

Termokomprese par z hlavy rektifikační kolony

Jan Bartoň, Karel Ederer,

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

Redakci došlo 25. 11. 1984

65.048.37

V článku je analyzována možnost využití termokomprese par s obsahem asi 99 % vodní páry z hlavy rektifikační kolony pro přípravu páry vhodné k topení ve vařáku kolony. Z nákladové funkce dané součtem provozních nákladů na termokompresi, nákladů na kompresor a vařáky rektifikační kolony a nákladů na nízkotlakou topnou páru byla vypočtena optimální teplota par po kompresi, resp. kompresní poměr. Optimální kompresní poměr byl vypočten $p_2/p_1 = 1,13$. Vařák využívající k topení zkomprimovanou páru tak pracuje s nízkým teplotním rozdílem mezi teplotou kondenzace zkomprimované páry a teplotou varu (asi 5 K), což vyžaduje použití velkou výměnnou plochu vařáku.

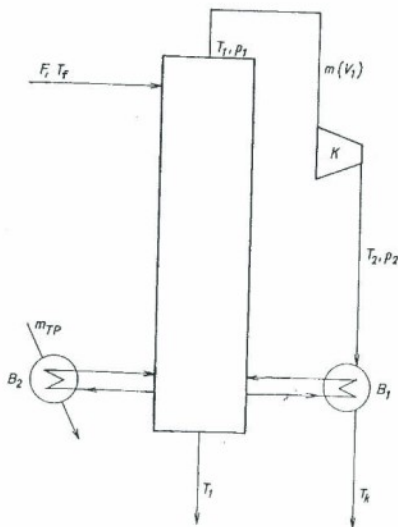
Úvod

V předcházejícím článku¹⁾ jsme popsali způsob rekuperace tepla v rektifikační koloně s vyčleněním maximálního ekonomického efektu v případě, že se využije kondenzačního tepla par opouštějících hlavu kolony pro předehřev nástřiku prostou kondenzací. Kromě této možnosti existuje i alternativní využití páry opouštějící hlavu kolony, a to pro topení v patě kolony v případě, že se pára zkomprimuje (např.²⁾). V předloženém článku je podána analýza takového způsobu využití entalpie par z hlavy kolony zaměřená na nalezení optimální teploty par po kompresi.

Rozbor problému

Rektifikační kolona (o průměru 2800 mm a výšce 11 000 mm), jejíž činnost byla detailně popsána v práci¹⁾, slouží k čištění tzv. procesní vody od relativně malého množství uhlovodíků. Páry opouštějící hlavu kolony obsahují asi 99 % hmot. vodní páry, zbytek je tvořen organickými látkami jako xylen ap. Po zvýšení teploty par, např. termokompressí, by bylo možné využít kondenzačního tepla těchto par k topení v patě destilační kolony. Na obrázku 1 je znázorněno schéma možného uspořádání proudů v případě komprese par z hlavy kolony, na obrázku 2 pak průběh komprese v diagramu $i-s$.

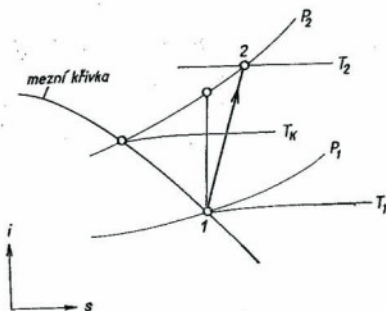
Nástřik kolony přichází s teplotou T_1 na 1. patro kolony shora. Páry opouštějí kolonu ve stavu daném podle obrázku 2 bodem 1 (p_1, T_1) a polytropickou kompressí v kompresoru K jsou převedeny do stavu 2



Obr. 1. Schéma rektifikační kolony s termokompressí par z hlavy kolony

(p_2, T_2). Z kompresoru K odcházejí páry do vařáku B_1 , v němž zkondenzují při teplotě T_k a kondenzát je odváděn ze systému. Kolona je kromě toho opatřena i vařákem B_2 , v němž se k vyhřívání využívá nízkotlaké topné páry m_{TP} . Je použito této koncepce proto, aby se kondenzát nízkotlaké topné páry z vařáku B_2 nemísil s kondenzátem z vařáku B_1 , v němž jsou obsaženy organické látky. Kondenzát vařáku B_1 se musí odvádět k čištění.

