

## Rekuperace tepla v rektifikační koloně

Jan Bartoň, Karel Ederer,

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

682.99  
66.048.37

Redakce dostlo 17. 7. 1984

V práci je uveden výpočet výměnné plochy trubkového kondenzátoru pro předehřev nástřiku rektifikační kolony za podmínky maximálního ekonomického efektu. Ve výměníku kondenzují páry z hlavy kolony. Předehřevem nástřiku se snižuje spotřeba topné páry ve vařáku kolony, čímž vzniká úspora ve spotřebě energie. Náklady na kondenzátor jsou závislé na jeho výměnné ploše a na kilogramové ceně materiálu pro kondenzátor.

### Rozbor problému

V rektifikační koloně se oddělují uhlovodíky od vody z koncentrace 800 až 1000 mg uhlovodíků na 1 kg vody na koncentraci 200 až 250 mg, aby vyčištěná voda byla vhodná pro výrobu technologické páry (obr. 1). Zařízení je energeticky náročné,

Pro požadované vyčištění vody se musí z hlavy kolony odvádět jisté množství par  $F_H$ . Do vařáku kolony (B) se přivádí topná pára (TP) v množství, které ohřeje nástřik  $F$  k bodu varu směsi v koloně a odpaří páry odcházející z hlavy kolony  $F_H$ . V případě, že nástřik  $F$  má nižší teplotu než je teplota v koloně, se nabízí možnost využít části kondenzačního tepla par z hlavy kolony k předehřevu nástřiku (obr. 2) a tímto opatřením snížit spotřebu topné páry ve vařáku (B). V současném zapojení (obr. 1) je kolona součástí velkého technologického celku a teplo par z hlavy kolony se zcela zmaří ve vzduchovém chladiči.

V předložené práci jsme odvodili optimalizační funkci, z níž lze vypočítat optimální ohřátí nástřiku (resp. plochu kondenzátoru  $O$ ), při němž je dosaženo maximálního ekonomického efektu, v závislosti na množství nástřiku, ceně topné páry, ceně 1 kg kondenzační plochy, době života kondenzátoru, součiniteli prostupu tepla, rozdílu mezi teplotou nástřiku a teplotou par v hlavě kolony a využitelné entalpii topné páry. Množství tepla, které opouští hlavu kolony v proudu  $F_H$ , je přitom značně větší než množství tepla, které spotřebuje nástřik  $F$  k ohřátí na bod varu v rektifikační koloně.

### Teoretická část

Pro množství tepla vyměněné mezi dvěma médii v nepřímém výměníku tepla platí obecný vztah

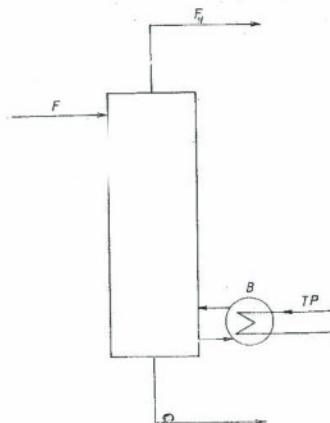
$$Q = k \cdot S(\Delta T)_{\text{bs}} \cdot \varphi \quad (1)$$

Nástřik o teplotě  $T_1$  se v kondenzátoru předehřeje na teplotu  $T_2$  a platí

$$Q = F \cdot c_p(T_2 - T_1) = F \cdot c_p \cdot \Delta T_v \quad (2)$$

Tím, že se předehřeje nástřik  $F$  o teplotní rozdíl  $\Delta T_v$ , snižuje se po dobu života kondenzátoru  $O$  spotřeba topné páry o hodnotu  $U$  (jestliže zanedbáme tepelné ztráty)

$$U = F \cdot c_p \cdot \Delta T_v \cdot 3600 \cdot t \cdot C_1 / \Delta H_{\text{kon}} \quad (3)$$



Obr. 1. Schéma rektifikační kolony

Náklady na kondenzátor jsou dány vztahem

$$N = S \cdot C_s \quad (4)$$

Pro  $(\Delta T)_m$  platí vztah

$$\Delta T)_m = (\Delta T_v) \ln \frac{D}{D - \Delta T_v} \quad (5)$$

kde  $D = T_3 - T_1$ . Při teplotě  $T_3$  kondenzuje pára v kondenzátoru  $C$ . Předpokládá se, že kondenzát odchází při teplotě kondenzace  $T_3$ ; za těchto podmínek  $\varphi = 1$ .

