 je pokrytí vnitřního povrchu trubek rovnoměrnější, součinitel přestupu tepla je značně snižován úsadami koku a teplota pyrolyzního plynu za kotlem se zvyšuje pomalu od počátku provozu kotle.

Při mechanismu typu B je pokrytí vnitřního povrchu trubek koksem nejrovnoměrnější s maximální

výskolu vrstvy koksů na konci trubek. Protože se zanesením trubek snižuje průstup tepla a tím je teplota pyrolyzního plynu na výstupu z trubek vyšší, podmínky pro kondenzaci a nalepování vysokoviskozních látek se zhoršují, tj. proces koksování je s rostoucí vrstvou koksů zpomalován. Teplota pyrolyzního plynu za kotlema roste rychle zvláště po zahájení provozu kotle.

Theoretická část

Vliv vlastností suroviny

V průmyslové praxi se pyrolyzuje obvykle směs uhlovdíků, a to zejména benzínu o střední molekulové hmotnosti 80 až 150 g mol⁻¹ a plynové oleje se střední molekulovou hmotností nad 300 g mol⁻¹. V nedávné době byly publikovány²⁾ zajímavé poznatky z experimentálního stanovení rychlosti koksování řady kapalných uhlovdíkových směsí. V práci³⁾ byly studovány benzíny se střední molekulovou hmotností 80 až 154 g mol⁻¹, plynové oleje se střední molekulovou hmotností 218 až 566 g mol⁻¹ a hydrogenované plynové oleje se střední molekulovou hmotností 317 až 381 g mol⁻¹. Pyrolyza probíhala v laboratorní pyrolyzní peci s parabolickým teplotním profilem s maximem teploty mezi 815 až 945 °C při konstantním tlaku 902 kPa, s hmotnostním poměrem páry k uhlovdíku 0,51 ± 0,05. Doba zdržení v peci byla 0,07 až 0,34 s, což odpovídá podmínkám při konvenčním typu pyrolyzy i tzv. milisekundové technologii. Koks vyloučený na stěnách pyrolyzní laboratorní pece byl oxidován a kvantitativně stanoven jako CO₂.

Autoři³⁾ definují dva typy kapalných nástřiků, a to silně koksujeící typy uhlovdíků (SKU) a málo koksujeící typy (MKU) uhlovdíků při pyrolyze. Početní rychlosti koksování na čistých stěnách pyrolyzní trubky se přitom pro oba typy prakticky rovnají. U silně koksujeících uhlovdíků se však s dobou trvání pyrolyzy rychlost koksování snižuje jenom velmi zvolna, zatímco u málo koksujeících se již po ca 2 hodinách rychlost koksování výrazně snižuje.

Elektronovou mikroskopii bylo zjištěno, že koks z pyrolyzy silně koksujeících uhlovdíků je tvořen vláknitým, koks z pyrolyzy málo koksujeících je amorfní. Autoři³⁾ odkazují na literaturu, z níž vyplývá, že vláknité typy koksu jsou magnetické a obsahují kovové částice a vznikají reakcemi katalyzovanými nerezovou ocelí. Amorfní koks je naopak nemagnetický a neobsahuje kovové částice. U silně koksujeících uhlovdíků zůstávají kovové částice na „živém“ konci rostoucího sloupčetu uhlíku, u málo koksujeících jsou tyto částice pokryty koksom, a ztrácejí tak svou aktivitu. Předpokládá se, že MKU obsahují „inhibitory“ koksování, které SKU nemají. Témito látkami jsou pravděpodobně sloučeniny s aromatičtými kondenzovanými cykly. Bylo potvrzeno³⁾, že přidávek jistého minimálního množství MKU do SKU

způsobí pokles rychlosti koksování SKU blízko k hodnotám pro MKU.

Při zpracování našich výsledků jsme předpokládali, že rychlosti koksování uvedené v práci³⁾ lze extrapolovat do oblasti nižších teplot, která jsou běžná v kotli na odpadní teplo. V tabulce 1 jsou uvedeny odhady poměru rychlosti koksování SKU k MKU. V důsledku rozdílných aktivizačních energií koksování u benzínu (SKU – nad 300 kJ mol⁻¹) a lehkého plynového oleje (MKU – kolem 15 kJ mol⁻¹) je při teplotě nižší než 790 °C rychlost koksování benzínu podstatně nižší než u lehkého plynového oleje a při teplotách kolem 700 °C benzín prakticky nekokuje. Naopak rychlost koksování pro lehký plynový olej je vlivem nízké aktivizační energie koksování při teplotách kolem 700 °C pouze asi 2 až 3krát nižší ve srovnání s teplotami mezi 800 až 900 °C.