Vyšší teplotu T_2 lze dosáhnout pouze s vynaložením větší spotřeby energie v kompresoru K . Vyšší teplota T_2 je příznivá pro hnačí sílu výměny tepla ve vařáku B_1 a zároveň pro vyšší hodnotu entalpie páry po kompresi. Čím vyšší je entalpie, resp. teplota par T_2 po kompresi, tím menší může být přívod topné páry m_{TP} do vařáku B_2 . Cílem práce bylo nalézt optimální hodnotu teploty T_2 tak, aby součet provozních nákladů na kompresi v kompresoru K , nákladů na výměňky B_1 a B_2 , nákladů na kompresor a nákladů na topnou páru přicházející do vařáku B_2 byl minimální.



Obr. 2. Komprese páry v diagramu $i-s$

Náklady na kompresi

Pro výpočet kompresní práce jsme z řady vzorců vybrali vztah²⁾:

$$W = \frac{n}{n-1} \cdot p_1 \cdot V_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \cdot \eta^{-1} \quad (1)$$

kde p_1, V_1 je počáteční tlak a objem stlačovaného média, p_2 je tlak po kompresi, n je konstanta závislá na charakteru stlačovaného média a typu kompresoru a η je účinnost kompresoru.

Je výhodné vyjádřit tlak po kompresi p_2 pomocí teploty po kompresi T_2 ve tvaru

$$p_2 = p' \cdot T_2 + p'' \quad (2)$$

kde p', p'' jsou konstanty závislé na počátečním stavu stlačovaného média (p_1, T_1).

Náklady na kompresi páry N_1 za čas t při ceně kilowatthodiny elektrické energie C_{kWh} jsou potom

$$N_1 = \frac{n}{n-1} \cdot p_1 \cdot V_1 \left[\left(\frac{p' \cdot T_2 + p''}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \cdot C_{kWh} \cdot t \cdot \eta^{-1} \quad (3)$$

Náklady na vařák B_1

Předpokládáme, že při topení přehřátou zkomprimovanou párou kondenzuje pára na celé výměnné ploše vařáku. Pro výkon vařáku potom platí

$$Q = k_1 \cdot S_1 (T_k - T_1) \quad (4)$$

Teplota kondenzace T_k je úměrná teplotě T_2 a předpokládáme, že platí

$$T_k = aT_2 + b \quad (5)$$

(kompresní vzniká přehřátá pára, jejíž kondenzační teplota T_k odpovídá syté páře při tlaku po kompresi). Pak lze vztah (4) upravit na

$$Q = k_1 \cdot S_1 (aT_2 + b - T_1) \quad (6)$$

Množství tepla předané vařákem využívajícím zkomprimovanou páru za jednotku času je z bilance rovno:

$$Q = m \cdot \Delta H \quad (7)$$

Pro využitelné teplo komprimované páry ΔH předpokládáme, že platí

$$\Delta H = cT_2 + d \quad (8)$$

Při ceně l m² výměnné plochy C_e činí náklady na vařák B_1

$$N_2 = C_e m (cT_2 + d) / k_1 (aT_2 + b - T_1) \quad (9)$$

Náklady na údržbu vařáku během doby t jsou zanedbány.

Náklady na vařák B_2

Protože pro celkové množství tepla Q_0 , které musí být do kolony dodáno za jednotku času, platí

$$Q_0 = F \cdot c_{v1} (T_1 - T_1) + m \cdot \Delta H_{vTP} \quad (10)$$

kde první člen na pravé straně vztahu (10) představuje teplo spotřebované na ohřátí nástřiku k bodu varu v koloně a druhý člen výparné teplo. Pro výkon vařáku na topnou páru lze psát

$$Q_{TP} = F \cdot c_{v1} (T_1 - T_1) + m \cdot (\Delta H_{vTP} - \Delta H) \quad (11)$$

Náklady na vařák jsou:

$$N_3 = C_e \cdot Q_{TP} / k_2 (T_{TP} - T_1) \quad (12)$$

s tím, že náklady na údržbu výměníku jsou opět zanedbány.

Náklady na topnou páru

Spotřeba topné páry ve vařáku B_2 je

$$m_{TP} = Q_{TP} / \Delta H_{\text{kond, TP}} \quad (13)$$

se zanedbáním tepelných ztrát. Náklady na topnou páru při ceně kilogramu páry C_{TP} dosáhnou za dobu t :

$$N_4 = 3600 \cdot m_{TP} \cdot C_{TP} \cdot t \quad (14)$$

Náklady na kompresor

Cena kompresoru závisí zejména na jeho výkonu a na podmínkách komprese (podle požadavků na

kompresi je třeba volit typ kompresoru). Protože v daném případě je množství páry pro kompresi konstantní, předpokládáme, že náklady na kompresor N_K jsou přímo dány jeho cenou C_K . Náklady na údržbu zanedbáváme.