Dosažením vztahu (5) do (1), vyjádřením  $S$  ze vztahu (1) a dosazením do (4) obdržíme pro náklady  $N$  na kondenzátor  $C$  vztah

$$N = \frac{Q}{k \cdot \Delta T_v} \ln \frac{D}{D - \Delta T_v} \cdot C_s \quad (6)$$

Dosažením ze (2) do (6) získáme pro náklady  $N$

$$N = \frac{F \cdot c_p}{k} \ln \frac{D}{D - \Delta T_v} \cdot C_s \quad (7)$$

za předpokladu, že náklady na údržbu výměníku jsou zanedbány.

Ekonomický efekt zařazení kondenzátoru par  $C$  pro předehřev nástřiku kolony je dán výrazem

$$E = U - N = F \cdot c_p \cdot \left( \frac{3600 \cdot t \cdot C_t \cdot \Delta T_v}{\Delta H_{kon.}} - \frac{C_s}{k} \ln \frac{D}{D - \Delta T_v} \right) \quad (8)$$

Pro extrém funkce  $E = f(\Delta T_v)$  platí

$$(\Delta T_v)_{ext.} = D - \frac{C_s \cdot \Delta H_{kon.}}{3600 \cdot t \cdot k \cdot C_t} \quad (9)$$

Pro plochu kondenzátoru za podmínky  $(\Delta T_v)_{ext.}$  plyne

$$S_{ext.} = \frac{F \cdot c_p}{k} \ln \frac{D}{D - (\Delta T_v)_{ext.}} \quad (10)$$

Při výpočtu ceny 1 m<sup>2</sup> výměnné plochy kondenzátoru vycházíme z předpokladu, že bude použit standardní typ trubkového výměníku s pevnou trubkovicí. Protože je dostupnější cena za jednotku hmotnosti výměníku  $C_g$ , je nutné nalézt závislost mezi plochou výměníku a jeho hmotností. V literatuře<sup>2)</sup> je uvedena relace mezi hmotností a výměnnou plochou tepelných výměníků. V logaritmických souřadnicích má korelace mezi hmotností a výměnnou plochou výměníku lineární tvar

$$\ln G = a \cdot \ln S + \ln A \quad (11)$$

Pro cenu 1 m<sup>2</sup> kondenzátoru  $C$  potom platí

$$C_g = A \cdot S^{a-1} \cdot C_g \quad (12)$$

Po dosazení (12) do (9) obdržíme

$$(\Delta T_v)_{ext.} = D - \frac{A \cdot S^{a-1} \cdot C_g \cdot \Delta H_{kon.}}{3600 \cdot k \cdot t \cdot C_t} \quad (13)$$

Úpravou a dosazením za  $S_{ext.}$  z (10) získáme

$$\begin{aligned} [D - (\Delta T_v)_{ext.}] \cdot \left( \frac{F \cdot c_p}{k} \ln \frac{D}{D - (\Delta T_v)_{ext.}} \right)^{1-a} = \\ = \frac{A \cdot C_g \cdot \Delta H_{kon.}}{3600 \cdot k \cdot t \cdot C_t} \quad (14) \end{aligned}$$

Ze vztahu (14) lze hodnotu  $(\Delta T_v)_{ext.}$  vypočítat numericky, například metodou půlení intervalu, přičemž ekonomicky zajímavé je pouze nalezení maxima funkce  $E = f(\Delta T_v)$ .

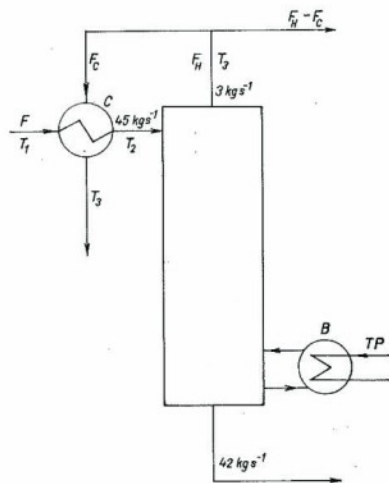
## Výsledky a diskuse

Korelací mezi plochou a hmotností v logaritmických souřadnicích standardní řady trubkových výměníků (tepla<sup>2)</sup> při volbě výměníku s trubkami o vnějším průměru 25 mm a celkové délce trubek 4 m, byl nalezen mezi hmotností a výměnnou plochou vztah

$$\ln G = 0,8145 \ln S + 4,392 \quad (15)$$

s korelačním koeficientem 0,9963. Plocha  $S$  měla variační rozpětí 9 až 500 m<sup>2</sup>, hmotnost  $G$  rozpětí od 470 do 14 230 kg. Předpokládáme, že tento vztah lze extrapolovat i mimo uvedené rozpětí.

