Teorie vyvařování alkoholu

JAROSLAV SUKOVATÝ
Hlavní správa lihovarů a škrobáren, Praha
JAN NAVRÁTIL
České vysoké učení technické, Praha

547.262 : 542.48

V předložené práci autoři podávají matematické vztahy, které platí pro vyvařování alkoholu včetně spotřeby páry. Tato práce vznikla proto, že naše odborná literatura nemá dosud matematické zpracování těchto problémů.

I. Prostá destilace

Předpokládejme, že máme k disposici binární směs alkohol—voda. Je-li váhové množství alkoholu v binární směsi vyjádřeno ve váhových procentech, pak platí rovnice:

$$D \,.\, u = 100 \,.\, V \tag{1}$$

kde D je váhové množství binární směsi,
u — váhové procento alkoholu v binární směsi,
V — váhové množství alkoholu v binární směsi.

Z rovnice (1) je $V = \frac{D \,.\, u}{100}$

Diferenciací tohoto vztahu dostáváme:

$$dV = \frac{D \,.\, du}{100} + \frac{u \,.\, dD}{100} \tag{2}$$

kde dV je elementární množství odpařeného alkoholu (v závislosti na množství přivedeného tepla),
du — elementární váhové množství alkoholu v binární směsi,
dD — elementární množství binární směsi.

Elementární množství binární směsi přeměněné v páry s obsahem alkoholu je dáno vztahem:

$$x \,.\, dD = 100 \,.\, dV \tag{3}$$

Eliminací veličiny dV z rovnic (2) a (3) dostaneme po úpravě diferenciální rovnici:

$$x \,.\, dD = D \,.\, du + u \,.\, dD \tag{4}$$

Z této diferenciální rovnice určíme D v závislosti na u.

Podle fysikálních tabulek (1, 2 a 3) lze stanovit veličinu x, t. j. množství alkoholu v parách v závislosti na množství alkoholu v binární směsi (podrobené prosté destilaci) a na jiných faktorech takto:

$$x = \frac{90 \,.\, u}{7{,}5 + u} \tag{5}$$

Rovnice (5) platí pro vyvařování alkoholu z binární směsi, kde $0{,}1 < u < 28{,}99\ \%$ váhových alkoholu.

Dosazením veličiny x do rovnice (4) dostáváme diferenciální rovnici:

$$\frac{dD}{D} + \frac{(7{,}5 + u) \,.\, du}{u\,(u - 82{,}5)} = O \tag{6}$$

Integrací rovnice (6) dostáváme obecný integrál

$$D \,.\, (u - 82{,}5)^{\frac{12}{11}} = C \,.\, u^{\frac{1}{11}} \tag{7}$$

kde C je integrační konstanta. Tuto integrační konstantu určíme z počáteční podmínky, že pro $u = u_1$ je $D = D_1$. Tedy

$$\frac{D_1}{D} = \left(\frac{u - 82{,}5}{u_1 - 82{,}5}\right)^{\frac{11}{12}} \cdot \left(\frac{u_1}{u}\right)^{\frac{1}{11}} \tag{8}$$

Nás zajímají veličiny D_2 a u_2, protože určují váhové množství binární směsi po destilaci a ztrátový alkohol ve váhových procentech. Dosaďme do rovnice (8) za $u = u_2$ a za $D = D_2$ a tak dostaneme důležitý vztah mezi veličinami počátečními a konečnými. Tedy:

$$\frac{D_1}{D_2} = \left(\frac{u_2 - 82{,}5}{u_1 - 82{,}5}\right)^{\frac{11}{12}} \cdot \left(\frac{u_1}{u_2}\right)^{\frac{1}{11}} \tag{9}$$

Uvedeme nyní praktický případ:

Mějme binární směs, která obsahuje 35 % objemových alkoholu a vodu. Za úkol je zjistit, jaké množství směsi je třeba odpařit, aby vyvařením kleslo procento alkoholu na k-tinu původního obsahu.

Použijeme rovnice (9), do které dosadíme za $u_2 = \frac{u_1}{k}$.

Po snadné úpravě máme důležitou rovnici pro výpočet D_2:

$$D_2 = D_1 \,.\, k^{-\frac{1}{11}} \cdot \left(\frac{82{,}5\,k - ku_1}{82{,}5\,k - u_1}\right)^{\frac{12}{11}} \tag{10}$$

Výraz $D_1 - D_2$ udává množství odpařené binární směsi.

Zvolíme-li číselné hodnoty $D_1 = 100$ kg, $u_1 = 28{,}99\,\%$ váhových, $k = 100$ (čili $u_2 = \frac{u_1}{100} = 0{,}29\ \%$ váhových), pak pouhým dosazením do rovnice (10) dostaneme:

$$D_2 = 41{,}18 \text{ kg}$$

Je třeba odpařit 58,82 kg binární směsi.

Spotřeba páry při prosté destilaci

Množství tepla potřebné k odpaření $D_1 - D_2$ množství binární směsi získáme z rovnice, která vyjadřuje tepelnou rovnováhu (teplo přivedené se rovná teplu odvedenému).