Celkové náklady

Pro účelovou nákladovou funkci N_0 celkových nákladů na zabezpečení funkce rektifikační kolony po energetické stránce platí

$$N_0 = \sum_{i=1}^5 N_i \quad (15)$$

Derivaci funkce $N_0(T_2)$ podle teploty T_2 po kompresi obdržíme

$$N'_0 = p' p_1 V_1 C_{kwh} \left(\frac{1}{p_1} \right)^{(n-1)/n} (p' T_2 + p'')^{-1/n} \eta^{-1} + C_2 \cdot m \cdot \frac{c(aT_2 + b - T_1) - a(cT_2 + d)}{k_2(aT_2 + b - T_1)^2} - mc \left(\frac{C_2}{k_2(T_{TP} - T_2)} + \frac{3600 t C_{TP}}{H_{kond, TP}} \right) \quad (16)$$

položením $N'_0 = 0$ lze např. metodou půlení intervalu nalézt dva kořeny, pro které je podmínka $N'_0 = 0$ splněna. Reálný význam má pouze kořen $T_2 > T_1$.

Výsledky a diskuse

Vlastnosti kapalné i plynné fáze v koloně jsou aproximovány vlastnostmi čisté vody. Předpokládáme, že teplota T_1 v koloně je 109 °C, tlak p_1 140 kPa. V tabulce I jsou uvedeny hodnoty tlaku a teploty páry při izentropické adiabatické kompresi páry z teploty a tlaku v koloně a využitelné teploty páry po kompresi ΔH .

Tabulka I

Vlastnosti komprimované páry při izentropické kompresi z tlaku $p_1 = 140$ kPa a teploty $T_1 = 109$ °C

p_2 [kPa]	T_2 [°C]	T_k [°C]	ΔH [kJ kg ⁻¹]
150	116	112	2232
160	121	114	2234
180	132	117	2241
200	142	120	2247
220	152	123	2253
240	161	126	2258
260	169	128	2264
280	177	131	2267
300	183	133	2269

Pro kondenzační teplotu T_k bylo lineární regresí s daty z tabulky I získáno

$$T_k = 0,306 T_2 + 76,62 \quad r_{xy} = 0,999 \quad (17)$$

Podobně pro využitelné teplo komprimované páry a pro tlak po kompresi byly získány lineární regresí vztahy

$$\Delta H = 0,583 T_2 + 2164,4 \quad r_{xy} = 0,997 \quad (18)$$

$$p_2 = 2,183 T_2 - 107,2 \quad r_{xy} = 0,997 \quad (19)$$

Pro střední tepelnou kapacitu $c_{p,i}$ byla brána v teplotním intervalu 80 až 109 °C stejná hodnota jako v práci¹⁾.

Tabulka II
Parametry nákladové funkce

parametr	hodnota	rozměr
a	0,306	—
b	76,62	°C
c	0,583	kJ kg ⁻¹ K ⁻¹
$c_{p,i}$	4,191	kJ kg ⁻¹ K ⁻¹
C_2	1 000	Kčs m ⁻²
C_{TP}	0,055	Kčs kg ⁻¹
C_{kwh}	0,232	Kčs kWh ⁻¹
d	2 184,4	kJ kg ⁻¹
F	46	kg s ⁻¹
k_1	0,5	kW m ⁻² K ⁻¹
k_2	2	kW m ⁻² K ⁻¹
m	3,05	kg s ⁻¹
n)	1,4	—
ΔH_{TP}	2 232	kJ kg ⁻¹
$\Delta H_{kond, TP}$	2 345	kJ kg ⁻¹
p'	2,183	kPa K ⁻¹
p''	-107,15	kPa
p_1	140	kPa
t	80 000	h
T_1	109	°C
V_1	3,84	m ³ s ⁻¹
η	0,75	—

