

19 Destilace

Prokop Nekovář, Vladimír Míka

Při destilaci se kapalná směs rozděljuje na parní fázi, bohatší na těkavější složky, a na kapalnou fázi, bohatší na složky méně těkavé. S výjimkou odstavce 19.5 se omezíme na směs dvou složek, A a B, přičemž symbolem A budeme označovat složku těkavější. Budeme předpokládat, že destilace není provázena chemickou reakcí. Všechny vztahy uvedené v této kapitole jsou zapsány pro látkové množství a koncentrace složek jsou vyjádřeny molárními zlomky, použity jsou též molární entalpie. Formálně stejné vztahy platí pro hmotnostní vyjádření [s výjimkou vztahu (19-4) a rovnic z něj odvozených].

A Výpočtové vztahy

19.1 Rovnovážné údaje

Označíme symbolem x_i molární zlomek složky i v kapalně fázi a y_i molární zlomek složky i v parní fázi. Rovnovážný vztah mezi nimi se vyjadřuje rovnovážným poměrem ψ_i

$$y_i = \psi_i x_i \quad [i = A, B] \quad (19-1)$$

Tento vztah se v izobarickém rozdělovacím diagramu těkavější složky se souřadnicemi x_A a y_A vyjadřuje graficky jako rovnovážná čára. Relativní těkavost složky A vzhledem ke složce B je

$$\alpha_{AB} = \psi_A / \psi_B = y_A x_B / (y_B x_A) \quad (19-2)$$

a platí

$$y_A = \frac{\alpha_{AB} x_A}{1 + (\alpha_{AB} - 1) x_A} \quad (19-3)$$

Pro hmotnostní vyjádření [$\alpha_{AB} = (y_A / y_B)(x_B / x_A)$] je číselná hodnota relativní těkavosti stejná. Chová-li se pára jako ideální plyn a kapalina jako ideální směs, platí při tlacích nepřilíš vzdálených od atmosférického tlaku obvykle Raoultův zákon, podle kterého je

$$\psi_i = p_i^\circ / p \quad [i = A, B] \quad (19-4)$$

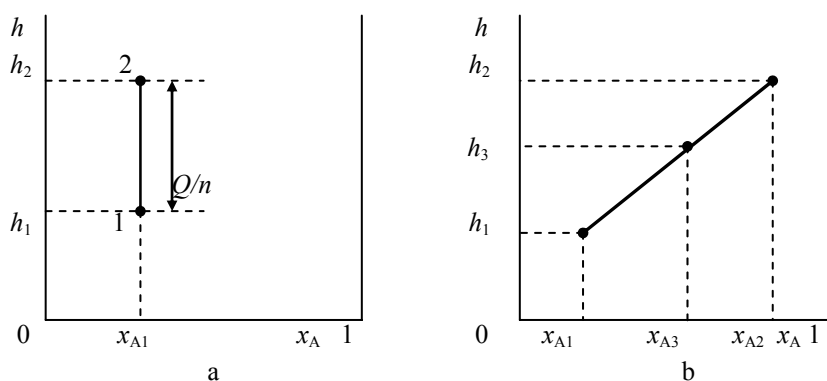
kde p_i^0 je tlak rovnovážné páry nad čistou kapalnou složkou i při dané teplotě. Pro reálný plyn a neideální směs obsahuje vzorec pro rovnovážný součinitel fugacitu a aktivitní koeficient {viz rovnici (1.2-13) v lit. [M1]}. Při tlacích do 0,15 MPa a neideálních kapalných směsích se často vystačí se vztahem

$$\psi_i = \gamma_i p_i^0 / p \quad (19-5)$$

Rovnovážné koncentrace složky v kapalině a páře např. při konstantním tlaku se pro danou směs dvou složek udávají v tabulkách hodnot (x_A, y_A, t) získaných měřením. Pro numerické řešení je výhodné vyjádření experimentálních dat rovnicí. Může to být pomocí rovnice závislosti rovnovážného tlaku na teplotě a aktivitního koeficientu na koncentraci složky nebo regresní vztah mezi tabelovanými koncentracemi. Při neideálním chování páry je třeba zvolit vhodnou stavovou rovnici, z níž lze spočítat fugacitní koeficient.

19.2 Entalpický diagram

Pro orientační grafické výpočty v destilaci se používá izobarického entalpického diagramu, ve kterém je zakreslena závislost molární entalpie na molárním zlomku těkavější složky v kapalině a páře.



Obr. 19-1. Základní úlohy na entalpickém diagramu

- a)-stanovení spotřeby energie ke změně entalpie směsi při konstantním složení;
- b)-nákové pravidlo pro adiabatické smíšení nebo dělení

Vlastnosti entalpického diagramu:

a) Spotřeba energie při změně entalpie 1 mol směsi konstantního složení je dána svislou úsečkou spojující oba stavy. Na obr. 19-1a je to úsečka mezi body 1 a 2 a potřebné množství energie pak je

$$Q / n = h_2 - h_1 = 2T \quad (19-6)$$

kde značí symbol Q spotřebu energie (teplo), n - látkové množství směsi a h - molární entalpii směsi.

b) Pro adiabatické směřování nebo dělení směsi platí pákové pravidlo. Z bilancí

$$n_1 + n_2 = n_3 \quad (19-7)$$

$$n_1 x_{A1} + n_2 x_{A2} = n_3 x_{A3} \quad (19-8)$$

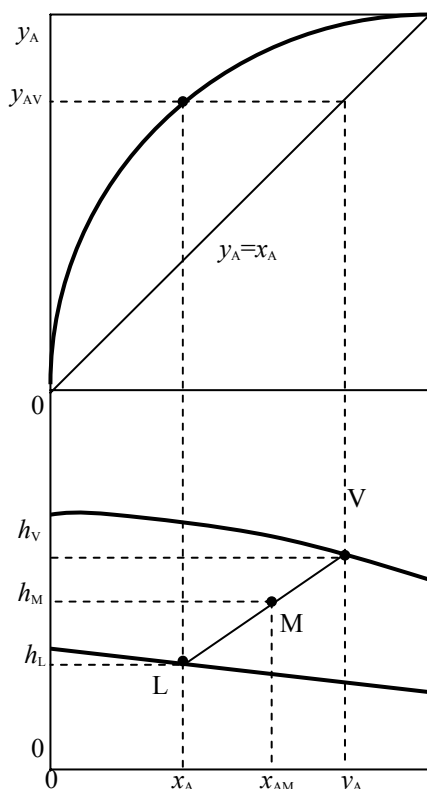
$$n_1 h_1 + n_2 h_2 = n_3 h_3 \quad (19-9)$$

se získá

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{x_{A2} - x_{A3}}{x_{A3} - x_{A1}} = \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1} = \frac{23}{31} \quad (19-10)$$