Model kotle na odpadní teplo

Jednoduchý model vychází z bilance tepla v kotli na odpadní teplo⁴⁾. Je kombinací rovnic pro průstup tepla a bilance tepla předávaného v kotli z pyrolyzního plynu na výrobu vysokotlaké páry:

$$T_k = T_v + (T_p - T_v) \exp(-B) \quad (1)$$

$$B = kS(m_{\text{CO}_2}) \quad (2)$$

Součinitel průstupu tepla k i střední morné teplo pyrolyzního plynu c_p lze stanovit výpočtem ze složení pyrolyzního plynu a výpočtem ze známých hodnot T_k , T_v , T_p , m , S a Q u průmyslového kotle. Energetický výkon kotle lze v průmyslových podmínkách určit z množství vysokotlaké páry 11 až 12 MPa vyrobené v kotli na odpadní teplo.

Do mezitrubkového prostoru kotle se nastříkává předehřátá napájecí voda s teplotou 250 až 315 °C. Pro energetický výkon kotle platí

$$Q = m_{\text{ST}}(h_0 - h_1) \quad (3)$$

kde h_0 je entalpie syté páry odcházející z kotle a h_1 je entalpie napájecí vody. Spotřeba energie na ohřátí odluhu kotle je zanedbatelná.

Součinitel průstupu tepla v kotli na odpadní teplo

Rovnice průstupu tepla v kotli na odpadní teplo má tvar

$$Q = kS(T_p - T_k) \ln \left[\frac{(T_p - T_v)}{(T_k - T_v)} \right] / (T_k - T_v) \quad (4)$$

Pro dosazení (3) do (4) obdržíme pro k vztah

$$k = \frac{m_{\text{ST}}(h_0 - h_1) \ln \left[\frac{(T_p - T_v)}{(T_k - T_v)} \right]}{[S(T_p - T_k)]} \quad (5)$$

Orientační výpočet množství tepla předávaného v kotli sáláním podle⁵⁾ ukázal, že rozhodující množství tepla (asi 90 %) se v kotli převede konvekcí. Protože k závisí mj. též na průtoku (rychlosti proudění) pyrolyzního plynu, který se v průběhu provozování kotle může významně měnit a ovlivňovat tak hodnotu výpočtenou, h_0 k , byla výpočtená hodnota k vždy přepočtena na střední hodnotu průtoku pyrolyzního plynu ve sledovaném období s využitím zjednodušeného vztahu

$$k' = km'/m \quad (6)$$

(odpovídající střední veličiny jsou označeny apostrofovem).

Čílová funkce pro optimalizaci

Značením výměných ploch kotle na odpadní teplo stupně teplota T_k . Novoužití teplo pyrolyzního plynu lze vyjádřit násobkem ceny 1 GJ vyráběné vysokotlaké páry v kotli (podle⁶⁾). Pyrolyzní plyn se po průchodu kotle na odpadní teplo dále chladí v teplém dlu etylenem (jednotky⁷⁾). Teplo pyrolyzního plynu nevyužitelné v kotli vlivem zanesení trubek koksem může být částově využito pro výrobu procesní páry 0,7 MPa. Využitelnost tepla v teplém dlu vyjádříme parametrem $P \in (0, 1)$; je-li $P = 0$, potom teplo novoužitelné v kotli

Tabulka I

Poměr rychlosti vytváření koksů při pyrolyze benzínů^{a)} k rychlosti vytváření koksů z pyrolyzy plynového oleje^{b)} v závislosti na teplotě^{c)}

T [°C]	R
917	4,28
838	1,00
790 ^{c)}	0,50
700 ^{c)}	0

a) $M = 80,7$ g mol⁻¹, 84,8 % parafíny, 8,8 % cykloparafíny, 6,4 % aromáty, BMCI 6,1

b) $M = 218$ g mol⁻¹, 49,2 % parafíny, 26,8 % cykloparafíny, 24 % aromáty, BMCI 34,3

c) extrapolace

vlivem zanesení koksem se nevyužije na výrobu procesní páry, je-li $P = 1$, potom se teplo nevyužije v kotli v důsledku zanesení zcela využije na výrobu procesní páry.