Při výpočtech jsme předpokládali, že vlastnosti nástřiku do rektifikační kolony lze aproximovat vlastnostmi vody. Nástřik  $F$  do kolony byl uvažován s minimální teplotou 80 °C ( $T_1 = 353$  K). Střední tepelná kapacita nástřiku mezi teplotami 80 až 111 °C ( $T_3 = 384$  K) byla převzata z literatury<sup>3)</sup>. Využitelná entalpie topné páry o tlaku 300 kPa, teplotě 215 °C, kondenzát odchází při teplotě 130 °C, byla stanovena podle literatury<sup>3)</sup>. Kilogramová cena výměnné plochy (40 Kčs kg<sup>-1</sup>) byla nalezena v literatuře<sup>4)</sup> a upravena vzhledem k cenovému vývoji. Cena topné páry (0,055 Kčs kg<sup>-1</sup>) může kolísat podle způsobu výroby, pro dané podmínky ji však považujeme za konstantní. Teplotní rozdíl mezi teplotou nástřiku a teplotou par v hlavě kolony je dán technologií. Střední dobu života



Obr. 2. Schéma rektifikační kolony s předehřevem nástřiku

kondenzátoru odhadujeme pro dané podmínky na 80 000 provozních hodin. Předpokládáme, že v trubkách výměníku (TP) proudí nástřík do kolony, v mezitrubkovém prostoru (MP) kondenzuje pára z hlavy kolony. Koeficient přestupu tepla na straně kondenzující páry bývá řádově  $10^2$  až  $10^3$ krát větší než koeficient přestupu tepla na straně vody proudící v TP. Při rychlosti vody v trubkách výměníku o vnitřním průměru 21 mm kolem  $0,5 \text{ m s}^{-1}$  a pro teplotu kolem  $80^\circ\text{C}$  vychází koeficient přestupu tepla v TP  $\alpha_{TP} = 4000 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ . Pro koeficient prostupu tepla  $k$  volíme proto s rezervou  $k = 1000 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  a předpokládáme, že i přes přítomnost asi 1% organické fáze v páře kolony  $\gamma$  a asi 0,1% organické fáze v nástříku rektifikační kolony zůstane hlavní odpor pro prostup tepla na straně TP výměníku.

Tabulka I  
Parametry funkce  $E(\Delta T_v)$

$A$	$80,8 \text{ kg m}^{-3\text{s}}$	$D$	$31 \text{ K}$
$a$	$0,8145$	$F$	$45 \text{ kg s}^{-1}$
$C_p$	$40 \text{ KJs kg}^{-1}$	$\Delta H_{\text{kond.}}$	$2350 \text{ kJ kg}^{-1}$
$C_p$	$0,055 \text{ KJs kg}^{-1}$	$k$	$1000 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
$C_p$	$4191 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$t$	$80\,000 \text{ h}$

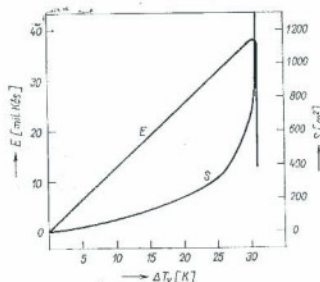
V tabulce I jsou shrnuty hodnoty parametrů funkce  $E(\Delta T_v)$ .

Na obrázku 3 je uvedena závislost  $E$  a plochy  $S$  kondenzátoru  $C$  na  $\Delta T_v$  pro hodnoty parametrů funkce  $E(\Delta T_v)$  uvedené v tabulce I. Pro daný případ  $E_{\text{max}} = 38\,321\,000 \text{ KJs}$ ,  $S = 1\,028,9 \text{ m}^2$  a  $(\Delta T_v)_{\text{ext.}} = 30,86 \text{ K}$ . Z vypočtených hodnoty  $(\Delta T_v)_{\text{ext.}}$  plyne z entalpické bilance pro průtok páry z hlavy kolony  $F_C$  do kondenzátoru  $C$   $2,6 \text{ kg s}^{-1}$ .