Bod 3 na obr. 19-1b představuje složení a molární entalpii směsi vzniklé ze směsí 1 a 2. Leží na úsečce spojující body 1 a 2, které představují složení a molární entalpii obou původních směsí, a dělí vzdálenost mezi těmito body v obráceném poměru látkových množství těchto původních směsí. Obdobně

$$\frac{n_1}{n_3} = \frac{x_{A2} - x_{A3}}{x_{A2} - x_{A1}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} = \frac{23}{21} \quad (19-11)$$



Obr. 19-2. Rozdělovací a entalpický diagram pro rovnovážný systém kapalina-pára (s malými odchylkami od ideálního chování)

K proložení libovolné spojovací přímky kreslíme interpolační křivku takovou, aby oběma krajním bodům konody byl jednoznačně přiřazen jeden bod na interpolační křivce, a naopak. Jednou z forem interpolační křivky je rovnovážná křivka v diagramu $y_A(x_A)$. Konstrukce je zřejmá z obr. 19-2.

d) Jsou-li složení a molární entalpie směsi dány bodem ležícím uvnitř dvoufázové oblasti (obr. 19-2), rozdělí se při rovnováze na dvě rovnovážné fáze. Body L a V, které znázorňují jejich složení a molární entalpii, leží na křivkách varu a kondenzace, a na konodě procházející bodem M. Mezi úsečkami vymezenými body L, M, V platí pákové pravidlo.

19.3 Výpočet jednostupňové destilace binární směsi

19.3.1 Rovnovážná destilace

Surovina (F) se přivádí do výměníku tepla 1 (obr. 19-3), kde se pod tlakem zahřívá a dále vede do destilačního zařízení 2 s nižším tlakem, kde se rozdělí na parní fázi (V) a kapalnou fázi (L). Předpokládá se, že vzniklé fáze jsou v rovnováze. Parní fáze dále kondenzuje v kondenzátoru 3 na destilát (D). Proces je ustálený.

Bilance látkového množství směsi a těkavější složky má tvar

$$\dot{n}_F = \dot{n}_V + \dot{n}_L \quad (19-12)$$

$$\dot{n}_F x_{AF} = \dot{n}_V y_A + \dot{n}_L x_A \quad (19-13)$$

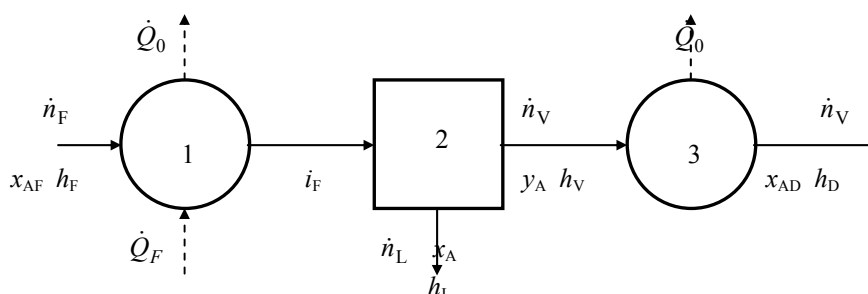
Pro totální kondenzátor platí $\dot{n}_D = \dot{n}_V$ a $x_{AD} = y_A$.

Bilance entalpie je pro celé zařízení

$$\dot{n}_F h_F + \dot{Q}_F = \dot{Q}_D + \dot{n}_D h_D + \dot{n}_L h_L + \dot{Q}_0 \quad (19-14)$$

K řešení na entalpickém diagramu je možné ji rozepsat na část pro výměník tepla (1)

$$\dot{n}_F h_F + \dot{Q}_F = \dot{n}_F i_F + \dot{Q}_0 \quad (19-15)$$



Obr. 19-3. Schéma pro bilanci rovnovážné destilace

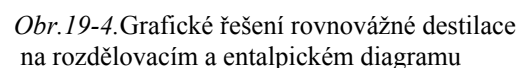
pro destilační zařízení (2)

$$\dot{n}_F i_F = \dot{n}_V h_V + \dot{n}_L h_L \quad (19-15a)$$

a pro kondenzátor (3)

$$\dot{n}_V h_V = \dot{Q}_D + \dot{n}_D h_D \quad (19-16)$$

Grafické řešení rovnovážné destilace na ental-



Vztah mezi množstvím a složením fází lze zjistit rovněž pomocí rozdělovacího diagramu platného pro tlak při destilaci (obr. 19-4). Z rovnic (19-12) a (19-13) získáme směrnici pracovní přímky v tomto diagramu

procházející body (x_A, y_A) a (x_{AF}, x_{AF}) . Bod (x_A, y_A) je průsečíkem pracovní přímky s rovnovážnou křivkou (19-1) a vyjadřuje složení produktů. Tato přímka protíná osu úseček v bodu $x_A = x_{AF} \dot{n}_F / \dot{n}_L$ a osu pořadnic v bodu $y_A = x_{AF} \dot{n}_F / \dot{n}_V$, čehož se využívá při konstrukci pracovní přímky.