Pro náš případ platí rovnice:

$$D_1 \,.\, C_{D_1} + r \,.\, D_x = V \,.\, L + D_2 \,.\, C_{D_2} \tag{11}$$

kde D_1 — počáteční váhové množství binární směsi v kg,
C_{D_1} — počáteční tepelný obsah binární směsi v kcal . kg^{-1},
D_x — váhové množství topící páry v kg,
V — váhové množství par v kg,
L — aritmetický průměr tepelných obsahů par v kcal · kg^{-1},
D_2 — váhové množství zbytku po destilaci v kg,
C_{D_2} — tepelný obsah zbytku v kcal . kg^{-1},
r — výparné teplo topné páry v kcal . kg^{-1}.

Do rovnice (1) dosadíme tyto hodnoty: $D_1 = 100$ kg, $D_2 = 41{,}18$ kg, $t_1 = 20$ °C.

$c_{D_1} = 1{,}045 + 0{,}00233 \cdot \frac{20}{2} = 1{,}068$ kcal . kg^{-1}, grad^{-1},

$C_{D_1} = 21{,}36$ kcal . kg^{-1},

$C_{D_2} = 105$ kcal . kg^{-1},

$V = D_1 - D_2 = 58{,}82$ kg $\quad L = 359{,}9$ kcal . kg^{-1}.

Dostáváme $D_x = 43{,}5$ kg, bereme-li $t_2 = 105°$, odpovídající měrný tlak $p = 0{,}232$ atp a výparné teplo $r = 536{,}3$ kcal . kg^{-1}.

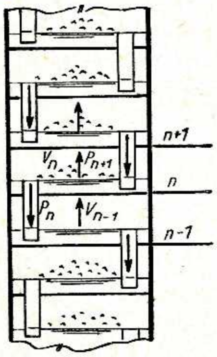
II. Vyvařování alkoholu v kolonách

Odvodíme si další rovnice, které nám budou užitečné při vyvařování alkoholu v koloně. Provedeme-li řez vyvařovací kolonou (viz *obr. 1*), lze podle rovnovážného stavu stanovit závislost, která se týká vyvařování alkoholu.

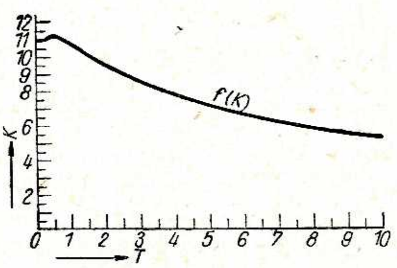
Pro n-té dno kolony platí tato rovnice:

$$P_n\,T_n + V_n\,U_n = P_{n+1}\,T_{n+1} + V_{n-1}U_{n-1} \qquad (12)$$

kde P_n — váhové množství přepadu n-tého dna,
T_n — váhové procento alkoholu přepadu n-tého dna,
V_n — váhové množství par n-tého dna,
U_n — váhové procento alkoholu par n-tého dna



Obr. 1



Obr. 2

Pravá strana rovnice (12) vyjadřuje vztah mezi příslušnými veličinami $n + 1$ a $n - 1$ dna. Poměr

$$\frac{U_n}{T_n} = K_n \qquad (13)$$

n je celé kladné. Koeficient K_n se nazývá výparným koeficientem alkoholu.

Nechť přepad a množství par je konstantní pro všechna dna, t. j. $P_n = p$ a $V_n = v$ pro každé celé kladné n; dosadíme tyto výrazy do rovnice (12) a máme:

$$v\,.\,(U_n - U_{n-1}) = p\,.\,(T_{n+1} - T_n) \qquad (14)$$

Nyní použijeme rovnici (13) na rovnici (14) a dostáváme důležitou rovnici, která platí pro všechna n celá kladná:

$$p\,.\,(T_{n+1} - T_n) = v\,.\,(K_n\,.\,T_n - K_{n-1}\,.\,T_{n-1}) \qquad (15)$$

Hodnota konficientu K_n závisí obecně na T_n. Ke stanovení nejpravděpodobnější fiktivní hodnoty K platné pro další výpočty použijeme střední logaritmický obsah alkoholu ve vyvařovací části kolony (na jednotlivých dnech v intervalu) $\langle T_o, T_n \rangle$, který je dán vztahem

$$\triangle T = \frac{T_n - T_o}{2{,}3 \log \dfrac{T_n}{T_o}}$$

Z tohoto diagramu (*obr. 2*) při daném T stanovíme K.

Obsah alkoholu na n-tém dně, Tn (% váhové), zjistíme podle množství tepla Q, které je třeba dodat předehřáté zápaře, aby nastal var.

$$Q = D\,.\,c\,(t_v - t_p)$$

kde D — váhové množství binární směsi v kg,
c — měrné teplo v kcal . kg^{-1} . grad^{-1},
t_v — bod varu zápary v gradech,
t_p — teplota předehřáté zápary v gradech.