a) lit. 5

Parametry nákladové funkce (15) jsou přehledně uvedeny v tabulce II. Volba součinitelů prostupu tepla ve vařících B_1 a B_2 vychází z počtu součinitelů přestupu tepla pro par vody a kondenzaci nízkotlaké topné páry ve vařáku B_2 za podmínek v koloně. Součinitel přestupu tepla při varu, vypočtený podle literatury⁶⁾, činí pro zvolenou hustotu tepelného toku ve vařáku $q = 20$ kW m⁻² asi 3 kW m⁻² K⁻¹. Součinitel přestupu tepla při kondenzaci topné páry o tlaku 350 kPa a teplotě 200 °C na vnějším povrchu svislých trubek s pseudolaminárním tokem kondenzátu byl podle⁶⁾ stanoven asi 9 kW m⁻² K⁻¹. Pro součinitel prostupu tepla ve vařáku B_2 vychází při zanedbání odporu stěny vařáku $k_2 \approx 2,5$ kW m⁻² K⁻¹. V případě použití komprimované páry z hlavy kolony pro topení ve vařáku B_1 , může organická fáze přítomná v párech v hlavě kolony snížit součinitel přestupu tepla při kondenzaci komprimované páry. Z těchto důvodů volíme hodnoty $k_2 = 2$ kW m⁻² K⁻¹, resp. $k_1 = 0,5$ kW m⁻² K⁻¹.

Pro data uvedená v tabulce II byly získány výsledky, které jsou shrnuty v tabulce III.

Jak vyplývá z tabulky III, kompresi je třeba získat páru o teplotě asi 122 °C, což odpovídá smlačinné páry z hlavy kolony z tlaku 140 kPa na 158,8 kPa (kompresní poměr $p_2/p_1 = 1,13$). Na tomto místě je třeba připomenout, že vztahy (17) až (19) platí pro ideální izentropickou kompresi. Skutečná komprese probíhá vždy s přírůstkem entropie (obr. 2). Tento jev vztahy

Tabulka III
Výsledky výpočtu teploty T_2

T_2	121,8 °C	S_1	1061 m ²
p_2	158,8 kPa	S_2	91 m ²
T_k	113,9 °C	m_{TP}	2,33 kg s ⁻¹

(17) až (19) nezhodnější. Pro malé kompresní poměry není chyba tímto jevem způsobená velká a použití vztahů (17) až (19) je opodstatněné.

Tím, že se využívá entalpie páry z hlavy rektifikační kolony, snižuje se spotřeba topné páry o 2,91 kg s⁻¹ (asi o 50 %); toto snížení spotřeby se za dobu 80 000 provozních hodin promítá celkovou úsporou topné páry ve výši 46 mil. Kčs.

Pro doplnění uvádíme v tabulce IV vliv velikosti součinitele prostupu tepla k_1 na teplotu páry T_2 po kompresi a na plochu vařáku B_1 . Úspora topné páry je pro všechny hodnoty k_1 prakticky shodná. Se snižující se hodnotou k_1 se zvyšují požadavky na kompresní poměr kompresoru. V tabulce V je uveden vliv požadovaného tlaku par po kompresi na instalovaný výkon elektromotoru.

Tabulka IV

Vliv součinitele prostupu tepla k_1 na teplotu T_2 , T_2 , tlak p_2 a plochu S_1

k_1 [kW m ⁻² K ⁻¹]	T_1 [°C]	T_2 [°C]	p_2 [kPa]	S_1 [m ²]
1,25	115,6	112,0	146,2	823
1,00	116,8	112,4	147,9	867
0,75	118,7	112,9	151,9	937
0,50	121,8	113,9	158,8	1061
0,25	129,3	116,2	175,2	1342

Tabulka V

Vliv žádaného tlaku p_2 na instalovaný výkon N elektromotoru ($\eta = 0,75$)

p_2 [kPa]	p_2/p_1	N [kW]
150	1,07	48,7
170	1,21	139,6
190	1,35	223,2

Při kompresi páry z hlavy kolony na 190 kPa vycházejí provozní náklady na kilogram této páry pouze asi 0,5 haléře, tj. asi desetkrát méně než náklady na topnou páru. Pro námi požadovaný stupeň komprese ($p_2/p_1 = 1,13$) a průtok par ($V_1 = 3,84$ m³ s⁻¹) vyplývá pro příkon elektromotoru kompresoru hodnota asi 100 kW. Těmto podmínkám přibližně vyhovuje kompresor ČKD typu TD IRLN nebo kompresor plicních turbodmychadel První brněnské strojířny typu PDH. Tyto kompresory jsou však určeny zejména pro kompresi vzduchu a při použití ke kompresi páry by bylo zřejmé nutné provést některé konstrukční úpravy^{7,8}). Celkové náklady na instalaci kompresoru a vařáky s větší výměnnou plochou odhadujeme na 1 až 2 mil. Kčs, což při roční úspoře energie kolem 4 mil. Kčs znamená investiční návratnost 0,5 roku.

Protože ve vztahu (11) přibližně platí, že výparné teplo páry v koloně a její kondenzační teplo ve vařáku B_1 je stejné, topná pára do vařáku B_2 slouží de facto ke ohřevu nástřiku kolony na bod varu. Pouze v případě, že by teplota nástřiku T_1 byla blízká teplotě varu v koloně, by k činnosti kolony stačil vařák B_1 .