19-5

Konvergence se urychlí, zavede-li se do výpočtu relativní těkavost α_{AB} , která závisí na teplotě mnohem méně než rovnovážný poměr. Z rovnic (19-3), (19-12) a (19-13) se získá kvadratická rovnice pro molární zlomek těkavější složky ve zbytku

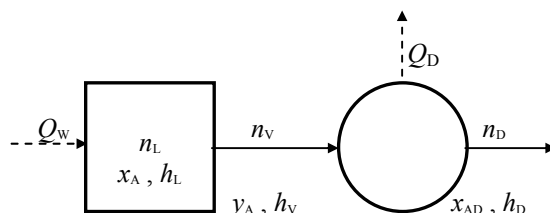
$$(\alpha_{AB} - 1)x_A^2 + \left[1 - (\alpha_{AB} - 1)x_{AF} \left(1 + \frac{\dot{n}_V}{\dot{n}_L} \right) + \frac{\alpha_{AB}\dot{n}_V}{\dot{n}_L} \right] x_A - \left(1 + \frac{\dot{n}_V}{\dot{n}_L} \right) x_{AF} = 0 \quad (19-18)$$

19.3.2 Diferenciální destilace

Schéma procesu je uvedeno na obr. 19-5. Surovina (F) se vpraví do vařáku, zahřívá se a vzniklé páry (V) se kontinuálně odvádějí a zpravidla kondenzují v kondenzátoru na destilát (D). Proces je vsádkový. Po jeho skončení je ve vařáku kapalný zbytek (W). Při výpočtu se předpokládá, že v každém okamžiku jsou odcházející páry v rovnováze s kapalinou (L) ve vařáku. Budeme předpokládat, že na začátku destilace je množství vznikajících par nulové, že ztráty energie do okolí nedokonalou izolací jsou zanedbatelné a že kondenzátor zkapalní veškerou páru.

Z bilancí látkového množství plynou vztahy pro výpočet množství vzniklých par

$$n_V = n_F - n_W \quad (19-19)$$



Obr. 19-5. Schéma pro bilanci diferenciální destilace

a střední hodnoty koncentrace těkavější složky ve vzniklé páře

$$n_V \bar{y}_A = n_F x_{AF} - n_W x_{AW} \quad (19-20)$$

kde

$$\bar{y}_A = \frac{1}{n_V} \int_0^{n_V} y_A dn_V \quad (19-21)$$

a vztah mezi množstvím a složením kapaliny ve vařáku:

$$\ln \frac{n_F}{n_W} = \int_{x_{AW}}^{x_{AF}} \frac{dx_A}{y_A - x_A} \quad (19-22)$$

K integraci pravé části rovnice (19-22) je třeba znát rovnovážnou závislost y_A na x_A podle rovnice (19-1). Je-li udána rovnicí či pro konstantní hodnotu rovnovážného poměru lze integrál řešit analyticky. Pomocí tabulky rovnovážných koncentrací se řeší integrál numericky nebo graficky. Pro konstantní hodnotu ψ_A platí

$$\ln \frac{n_F}{n_W} = \frac{1}{\psi_A - 1} \ln \frac{x_{AF}}{x_{AW}} \quad (19-23)$$

Protože hodnota rovnovážného poměru silně závisí na teplotě, je praktičtější řešení integrálu pro konstantní hodnotu relativní těkavosti

$$\ln \frac{n_F}{n_W} = \frac{1}{\alpha_{AB} - 1} \ln \frac{x_{AF}(1 - x_{AW})}{x_{AW}(1 - x_{AF})} + \ln \frac{1 - x_{AW}}{1 - x_{AF}} \quad (19-24)$$

Pro totální kondenzátor platí $n_V = n_D$ a $\bar{y}_A = \bar{x}_{AD}$.

Z bilance entalpie se počítá spotřeba energie ve vařáku

$$Q_W = h_W n_W - h_F n_F + \bar{h}_V n_V \quad (19-25)$$

kde

$$\bar{h}_V = \frac{1}{n_V} \int_0^{n_V} h_V dn_V \quad (19-26)$$

a energie odvedená z kondenzátoru

$$Q_D = n_D (\bar{h}_V - \bar{h}_D) = n_D (\bar{h}_V - \bar{h}_D) \quad (19-27)$$

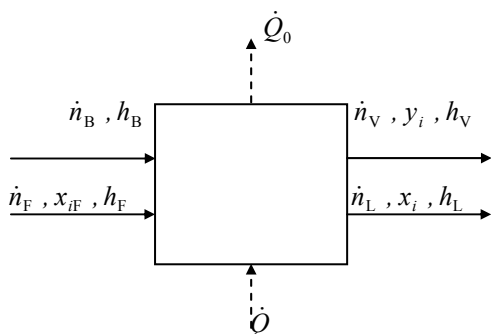
kde

$$\bar{h}_D = \frac{1}{n_D} \int_0^{n_D} h_D dn_D \quad (19-28)$$

19.3.3 Kontinuální přehánění vodní párou

Jak je patrné z obr. 19-6, surovina (F) a vodní pára (B) se nepřetržitě přivádějí do aparátu, který může být vyhříván. Odcházejí páry (V), které se obvykle zkapalňují v kondenzátoru, a kapalný zbytek (L). Surovina musí být omezeně mísitelná či nemísitelná s vodou, aby se dala vodná fáze oddělit. Omezíme se na případ, kdy surovina obsahuje složku A, která přechází do parní fáze, a netěkavou složku C, která zůstává v kapalně fázi. Přivádí se

čistá vodní pára, která částečně kondenzuje a odvádí se v parní i kapalně fázi. Proces probíhá v ustáleném stavu.



Obr. 19-6. Schéma pro bilanci přehánění vodní párou

Bilance látkového množství směsi, složky A (přeháněná složka) a složky B (voda) jsou

$$\dot{n}_B + \dot{n}_F = \dot{n}_V + \dot{n}_L \quad (19-29)$$

$$\dot{n}_F x_{AF} = \dot{n}_V y_A + \dot{n}_L x_A \quad (19-30)$$

$$\dot{n}_B = \dot{n}_V y_B + \dot{n}_L x_B \quad (19-31)$$

Entalpická bilance má tvar

$$\dot{n}_B h_B + \dot{n}_F h_F + \dot{Q} = \dot{n}_V h_V + \dot{n}_L h_L + \dot{Q}_0 \quad (19-32)$$

Za předpokladu, že složky A a B jsou v kapalném skupenství nemísitelné, platí při fázové rovnováze

$$y_i = p_i^0 / p \quad [i = A, B] \quad (19-33)$$

($p_C^0 = 0$). Teplota varu se zjistí z teplotní závislosti napětí par čistých složek z podmínky

$$p = p_A^0 + p_B^0 \quad (19-34)$$

Nekondenzuje-li pára uvnitř aparátu ($x_B = 0$) a jsou-li výstupní proudy rovnovážné, pak podle rovnic (19-29) až (19-31), (19-33) a (19-34) je spotřeba páry

$$\dot{n}_B = \frac{1 - y_A^*}{y_A^*} \frac{x_{AF} - x_A}{1 - x_A} \dot{n}_F = \frac{p - p_A^0}{p_A^0} \frac{x_{AF} - x_A}{1 - x_A} \dot{n}_F \quad (19-35)$$