Pro denní náklady na nevyužití teplo pyrolyzního plynu v KOT proto platí pro konstantní průtok pyrolyzního plynu:

$$N_1 = \left[\sum_{i=1}^t (T_{k,i} - T_{k,i-1}) c_p m \cdot 86\,400 (C_1 - PC_2) \cdot 10^{-3} \right] t$$

Náklady na čištění kotle ve výši n_2 Kčs pokládáme za nezávislé na zanesení trubek. Předpokládáme dále, že po odstavení pyrolyzní pece v důsledku čištění kotle je nástřik z této pece přepojen na pec, která je v záloze, a nevznikají tak ztráty na produkci ethylenu, propylenu a dalších produktů, jakož i na vyrobené vysokotlaké páře. Pro denní náklady na čištění proto platí

$$N_2 = n_2 t \quad (8)$$

Vztah (7) přechází po dosazení z (1) a (2) na vztah

$$N_1 = \left\{ \sum_{i=1}^t (T_{k,i} - T_{k,i-1}) \left[\exp\left(-\frac{k_1 S}{m c_p}\right) - \exp\left(-\frac{k_1 S}{m c_p}\right) \right] \cdot c_p m \cdot 86\,400 \cdot (C_1 - PC_2) \cdot 10^{-3} \right\} t \quad (9)$$

kde k_1 je součinitel prostupu tepla v kotli po vyčištění kotle, k_2 je součinitel prostupu v i -tý den provozu kotle. Součet nákladů

$$N = N_1 + N_2 \quad (10)$$

prochází v závislosti na délce provozu kotle minimem. Hodnota t v minimu značí optimální dobu pro čištění kotle od počátku provozu kotle.

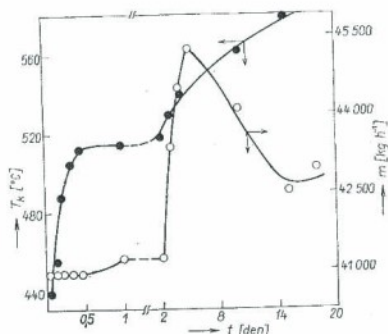
Výsledky a diskuse

Výpočet součinitele prostupu tepla a stanovení mechanismu tvorby koksu

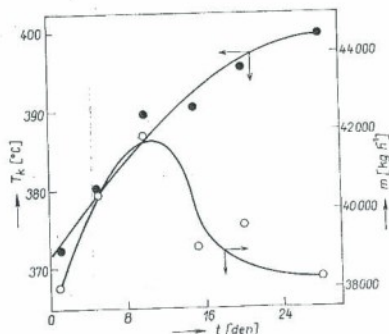
V pyrolyzní peci, na níž byla prováděna měření, jsou paralelně (z hlediska pronášení pyrolyzního plynu) umístěny tři kotle na odpadní teplo u jedné pece, přičemž každý kotel je zatížen přibližně stejným průtokem pyrolyzního plynu. Výpočet součinitele prostupu tepla je uvažován pro střední (průměrné) teploty

pyrolyzního plynu před všemi kotli a za nimi, celkový průtok uhloučků a procesní páry do pyrolyzní pece a celkovou výrobu vysokotlaké páry v kotli. Na obrázku 1 je znázorněna typická závislost výstupní teploty z kotle při pyrolyze benzínu. Teplota pyrolyzního plynu vycházejícího z pyrolyzní pece (na vstupu do kotle) se pohybovala v rozmezí 820 až 827 °C, průtok pyrolyzního plynu přitom kolísal v rozmezí 38 000 až 42 000 kg h⁻¹. Na obrázku 2 je obdobná závislost při pyrolyze plynového oleje. Teplota pyrolyzního plynu z pyrolyzy na vstupu do kotle byla 785 až 790 °C.