Ve srovnání s úsporou topné páry v práci¹), která byla za období 80 000 provozních hodin asi 39 mil. Kčs, je varianta uvedená v této práci o asi 7 mil. Kčs

úspěšnější. Avšak v případě využití kondenzace par z hlavy kolony popsané v práci¹) nemohlo být přímo v koloně využito veškeré kondenzační teplo par, protože ho nástřik není schopen úplně akumulovat.

Závěr

Předložená práce ukázala výhody termokomprese par v rektifikační koloně. Pára k topení získaná termokompresí je asi 10krát lacinější než pára vyrobená klasickým způsobem. Při topení komprimovanou párou je výhodné používat relativně malou teplotní diferencí mezi teplotou kondenzace a teplotou varu (v daném případě asi 5 K) s tím, že malá hmotná síla výměny tepla musí být kompenzována velkou výměnnou plochou vařáku (v daném případě kolem 1000 m²).

Seznam symbolů

- a — konstanta vztahu (5)
- b — konstanta vztahu (5)
- B_1 — vařák na zkompimovanou páru
- B_2 — vařák na topnou páru
- c — konstanta vztahu (8)
- $c_{p,1}$ — střední teplotní kapacita nástřiku [kJ kg⁻¹ K⁻¹]
- $c_{p,wh}$ — oena hmotnostní
- C_0 — oena výměnné plochy vařáku [Kčs m⁻²]
- $C_{0,TP}$ — oena topné páry [Kčs kg⁻¹]
- d — konstanta vztahu (8)
- F — průtok nástřiku [kg s⁻¹]
- ΔH — využitelné teplo komprimované páry [kJ kg⁻¹]
- $\Delta H_{kond,TP}$ — kondenzační teplo topné páry [kJ kg⁻¹]
- $\Delta H_{v,TP}$ — výparné teplo páry v rektifikační koloně [kJ kg⁻¹]
- K — kompresor
- k_1 — součinitel prostupu tepla ve vařáku B_1 [kW m⁻² K⁻¹]
- k_2 — součinitel prostupu tepla ve vařáku B_2 [kW m⁻² K⁻¹]
- m — hmotový průtok par z hlavy kolony [kg s⁻¹]
- m_{TP} — průtok topné páry do vařáku [kg s⁻¹]
- N — instalovaný výkon elektromotoru [kW]
- N_0 — celková náklady [Kčs]
- $N_{1,1} = 1,5$ — náklady [Kčs]
- n — konstanta vztahu (1)
- p_1 — tlak par v koloně [kPa]
- p_2 — tlak par po kompresi [kPa]
- p', p'' — konstanty vztahu (2)
- Q — výkon vařáku na zkompimovanou páru [kW]
- Q_0 — celkový tok tepla do kolony [kW]
- Q_{TP} — výkon vařáku na topnou páru [kW]
- q — hustota tepelného toku [kW m⁻²]
- $r_{x,y}$ — korelační koeficient lineární regrese mezi nezávisle a jednou závisle proměnnou
- S_1, S_2 — plocha vařáku B_1, B_2
- t — provozní doba
- T_1 — teplota v koloně [°C]
- T_2 — teplota par po kompresi [°C]
- T_3 — teplota nástřiku [°C]
- T_4 — teplota kondenzace zkompimované páry [°C]
- T_5 — teplota kondenzace topné páry [°C]
- TPP — objemový průtok par z hlavy kolony [m³ s⁻¹]
- η — kompresní práce [kJ]
- η — účinnost kompresoru

Literatura

1. Bartoň J., Ederer K.: Chem. prům. (v tisku). — 2. Weimer L. D., Dolf H. R., Austin D. A.: Chem. Eng. Progr. November, 70 (1980). — 3. Chludský V.: *Pístové kompresory*, SNTL Praha 1968. — 4. Rikvin S. I., Alexandrov A. A.: *Теплофизические свойства воды и водяного пара*, Энергия, Москва 1980. — 5. Šorin S. N.: *Sdílení tepla*, SNTL/ALFA, Praha 1968. — 6. Pechou V. a kol.: *Příklady chemicko-inženýrských výpočtů II*, SNTL, Praha 1964. — 7. Informace ČKD Praha, závod Kompresory, 1984. — 8. Brunovský I.: Studie kompresorů plicních turbodmychadel. Zpráva Z-08-04/82. První brněnská strojířna, Volká Bítěš, 1982.