Pro účinnost stupně

$$E_y = y_A / y_A^* \quad (19-36)$$

je spotřeba páry

$$\dot{n}_B = \frac{p - E_y p_A^o}{E_y p_A^o} \frac{x_{AF} - x_A}{1 - x_A} \dot{n}_F \quad (19-37)$$

Když pára kondenzuje, udává rovnice (19-37) pouze nezkapalněný podíl z celkové spotřeby páry, který označíme $\dot{n}_{BV}$. Zkapalněný tok látkového množství páry označíme $\dot{n}_{BL}$ a platí vztah

$$\dot{n}_B = \dot{n}_{BV} + \dot{n}_{BL} \quad (19-38)$$

Hodnotu $\dot{n}_{BL}$ stanovíme z entalpické bilance (19-32), kterou rozepíšeme pomocí molárních entalpií složek (viz kap. 10). Protože je složka C netěkavá, je $\dot{n}_{CF} = \dot{n}_{CL}$ a při úplném odpaření složky A plyne pro $\dot{n}_{BL}$ vztah

$$\dot{n}_{BL} = [\dot{n}_{BV}(h_{BV} - h_B) + \dot{n}_F(h_{AV} - h_{AF})x_{AF} + \dot{n}_F(h_{CL} - h_{CF})(1 - x_{AF}) - \dot{Q} + \dot{Q}_o] / (h_B - h_{BL}) \quad (19-39)$$

Zde jsme zanedbali směšovací entalpie v obou fázích.

Často není nutné do bilancí zahrnovat netěkavé příměsi. Surovinu pak považujeme za složku A a při úplném odpaření složky A je v kapalině pouze složka B. Pak $\dot{n}_L = \dot{n}_{BL} x_{AF} = 1$, $x_B = 1$, a spotřeba páry je

$$\dot{n}_B = \dot{n}_F \frac{p - E_y p_A^o}{E_y p_A^o} + \dot{n}_L = \dot{n}_{BV} + \dot{n}_L \quad (19-40)$$

přičemž

$$\dot{n}_L = \frac{\dot{n}_{BV}(h_{BV} - h_B) + \dot{n}_F(h_{AV} - h_{AV}) - \dot{Q} + \dot{Q}_o}{h_B - h_{BL}} \quad (19-41)$$

19.4 Rektifikace binární směsi

Rektifikací rozumíme destilační proces při protiproudu kapalné a parní fáze ve stupňovém nebo ve spojitém kontaktu fází.

19.4.1 Stupňová kontinuální rektifikace

V obvyklém uspořádání (obr. 19-7) je surovina neboli nástřík (F) přiváděna do nástříkového stupně f . Stupně nad nástříkovým stupněm $[1 \text{ až } (f - 1)]$ tvoří obohacovací část a stupně pod nástříkovým stupněm $[(f + 1) \text{ až } N]$ ochuzovací část zařízení (ve vztahu k těkavější

složce). Obohacovací část je ukončena kondenzátorem (O), ve kterém zkapalňuje pára přicházející z 1. stupně. Budeme předpokládat, že kondenzátor je totální. Z děliče zpětného toku se část kondenzátu odvádí jako destilát (D) a část se vrací jako zpětný tok (L_0) do 1. stupně. Poměr zpětného toku je

$$R = \dot{n}_{L0} / \dot{n}_D \quad (19-42)$$

Ochuzovací část je ukončena vařákem ($N + 1$). Budeme předpokládat, že vařák a stupně kolony jsou rovnovážné, a že proces probíhá při ustáleném stavu.

Bilanční rovnice pro zařízení a jeho jednotlivé části jsou uvedeny v tab. 19-1. V entalpických bilancích se nepřihlíží ke ztrátám energie do okolí vlivem nedokonalé tepelné izolace zařízení. Pro totální kondenzátor platí

$$\begin{aligned} y_{A1} &= x_{A0} = x_{AD} \quad ; \quad h_{L0} = h_D \quad ; \quad \dot{n}_{V1} = \dot{n}_D (R + 1) \\ \dot{Q}_D &= \dot{n}_D (h_{V1} - h_D)(R + 1) \end{aligned} \quad (19-55)$$

Tabulka 19-1. Bilance stupňové rektifikační věže a jejích částí

stupně	bilance	bilanční rovnice	číslo rovnice
0 až k [$0 \leq k < f$]	směsi složky A entalpie	$\dot{n}_{V(k+1)} - \dot{n}_{Lk} = \dot{n}_D$ $\dot{n}_{V(k+1)} y_{A(k+1)} - \dot{n}_{Lk} x_{Ak} = \dot{n}_D x_{AD}$ $\dot{n}_{V(k+1)} h_{V(k+1)} - \dot{n}_{Lk} h_{Vk} = \dot{n}_D h_D + \dot{Q}_D$	(19-43) (19-44) (19-45)
f	směsi složky A entalpie	$\dot{n}_{V(f+1)} - \dot{n}_{Lf} + \dot{n}_F = \dot{n}_{Vf} - \dot{n}_{L(f-1)}$ $\dot{n}_{V(f+1)} y_{A(f+1)} - \dot{n}_{Lf} x_{Af} + \dot{n}_F z_{AF} = \dot{n}_{Vf} y_{Af} - \dot{n}_{L(f-1)} x_{A(f-1)}$ $\dot{n}_{V(f+1)} h_{V(f+1)} - \dot{n}_{Lf} h_{Vf} + \dot{n}_F h_F = \dot{n}_{Vf} h_{Vf} - \dot{n}_{L(f-1)} h_{L(f-1)}$	(19-46) (19-47) (19-48)
$l+1$ až $N+1$ [$f \leq l < N$]	směsi složky A entalpie	$\dot{n}_{V(l+1)} - \dot{n}_{Ll} = -\dot{n}_W$ $\dot{n}_{V(l+1)} y_{A(l+1)} - \dot{n}_{Ll} x_{Al} = -\dot{n}_W x_{AW}$ $\dot{n}_{V(l+1)} h_{V(l+1)} - \dot{n}_{Ll} h_{Vl} = \dot{Q}_W - \dot{n}_W h_W$	(19-49) (19-50) (19-51)
0 až $N+1$	směsi složky A entalpie	$\dot{n}_F = \dot{n}_D + \dot{n}_W$ $\dot{n}_F z_{AF} = \dot{n}_D x_{AD} + \dot{n}_W x_{AW}$ $\dot{n}_F h_F = \dot{Q}_D + \dot{n}_D h_D - \dot{Q}_W + \dot{n}_W h_W$	(19-52) (19-53) (19-54)