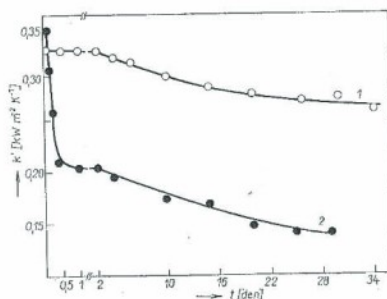
Na počátku časové osy byly výměnné plochy kotlů čisté. Základní rozdíl mezi obrázkem 1 a 2 je v tom, že při pyrolyze plynového oleje se kotel zanesl usadami významně snižujícími průstup tepla již během prvních 24 hodin provozu kotle. Teplota pyrolyzního plynu za kotlem přitom stoupne během 24 hodin o 80 °C. V dalších dnech se zvyšování teploty T_k zpomalí a ustálí se na asi 5 K za den, při teplotách $T_k \approx 600$ °C klesne rychlost růstu T_k na asi 1 K za den.



Obr. 2. Závislost výstupní teploty z kotle T_k a hmotnostního průtoku pyrolyzního plynu v kotli na čase t pro plynový olej



Obr. 1. Závislost výstupní teploty z kotle T_k a hmotnostního průtoku pyrolyzního plynu v kotli na čase (t) pro benzín



Obr. 3. Závislost součinitele prostupu tepla k' pro benzín ($m' = 40\,250$ kg h⁻¹ l) a pro plynový olej ($m' = 42\,960$ kg h⁻¹ l) na čase t

Při pyrolyze benzínu se kotel zanášá podstatně méně a nárůst teploty T_k probíhá rychlostí asi 1 K za den. Rozdíly v chování dokumentují i změny koeficientu prostupu tepla vynesené na obrázku 3. Z obrázku je patrný prudký pokles součinitele prostupu tepla v kotli za peci pyrolyzující plynový olej; k' poklesne během prvních 24 hodin asi o 42 %, k' v případě pyrolyzy benzínu klesá asi o 0,002 kW m⁻² K⁻¹ za den, tj. přibližně o 0,6 %.

Lineární regresí⁶⁾ byly získány následující vztahy popisující závislost koeficientu prostupu tepla na čase.

Pro plynový olej v době 0,04 až 0,4 dne:

$$k' = 0,3884 - 0,8151t + 1,2164t^2 - 0,5657t^3 \quad (11)$$

$$r = 0,997, t = (0,04 - 0,4) \text{ dne}, m' = 42\,960 \text{ kg h}^{-1}$$

$$k' = 0,2717 - 1,9851 \cdot 10^{-2}t + 1,1015 \cdot 10^{-3}t^2 - 2,025 \cdot 10^{-5}t^3 \quad (12)$$

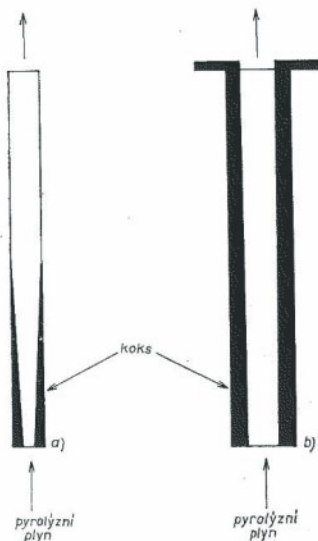
$$r = 0,913, t = (1 - 34) \text{ dnů}, m' = 42\,960 \text{ kg h}^{-1}$$

V případě pyrolyzy benzínu platí:

$$k' = 0,3300 - 4,0388 \cdot 10^{-2}t + 7,6693 \cdot 10^{-5}t^2 - 4,6021 \cdot 10^{-7}t^3 \quad (13)$$

$$r = 0,9899, t = (1 - 37) \text{ dnů}, m' = 40\,250 \text{ kg h}^{-1}$$

Na obrázku 4 je schematicky znázorněno rozložení vrstvy koksu podél trubek. V případě pyrolyzy benzínu je kotel mírně zakoksován asi do 1/3 délky trubky (stav asi po 200 dnech provozu). U kotlů za pecemi pyrolyzujícími plynový olej je vrstva koksu prakticky rovnoměrně rozložena podél celé trubky a úsady koksu