Z daného Q stanovíme pomocí diagramu (*obr. 3*) T_n.

Rovnice (15) po úpravě má tento tvar:

$$T_{n+1} - T_n = \frac{K\,.\,v}{p}\,.\,(T_n - T_{n-1}) \qquad (16)$$

Použitím rovnice (16) dostáváme po snadné úpravě vztah pro rozdíl koncentrace lihu na n-tém dně a nultém dně:

$$T_n - T_o = \frac{q^n - 1}{q - 1}\,.\,(T_1 - T_o) \qquad (17)$$

kde $q = \dfrac{K\,.\,v}{p}$.

Z rovnice (17) můžeme snadno určit počet vyvařovacích den, který je dán takto:

$$n = \frac{\log\left\{1 + (q-1)\,\dfrac{T_n - T_o}{T_1 - T_o}\right\}}{\log q} \qquad (18)$$

V praxi je třeba počítat s 80 % vyvařovací účinností den

$$\eta = \frac{n_{th.}}{n_{sk.}} \qquad (19)$$

kde η je účinnost, n teoretické je počet den vypočítaných podle rovnice (18) a n skutečné je počet den skutečných.

Příklad: Mějme záparu obsahující 8,05 % váhových alkoholu a máme stanovit počet vyvařovacích den, chceme-li vyvařit alkohol na 0,01 % váhového alkoholu.

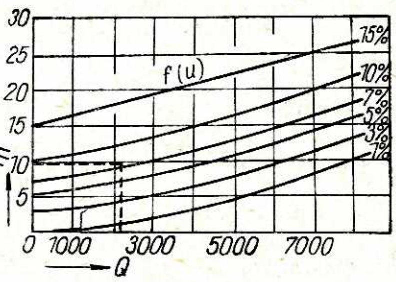
Použijeme rovnice (18) a po příslušném dosazení máme n teoretické = 12 vyvařovacích den a n skutečné = 15 vyvařovacích den.

Spotřeba páry pro vyvařování alkoholu v kolonách

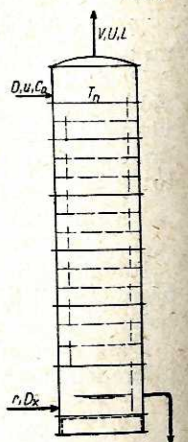
Množství tepla potřebného k vyvařování alkoholu v kolonách vypočítáme takto:

Uvažujeme-li vyvařování alkoholu beze ztrát platí rovnice:

$$D\,.\,u = U\,.\,V \qquad (20)$$



Obr. 3



Obr. 4

kde D — váhového množství směsi v kg,
u — množství alkoholu v procentech ve směsi,
U — množství alkoholu v procentech v parách,
V — váhového množství par v kg.

Podle tepelné rovnováhy vyvařovací kolony (viz *obr. 4*)

$$D\,.\,C_D + r\,.\,D_x = V\,.\,L + (D - V)\,.\,C_{D-V} \qquad (21)$$

kde D — váhové množství směsi v kg,
C_D — tepelný obsah směsi v kcal. kg^{-1},
D_x — váhové množství topné páry v kg,
V — váhové množství par v kg,
r — výparné teplo topící páry v kcal. kg^{-1},
L — tepelný obsah par v kcal kg^{-1},
$D—V$ — váhové množství zbytku v kg,
$C_{D—V}$ — tepelný obsah zbytku v kcal. kg^{-1}.

Jednoduchou úpravou rovnice (21) získáme potřebné množství tepla pro vyvařování alkoholu

$$r \cdot D_x = (\varkappa + C_{D—V}) \cdot (D—V) \qquad (22)$$

kde

$$\varkappa = \frac{VL—D \cdot C_D}{D—V} \qquad (23)$$

Dosadíme-li do rovnice (23) za V z rovnice (20) dostáváme rovnici (23) v tomto tvaru:

$$\varkappa = \frac{uL—U \cdot C_D}{U—u} \qquad (24)$$

Pro náš případ je $\varkappa = O$, takže množství páry podle rovnice (22) je toto:

$r \cdot D_x = 8841$ kcal, čili $D_z = 16{,}5$ kg na 100 kg zápary, bereme-li $t_2 = 105°$, $p = 0{,}232$ atp, $r = 536{,}3$ kcal . kg^{-1} $C_{D—V} = 105$ kcal . kg^{-1}.

Poznámka

Nutné množství páry pro vyvařování alkoholu snižuje kombinační předávání tepla v přístrojích. Toto množství páry lze dále snížit thermokompresorem.

Praktickým vyřešením tohoto problému získali bychom asi 25 % úsporu nutného množství páry.

Poznámka

[1] *Ernest Sorel:* La Distilaton, Paris, 1910.

[2] *V. I. Popov, L. L. Dobroserdov, V. I. Stabnikov, K. P. Andrejev:* Technologičeskoje oborudovanije brodilnych proizvodstv, Moskva, 1953.

[3] *E. N. Bartěněv:* Osnovy proektizovanija spirtovych zavodov, Moskva, 1952.