Pokud je integrální molární výparná entalpie směsi ve všech stupních stejná, tj. pokud jsou čáry nasycených fází v entalpickém diagramu rovnoběžné přímky, jsou toky látkového množství fází v obohacovací a ochuzovací části konstantní. To je přibližně splněno pro chemicky podobné složky (neplatí však pro měrné výparné entalpie, které se i pro podobné složky významně liší). Vztahy mezi toky látkového množství fází nad a pod nástřikem jsou

$$\dot{n}_{Ll} - \dot{n}_{Lk} = \dot{n}_F q \quad [0 \leq k \leq f, f \leq l \leq N] \quad (19-56)$$

$$\dot{n}_{V(l+1)} - \dot{n}_{V(k+1)} = \dot{n}_F (q - 1) \quad [0 \leq k \leq f, f \leq l \leq N] \quad (19-57)$$

přičemž q můžeme vypočítat z rovnice

$$q = (h_{VF} - h_F) / (h_{VF} - h_{LF}) \quad (19-58)$$

kde h_F je molární entalpie nástřiku, h_{LF} - molární entalpie vroucí kapaliny o složení nástřiku, h_{VF} - molární entalpie nasycené páry o složení nástřiku. Je-li nástřik směs rovnovážné kapaliny a páry, počítá se q ze vzorce

$$q = \dot{n}_{LF} / \dot{n}_F \quad (19-58a)$$

kde $\dot{n}_{LF}$ je tok látkového množství kapalné části nástřiku.

Grafické řešení na rozdělovacím diagramu:

Za předpokladu konstantních toků látkového množství jsou pracovní čáry přímkami. Rovnice pracovní přímky obohacovací oblasti má podle rovnic (19-42) a (19-44) tvar

$$y_{A(k+1)} = \frac{R}{R+1} x_{Ak} + \frac{x_{AD}}{R+1} \quad [0 \leq k < f] \quad (19-59)$$

a rovnice pracovní přímky ochuzovací oblasti má podle rovnic (19-42), (19-49), (19-50), (19-56) a (19-57) tvar

$$y_{A(l+1)} = \frac{R + (q\dot{n}_F / \dot{n}_D)}{R + 1 + (q-1)\dot{n}_F / \dot{n}_D} x_{Al} - \frac{(\dot{n}_F / \dot{n}_D) - 1}{R + 1 + (q-1)\dot{n}_F / \dot{n}_D} \quad [f \leq l \leq N] \quad (19-60)$$

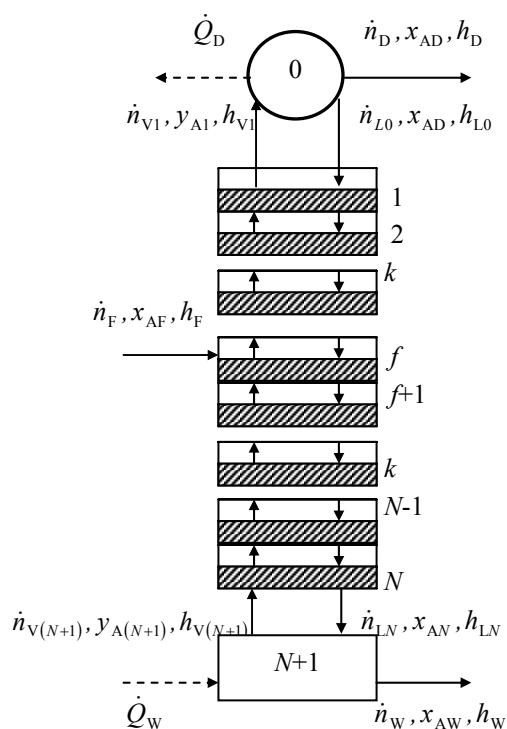
Průsečíkem pracovních přímek prochází tzv. přímka q , jejíž rovnice je

$$y_A = \frac{q}{q-1} x_A - \frac{z_{AF}}{q-1} \quad (19-61)$$

Pracovní přímka obohacovací části protíná úhlopříčku $y_A = x_A$ v bodě (x_{AD}, x_{AD}) , pracovní přímka ochuzovací části v bodě (x_{AW}, x_{AW}) , přímka q v bodě (z_{AF}, z_{AF}) .

Koncentrace složky v jednotlivých proudech se získají na rozdělovacím diagramu krokovou konstrukcí zakreslenou na obr. 19-8. Optimální je takové umístění nástřiku, kdy přechod z jedné pracovní čáry na druhou je u průsečíku pracovních čar. Při minimální hodnotě zpětného toku se některá pracovní čára dotýká rovnovážné křivky nebo se obě pracovní čáry protínají v bodě ležícím na rovnovážné křivce. Jsou-li pracovní čáry přímkami,

vypočte se minimální poměr zpětného toku z minimální hodnoty směrnice nebo z maximálního úseku na ose pořadnic, který vytíná pracovní přímka obohacovací části popsaná rovnicí (19-59). Při totálním zpětném toku splynou obě pracovní čáry s úhlopříčkou $y_A = x_A$.