Tabulka II  
Výsledky výpočtu kondenzátoru o ploše  $500 \text{ m}^2$

počet trubek	počet etodů	šířka trubek [m]	$\alpha_{TP}^{(K)}$ [ $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ]	$\alpha_{MP}^{(K)}$ [ $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ]	$k^{(K)}$ [ $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ]	$T_1$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$T_2$ [ $^\circ\text{C}$ ]
1584	2	4	1665—1825	19 345—59 636	1230—1398	80	110,08
1500	6	4	4425—4738	15 000—172 460	2619—3297	80	110,90

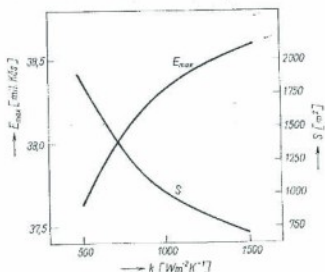
a) hodnoty koeficientů  $a$  a  $k$  se mění podél výměníku; v tabulce jsou uvedeny okrajové meze



Obr. 3. Závislost efektivity  $E$  a plochy kondenzátoru  $S$  na ohřívání nástříku  $\Delta T_v$

Změna hodnoty parametrů z tabulky I samozřejmě ovlivní vypočtenou plochu výměníku pro  $E_{\text{max}}$ , jakož i hodnotu  $E_{\text{max}}$ . Jako příklad uvádíme (obr. 4) vliv hodnoty součinitele prostupu tepla  $k$  na maximální ekonomický efekt  $E_{\text{max}}$  a plochu kondenzátoru  $S$  pro  $E_{\text{max}}$ . Z obrázku 4 plyne, že hodnota koeficientu prostupu tepla ovlivňuje zejména plochu kondenzátoru (vztah (1)), z něhož vyplývá, že s rostoucím  $k$  klesá  $S$  pro danou výkonnost výměníku. Podobné závislosti lze získat i pro další parametry uvedené v tabulce I.

K ověření správnosti nalezené výměnné plochy kondenzátoru byla pomocí standardního programu pro výpočet kondenzátorů<sup>2)</sup> vypočtena výkonnost kondenzátoru  $C$  za předpokladu, že fyzikální vlastnosti nástříku do kolony a par opouštějících hlavu kolony byly aproximovány vlastnostmi vody a vodní páry. Při výpočtu byl uvažován výměník o ploše  $S = 500 \text{ m}^2$



Obr. 4. Vliv koeficientu prostupu tepla  $k$  na maximální efektivity  $E_{\text{max}}$  a plochu kondenzátoru  $S$

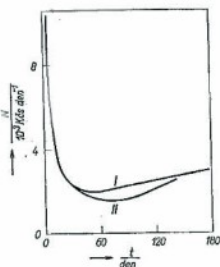
s vnitřním průměrem trubek 21 mm, délcí trubek 4 m a s roztečí trubek  $32,5 \text{ mm}$ , průtok nástříku  $F = 45 \text{ kg s}^{-1}$ , průtok par  $F_C = 2,6 \text{ kg s}^{-1}$ . Výsledky výpočtu jsou shrnuty v tabulce II. Z tabulky vyplývá, že kondenzátor  $C$  s plochou  $500 \text{ m}^2$  zabezpečí ohřívání nástříku o  $\Delta T_v = 30,90 \text{ K}$  pro šestichodý výměník ( $k = 2619$  až  $3297 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ). Kondenzátor o ploše  $S \approx 1600 \text{ m}^2$  je tedy možné považovat za dostatečný pro požadovanou výkonnost a předpokládaný nižší koeficient prostupu tepla  $k = 1000 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ .

### Závěr

Předložená práce ukázala jednoznačné přednosti využití kondenzačního tepla par k předehřevu nástříku rektifikační kolony. Je zřejmé, že při současných cenách energií a cenách vypalíků se vyplácí předehřívání nástříku na teplotu pouze o asi 0,1 K nižší než je teplota

měníku za vyčistěnou studenou zálohu dvakrát za rok dosáhne (pro fond pracovní doby 8000 h) hodnoty asi 900 000 Kčs. Při snížení délky provozní periody na 60 dní (tj. do oblasti, v níž se nachází minimum ná-

kladové funkce) dosáhnou roční náklady pro  $N = 2000$  Kčs/den hodnoty asi 600 000 Kčs. Aplikací výsledků optimalizační analýzy by se tedy mohly snížit celkové náklady (zejména náklady na topnou páru) prakticky o 33 % z množství, které je nutné do výroby dodávat navíc pro zanášení teplosměnných ploch.