Obr. 4. Schematické znázornění distribuce koksu podél trubek kotle na odpadní teplo pro benzín (a) a pro plynový olej (b)

jsou i na horní trubkovnici (stav po 40–60 dnech provozu). Distribuci koksu v trubkách při pyrolyze benzínu lze pravděpodobně vysvětlit mechanismem C2, tj. reakcí katalyzovanou povrchem trubky, reakcí s vysokou aktivací energií. Zanášení kotlů na odpadní teplo při pyrolyze plynového oleje je pravděpodobně kombinací dvou mechanismů. Na počátku provozu kotle (v prvních hodinách provozu) se pravděpodobně významně uplatňuje mechanismus B. V pyrolyzním plynu jsou přítomny látky s rosným bodem pod teplotou 500 °C. Tyto látky vykonávají zejména na výstupu z trubkovnice kotle, kde je nejnižší teplota. Protože osa trubek je svislá a pyrolyzní plyn proudí směrem vzhůru, kondenzát pomalu stéká proti proudu pyrolyzního plynu. Výsledkem toho je pozorované zanesení trubek, které se liší od rozložení vrstvy, které lze očekávat při tomto mechanismu, tj. tvorby vrstvy koksu především na konci trubek. Kromě toho v trubce kotle na odpadní teplo vzniká při pyrolyze plynového oleje koks mechanismem C2 s nízkou aktivací energií. I tento proces ovlivňuje výšku vrstvy koksu v trubce, která je nejvyšší na počátku trubky (z hlediska proudění pyrolyzního plynu). V tabulce II jsou uvedeny rychlosti poklesu součinitele prostupu tepla k' pro kotel na odpadní teplo při pyrolyze plynového oleje. Závislost $\ln r_k$ na $1/(T_k + 273)$ je na obrázku 5. Zdá se, že aktivací energie procesu zanášení kotle na odpadní teplo byla určena asi -200 kJ mol^{-1} , což odpovídá hodnotě aktivací energie tohoto procesu předpokládané v práci⁷⁾.

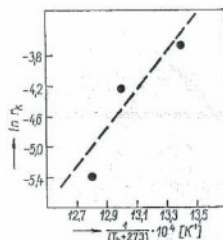
Stanovení optimální doby čištění kotle na odpadní teplo

Určení optimální doby čištění kotle na odpadní teplo vychází z nákladové funkce (10). Ža k_i ve vztahu (9) se dosazují funkční závislosti (11), (12) nebo (13)

Tabulka II

Rychlost poklesu součinitele prostupu tepla r_k v závislosti na teplotě pyrolyzního plynu na výstupu z kotle T_k

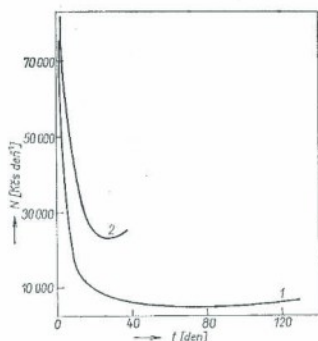
r_k [kW m ⁻² K ⁻¹ h ⁻¹]	$\ln r_k$	T_k [°C]	$1/(T_k + 273)$ [K ⁻¹]
0,0235	-3,75	471	0,00134
0,0140	-4,36	496	0,00130
0,0045	-5,41	508	0,001275



Obr. 5. Závislost logaritmu rychlosti změny součinitele prostupu tepla $\ln r_k$ na převrácené hodnotě absolutní teploty pyrolyzního plynu na výstupu z kotle $1/(T_k + 273)$

Tabulka III
Hodnoty parametrů pro optimalizaci doby čištění kotle

surovina pro pyrolyzu	plynový olej	benzín
T_D [°C]	790	827
T_V [°C]	321	321
S [m ²]	132	231
m [kg h ⁻¹]	42 960	40 250
c_p [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	3,0	3,0
C_1 [Kčs GJ ⁻¹]	50,0	50,0
C_2 [Kčs GJ ⁻¹]	15,0	15,0
σ_2 [Kčs]	150 000	150 000
P	0,5	0,5



Obv. 6. Závislost nákladové funkce N na čase t pro benzín (1) a plynový olej (2)

podle typu zpracovávané suroviny na pyrolyze a doby provozu kotle na odpadní teplo t . V tabulce III jsou uvedeny hodnoty parametrů pro optimalizaci. Z hodnoty parametru $P = 0,5$ vyplývá, že uvažujeme 50% využití tepla pyrolyzního plynu opouštějícího kotel na odpadní teplo s vyšší teplotou než $T_{K,1}$ v tepelném dílu výroby. Náklady na zmaření zbylých 50% tepla obsaženého v pyrolyzním plynu vlivem zanesení teplotěměnných ploch pokládáme za zanedbatelné malé ve srovnání s cenou 1 GJ vysokotlaké páry. Rozlorem provozních záznamů bylo zjištěno, že předpoklad $P = 0,5$ odpovídá reálným provozním podmínkám.