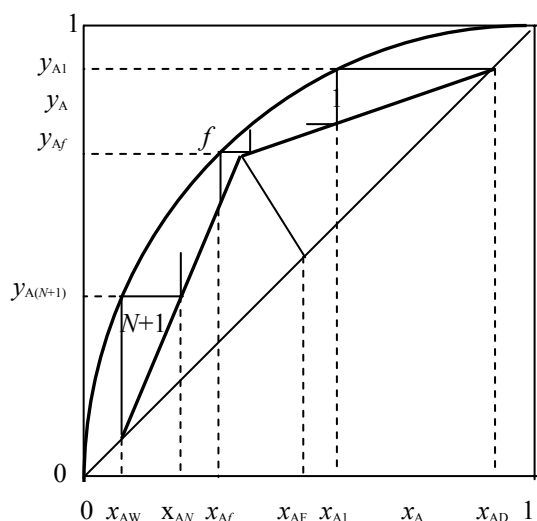


Obr. 19-7. Schéma pro bilanci kontinuální stupňové rektifikace

Numerické řešení:

Při numerickém výpočtu od stupně ke stupni se podobně jako při grafickém řešení střídavě používá rovnovážný vztah a bilance těkavější složky. Protože však rovnovážný poměr ψ_A silně závisí na teplotě, je třeba současně řešit bilanci entalpie a výpočet je iterační. Přibližný výpočet umožňuje předpoklad konstantní relativní těkavosti v rektifikační koloně. Kombinací rovnice rovnováhy vyjádřené relativní těkavostí (19-3) a bilance těkavější složky v obohacovací části (19-59) dostáváme při konstantní relativní těkavosti $[k \leq f]$

$$x_{A(k+1)} = \left[\alpha_{AB} \left(\frac{R+1}{R x_{Ak} + x_{AD}} - 1 \right) + 1 \right]^{-1} \quad (19-59a)$$



Obr. 19-8. Grafické řešení kontinuální stupňové rektifikace na rozdělovacím diagramu při konstantních tocích fází

Podobně z bilance pro ochuzovací část (19-60) dostáváme $[k \geq f]$

$$x_{A(k+1)} = \left[\alpha_{AB} \left(\frac{R+1+(q-1)(\dot{n}_F/\dot{n}_D)}{[R+(q\dot{n}_F/\dot{n}_D)]x_{Ak} - [(\dot{n}_F/\dot{n}_D)-1]x_{AW}} - 1 \right) + 1 \right]^{-1} \quad (19-60a)$$

Přechod mezi rovnicemi udává průsečík obou pracovních přímek na přímce q . Jeho souřadnice jsou

$$x_A^+ = [(q-1)x_{AD} + (R+1)z_{AF}] / (q+R) \quad (19-61a)$$

$$y_A^+ = (q x_{AD} + R z_{AF}) / (q+R) \quad (19-61b)$$

Do vzorců se dosazuje střední hodnota relativní těkavosti pro celý aparát, např. vypočtená z hodnot pro podmínky nástřikového patra a horního a dolního konce rektifikační věže

$$\alpha_{AB} = (\alpha_{ABF} \alpha_{ABD} \alpha_{ABW})^{1/3}$$

K výpočtu potřebujeme hodnoty x_{AF} , x_{AD} , x_{AW} , $\dot{n}_F$, $\dot{n}_D$, $\dot{n}_W$, R , q a údaje pro výpočet relativní těkavosti. Potřebný počet rovnovážných pater určíme postupným uplatňováním rovnic v rozmezí koncentrací od x_{AW} do x_{AD} .

Při totálním zpětném toku je počet pater minimální a pro konstantní relativní těkavost platí vztah

$$\alpha_{AB}^{(N_{\min}+1)} = \frac{x_{AW}^{-1} - 1}{x_{AD}^{-1} - 1} \quad (19-62)$$

Počet skutečných stupňů N_s lze určit pomocí celkové účinnosti E_c

$$E_c = N / N_s \quad (19-63)$$

Pro odhad celkové účinnosti kloboučkových pater pro směsi uhlovodíků lze užít vztahu { viz [M1], rovn. (11.2-5)}

$$E_c = -0,35 - 0,128 \ln(\alpha_{AB} \eta_F) \quad (19-64)$$

kde η_F je viskozita kapalného nástřiku při střední teplotě v koloně.

Změny koncentrací složky ve skutečném stupni lze určit z Murphreeovy účinnosti:

$$E_{xk} = (x_{A(k-1)} - x_{Ak}) / [x_{A(k-1)} - (y_{Ak} / \psi_{Ak})] \quad (19-65a)$$

$$E_{yk} = (y_{A(k+1)} - y_{Ak}) / (y_{A(k+1)} - \psi_{Ak} x_{Ak}) \quad (19-65b)$$

19.4.2 Stupňová periodická rektifikace

Surovina se přivede na začátku procesu do vařáku, rektifikační věž pracuje pouze jako obohacovací, destilát se kontinuálně odvádí. Při výpočtech nepřihlížíme k zadrži na jednotlivých patrech a v kondenzátoru. Dále budeme předpokládat totální kondenzátor, rovnovážný vařák a patra pracující jako rovnovážné stupně. Na počátku je látkové množství destilátu $n_D = 0$. Látkové množství zbytku na konci procesu označíme symbolem n_{Wk} .

Z bilance látkového množství plynou vztahy pro výpočet množství vzniklého destilátu

$$n_D = n_W - n_{Wk} \quad (19-66)$$

a střední koncentraci těkavější složky v destilátu

$$n_D \bar{x}_{AD} = n_F x_{AF} - n_{Wk} x_{AWk} \quad (19-67)$$

kde

$$\bar{x}_{AD} = \frac{1}{n_D} \int_0^{n_D} x_{AD} dn_D \quad (19-68)$$

a vztah mezi množstvím a složením kapaliny ve vařáku

$$\ln \frac{n_F}{n_{Wk}} = \int_{x_{AWk}}^{x_{AF}} \frac{dx_{AW}}{x_{AD} - x_{AW}} \quad (19-69)$$

K integraci pravé části rovnice (19-69) je třeba znát závislost hodnoty x_{AD} na hodnotě x_{AW} . Tu ovlivňují vlastnosti dělené směsi, poměr zpětného toku, počet rovnovážných stupňů a hodnota x_{AW} . V prvním přiblížení se zanedbává přítomnost zadrže v koloně a v kondenzátoru. Výpočet se provádí pro konstantní poměr zpětného toku nebo pro konstantní složení destilátu a integruje se numericky nebo graficky. Za předpokladu konstantních toků látkového množství fází popisuje pracovní přímkou v distribučním diagramu rovnice (19-59).