Obr. 3. Průběh nákladové funkce  $N$   
I - první období; II - druhé období

### Závěr

Předložená práce se pokusila demonstrovat na praktickém příkladě dlouhou dobu známé souvislosti mezi zanášením teplosměnných ploch výměníků tepla a zvýšenými náklady na topnou páru, resp. chladičí média. K tomu, aby bylo možné snižovat náklady vznikající zanášením teplosměnných ploch výměníků tepla, je zapotřebí hledat a používat takové metody čištění výměníků, které umožní jejich snadnou aplikaci v praxi, přičemž náklady na čisticí operaci musí být co nejmenší.

### Literatura

1. Van Matro J.: Hydrocarbon Process, 56 (7), 115 (1977). — 2. Fraboulet B.: Pet. Tech. 277, 45 (1980). — 3. Callahan J. W., Laningham G. R.: US pat. 3 850 741 (1974); CA 82, 101 134 s.

## Vliv olova v surovině na korozi a nauhličení pyrolýzního konstrukčního materiálu

Hanaš Třáma, Milošlav Vyklický,  
Státní výzkumný ústav materiálu, Praha,  
Emil Hamouz,  
Chemické závody ČSSP, Litvínov

620.192.56:660.5-194

Redakce došlo 5. 9. 1983

Znečištění pyrolýzní suroviny malým množstvím olova může ovlivnit korozi stálost vysokolegovaných konstrukčních materiálů. Byl studován vliv PbO při teplotách 800 až 1100 °C u dvou vysokolegovaných materiálů. V oxidační atmosféře při odstraňování grafitického povlaku v trubkách způsobuje PbO silnou korozi, jejíž rozsah je závislý na teplotě. V redukčním prostředí malé množství olova v surovině prakticky neovlivňuje míru nauhličení ani usazování uhlíku.

### Úvod

Konstrukční vysokolegované materiály používané pro pyrolýzu dobře odolávají teplotám kolem 1000 °C na vzduchu, tj. v oxidační atmosféře, avšak v redukční atmosféře uhlíkovdík s vysokou aktivitou uhlíku se běžně stěny pyrolýzních trubek nauhličují. To vede ke změně struktury materiálu, ke zvětšení objemu nauhličeného pásma, ke zhoršení mechanických vlastností a konečně k rozrušení trubkového systému. Současně ovšem působí řada dalších vlivů, především namáhání při vysokých teplotách. Vliv nauhličení a jeho podmínky byly podrobně sledovány<sup>1-3</sup>.

Životnost trub pro pyrolýzu však mohou ovlivňovat i případné nečistoty ve zpracovávané surovině. Z nečistot v surovině byl sledován vliv síry, resp. H<sub>2</sub>S<sup>4</sup>) a bylo zjištěno, že síra v surovině snižuje míru nauhličení. U olova se předpokládá, že se při pyrolýze projevuje negativně, ale jeho vliv dosud nebyl objasněn. Olovo se do suroviny může dostat jako nečistota ze zpracovávané rupy, ale i kontaminací přepravních nádob tetramethylolovem a tetraethylolovem současně s jistým množstvím halogenovaných uhlovdíků. Provozně se předpokládají obsahy olova ve vsazované surovině do 50 ppb.

Při pyrolýze se na stěnách trubek usazuje uhlík ve formě tvrdého (grafitického) povlaku, který brání přístupu tepla, a tím vede ke zvyšování teploty trub. Současně se zužuje světlost trub. Dalším nepříznivým působením je nauhličování vnitřního povrchu trub, které zpočátku probíhá velmi rychle. Nauhličování trubek z vnitřní strany je závislé na předcházejících podmínkách výrobního procesu a dodržování postupu při odstraňování usazeného uhlíku. Nauhličování je rovněž závislé na kvalitě povrchu, který musí být co nejhladší (vnitřní povrch se opracovává). Vhodné je slabé povrchové naoxidování před zahájením vsazování uhlovdíků.