Na obrázku 6 je uveden průběh nákladové funkce N na čase pro pyrolyzu benzínu (1) a plynového oleje (2). Při pyrolyze benzínu byla předpokládána možnost extrapolace vztahu (13) až do 100 dní. Čištění kotle při pyrolyze benzínu je optimální po 93 dnech. Minimum je ploché, takže překročení doby čištění kotle nad 100 dní neznamená velké ekonomické ztráty. V případě pyrolyzy plynového oleje činí optimum

29 dní. V této době již dosahuje teplota za kotlem hodnot kolem 600 °C, což jsou maximální přípustné teploty. Proloužení cyklu kotle není možné.

Z hlediska polohy nákladového minima na ose N pozorujeme, že v případě pyrolyzy benzínu činí hodnota $N_{\min} = 4800$ Kčs za den, v případě pyrolyzy plynového oleje $N_{\min} = 23 000$ Kčs za den. Z tohoto porovnání vyplývá podstatně horší využívání tepla pyrolyzního plynu z pyrolyzy plynového oleje.

Závěr

Předložená práce se zabývala mechanismem vytváření koksových úsad v kotlech na odpadní teplo při pyrolyze benzínu a plynového oleje a stanovením optimální doby čištění kotlů. Bylo zjištěno, že koks vzniká v kotlech na odpadní teplo při pyrolyze benzínu pravděpodobně reakcí s vysokou aktivační energií katalyzovanou povrchem trubek. Proto se koks převážně tvoří na vstupu pyrolyzního plynu do kotle. Při pyrolyze plynového oleje se koks tvoří pravděpodobně kombinací procesu nalepování látek s povrchové katalyzovanou reakcí s nízkou aktivační energií.

Optimální doba čištění kotle při pyrolyze benzínu leží v oblasti 100 dní od počátku provozu kotle s čistými plochami, při pyrolyze plynového oleje je nutné kotel čistit asi po 30 dnech provozu.

Seznam symbolů

- C_1 — cena vysokotlaké páry [Kčs GJ⁻¹]
- C_2 — cena procesní páry [Kčs GJ⁻¹]
- c_p — střední měrné teplo [kJ kg⁻¹ K⁻¹]
- h_E — měrná entalpie syté vysokotlaké páry [kJ kg⁻¹]
- h_L — měrná entalpie napájecí vody [kJ kg⁻¹]
- k — součinitel prostupu tepla [kW m⁻² K⁻¹]
- KOT — kotel na odpadní teplo
- M — střední molekulová hmotnost [g mol⁻¹]
- m — průtok pyrolyzního plynu [kg s⁻¹]
- m_{gy} — výroba vysokotlaké páry v kotli [kg s⁻¹]
- MKU — málo koksuječi uhlavodíky při pyrolyze
- P — parametr vztahů (7), (9)
- Q — výkon kotle na odpadní teplo [kW]
- r — korelační koeficient
- r_K — rychlost poklesu součinitele prostupu tepla [kW m⁻² . K⁻¹ h⁻¹]
- S — výměnná plocha [m²]
- SKU — silně koksuječi uhlavodíky při pyrolyze
- t — čas [den]
- T_K — teplota pyrolyzního plynu za kotlem [°C]
- T_D — teplota pyrolyzního plynu na vstupu do kotle [°C]
- T_V — teplota varu vody v mezitrubkovém prostoru kotle [°C]

Literatura

1. Hořík J., Beránek P.: Chem. prům. 33, 113 (1983).
2. Hořík J., Beránek P.: Chem. prům. 33, 176 (1983).
3. Letfin H. P., Newsome D. S.: Ind. Eng. Chem. Res. 26, 1003 (1987).
4. Bartoň J., Hořálek M., Janura J.: Chem. prům. 34, 230 (1984).
5. Bartoň J., Dvořák L.: Chem. prům. 37, 364 (1987).
6. WANG 2260 MVP, knihovna standardních programů.
7. Muka V.: Základy chemického inženýrství, SNTL/ALFA, str. 381, Praha 1977.