Za předpokladu, že ztráty energie vlivem nedokonalé tepelné izolace jsou nulové, plyne z bilance entalpie vztah pro spotřebu energie ve vařáku

$$Q_W = Q_D + n_{Wk} h_{Wk} - n_F h_F + n_D \bar{h}_D \quad (19-70)$$

kde

$$\bar{h}_D = \frac{1}{n_D} \int_0^{n_D} h_D dn_D \quad (19-71)$$

a odvod energie z kondenzátoru

$$Q_D = \int_0^{n_D} (h_{V1} - h_D)(R + 1) dn_D \quad (19-72)$$

Pro konstantní poměr zpětného toku R je

$$Q_D = n_D(\overline{h_{V1}} - \overline{h_D})(R + 1) \quad (19-73)$$

kde

$$\overline{h_{V1}} - \overline{h_D} = \frac{1}{n_D} \int_0^{n_D} (h_{V1} - h_D) dn_D \quad (19-74)$$

a pro konstantní složení destilátu

$$Q_D = n_F (h_{V1} - h_D)(x_{AD} - x_{AF}) \int_{x_{AWk}}^{x_{AF}} \frac{(R + 1) dx_{AW}}{(x_{AD} - x_{AW})^2} \quad (19-75)$$

19.4.3 Kontinuální rektifikace se spojitým stykem fází

Označme horní konec věže jako průřez 1 a dolní jako průřez 2; místo přívodu suroviny je vymezeno průřezy f_1 na styku s obohacovací částí a f_2 na styku s ochuzovací částí (obr.19-9).

Výšku obohacovací části věže h_1 vypočítáme z rovnice přestupu hmoty

$$h_1 = \int_{x_A^+}^{x_{A1}} h_{x1} \frac{dx_A}{x_A - x_{AW}} = \int_{y_A^+}^{y_{A1}} h_{y1} \frac{dy_A}{y_{AW} - y_A} \quad (19-76)$$

kde výšky převodových jednotek jsou

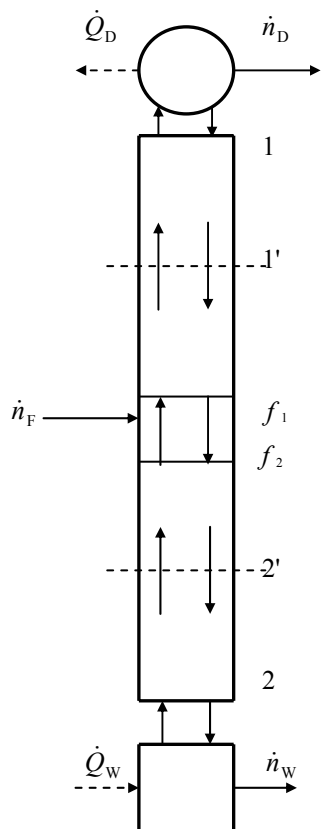
$$h_{x1} = [\dot{n}_L / (k_x aS)]_1 \quad (19-77)$$

$$h_{y1} = [\dot{n}_V / (k_y aS)]_1 \quad (19-78)$$

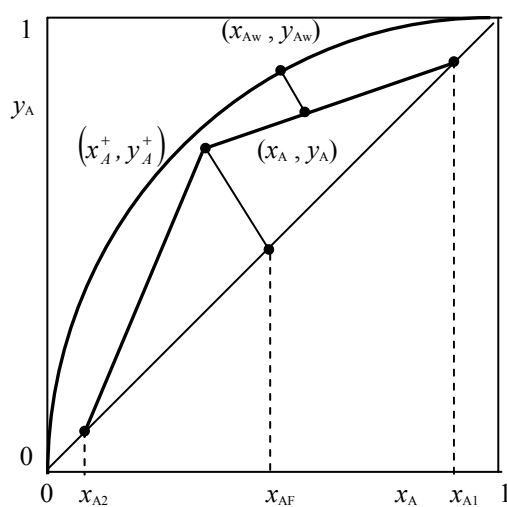
a x_A^+ , y_A^+ jsou souřadnice průsečíku pracovních čar. Hodnoty x_{AW} nebo y_{AW} se zjistí pomocí rovnice

$$\frac{y_{AW} - y_A}{x_{AW} - x_A} = -\frac{k_x}{k_y} = -\frac{n_L}{n_V} \frac{h_y}{h_x} \quad (19-79)$$

Při grafické konstrukci v diagramu $y_A(x_A)$ se z bodu pracovní přímky (x_A, y_A) vede přímka o směrnici $-k_x/k_y = -(\dot{n}_L/\dot{n}_V)(h_y/h_x)$ a její průsečík s rovnovážnou čarou (obr. 19-10) má souřadnice (x_{Aw}, y_{Aw}) .



Obr. 19-9. Schéma k bilanci spojitě rektifikace



Obr. 19-10. Grafická konstrukce k určení koncentrace složky na fázovém rozhraní

Výšku obohacovací části věže lze rovněž odhadnout z rovnice prostupu hmoty

$$h_1 = \langle H_{x1} \rangle \int_{x_A^+}^{x_{A1}} \frac{dx_A}{x_A - x_A^+} = \langle H_{y1} \rangle \int_{y_A^+}^{y_{A1}} \frac{dy_A}{y_A - y_A^+} \quad (19-80)$$

kde střední hodnotu výšky převodové jednotky lze vyjádřit vztahy

$$\langle H_{x1} \rangle = [\dot{n}_L / (\langle K_x \rangle aS)]_1 \quad (19-81)$$

$$\langle H_{y1} \rangle = [\dot{n}_V / (\langle K_y \rangle aS)]_1 \quad (19-82)$$

a do hybné síly jsou dosazovány koncentrace rovnovážné s koncentracemi v daném průřezu

$$y_A^* = \psi_A x_A \quad (19-83)$$

$$x_A^* = y_A / \psi_A \quad (19-84)$$

Obdobné vztahy získáme pro výpočet výšky ochuzovací části věže integrací v mezích (x_{A2}, x_A^+) nebo (y_{A2}, y_A^+) . Integrál v rovn. (19-80) je počet převodových jednotek N_x a N_y .

Pokud se výpočet spojitě rektifikace provádí jako pro stupňový proces, platí mezi počtem rovnovážných stupňů a výškou věže vztah

$$h = h_e N \quad (19-85)$$

kde h_e je výška ekvivalentní rovnovážnému stupni. Odhad této výšky poskytuje např. rovnice Handse a Whitta [H2]

$$h_e = 70 (d_p \eta_L / \phi_L)^{1/2} \quad (19-86)$$

kde d_p je průměr částice výplně, η_L - viskozita kapaliny, ϕ_L - intenzita hmotnostního toku kapaliny.

Plocha průřezu věže se určí z objemového toku parní fáze (ten se podél kolony mění vlivem změny teploty, tlaku a složení i při konstantním toku látkového množství fáze) daným průřezem (obvykle na horním konci kolony) a mimovrstvové rychlosti par:

$$S = \dot{V}_V / v_V = \dot{m}_V / (\rho_V v_V) = M_V \dot{n}_V / (\rho_V v_V) \quad (19-87)$$

Pro návrhové výpočty se doporučuje mimovrstvová rychlost par

$$v_V = 0,7 v_{Vz} \quad (19-88)$$

kde v_{Vz} je mimovrstvová rychlost par při zahlcení [N2]. Pro výpočet rychlosti par při zahlcení byl navržen Kafarov vztah [K1]

$$\begin{aligned} Y &= 0,75 \exp(-4,03 X) \\ X &= (\dot{m}_L / \dot{m}_V)^{1/4} (\rho_V / \rho_L)^{1/8} \\ Y &= [v_{Vz}^2 a / (\varepsilon^3 g)] (\rho_V / \rho_L) (\eta_L / \eta_0)^{0,16} \end{aligned} \quad (19-89)$$

Zde je a hustota mezifázového povrchu a ε mezerovitost výplně, $\eta_0 = 1 \cdot 10^{-3}$ Pa s je referenční viskozita.

Výpočet poklesu tlaku ve vrstvě výplně (tlaková ztráta) se probírá v kap.3.

19.5 Vícesložková destilace

19.5.1 Rovnovážná destilace

Při řešení rovnovážné destilace směsi obecně J složek je zadáno složení původní kapalně směsi x_{jF} [$j = 1, 2, \dots, J$] a dvě ze tří proměnných, kterými jsou teplota, tlak a poměr $\dot{n}_V / \dot{n}_F$. Je třeba určit třetí z nich a složení produkované kapaliny a páry. Úloha se řeší iteračně a musí být známa hodnota rovnovážného poměru každé složky v závislosti na teplotě, tlaku a složení směsi. Vychází se z řešení vazné podmínky

$$\sum_{j=1}^J (\psi_j - 1) \mu_j = 0 \quad (19-90)$$

kde je (symbol μ_j označuje odhad hodnoty x_j)

$$\mu_j = x_{jF} / [1 + (\psi_j - 1)(\dot{n}_V / \dot{n}_F)] \quad (19-91)$$

pro hledanou proměnnou. Složení kapaliny se získá z rovnic

$$x_i = \mu_i / \sum_{j=1}^J \mu_j \quad (19-92)$$

a složení páry z rovnic

$$y_i = \psi_i \mu_i / \sum_{j=1}^J \psi_j \mu_j \quad (19-93)$$

Je-li vazná podmínka splněna, pak $\sum_{j=1}^J \mu_j = 1$ a $\sum_{j=1}^J \psi_j \mu_j = 1$.

Je-li třeba určit teplotu varu směsi o složení suroviny ($\dot{n}_V = 0$, $x_{iF} = x_i$), přejde vazná podmínka (19-90) do tvaru

$$\sum_{j=1}^J \psi_j x_j - 1 = 0 \quad (19-94)$$

a složení rovnovážné páry se získá z rovnic

$$y_i = \psi_i x_i / \sum_{j=1}^J \psi_j x_j \quad (19-95)$$

Při hledání rosného bodu parní směsi o složení suroviny ($\dot{n}_V = \dot{n}_F$, $x_{iF} = y_i$) přejde vazná podmínka (19-90) na tvar

$$\sum_{j=1}^J (y_j / \psi_j) - 1 = 0 \quad (19-96)$$

a složení rovnovážné kapaliny plyne z rovnic

$$x_i = \frac{y_i}{\psi_i} / \sum_{j=1}^J \frac{y_j}{\psi_j} \quad (19-97)$$

Uvedené vztahy platí i pro rovnovážnou destilaci dvousložkových směsí a užívají se při numerickém výpočtu.

19.5.2 Přibližný návrhový výpočet stupňové rektifikace

Odhad minimálního počtu rovnovážných stupňů umožňuje Fenskeho rovnice [F1]

$$\alpha_{ij}^{N_{\min}} = (x_{iD} / x_{jD})(x_{jW} / x_{iW}) \quad (19-98)$$

kde složka i je lehká a složka j těžká klíčová složka (klíčové složky se vyskytují v destilátu i ve zbytku a pomocí nich se charakterizuje dělení směsi) a $N_{\min}$ zahrnuje rovnovážný vařák. Střední hodnota relativní těkavosti se počítá jako geometrický střed

$$\alpha_{ij} = (\alpha_{ijD} \alpha_{ijF} \alpha_{ijW})^{1/3} \quad (19-99)$$

z hodnot odpovídajících teplotě rosného bodu páry odcházející z horního konce rektifikační věže (pokud je kondenzátor parciální, jedná se o páru odcházející z kondenzátoru) t_D , teplotě bodu varu nástříku t_F a bodu varu zbytku t_W .

Odhad minimálního poměru zpětného toku se získá z Underwoodových rovnic [U1]. Určí se kořen rovnice

$$\sum_{i=1}^I \alpha_{ij} z_{iF} / (\alpha_{ij} - \theta) = 1 - q \quad (19-100)$$

v intervalu relativních těkavostí klíčových složek a pak

$$R_{\min} + 1 = \sum_{i=1}^I \alpha_{ij} x_{iD} / (\alpha_{ij} - \theta) \quad (19-101)$$

Optimální hodnota poměru zpětného toku leží v rozmezí $(1,1 \leq R/R_{\min} \leq 1,5)$.

Gillilandův vztah [G1] umožňuje odhadnout počet rovnovážných stupňů. Analyticky jej vyjádřil Molokanov [M2]

$$Y = 1 - \exp\{(1 + 54,4 X)(X - 1) / [(11 + 117,2 X) X^{0,5}]\}$$
$$Y = (N - N_{\min}) / (N + 1) ; X = (R - R_{\min}) / (R + 1) \quad (19-102)$$

Odhad umístění nástřikového stupně f umožňuje Kirkbrideova rovnice [K2]

$$f / (N - f) = [(\dot{n}_W / \dot{n}_D)(z_{iF} / z_{iF})(x_{iW} / x_{iD})^2]^{0,206} \quad (19-103)$$

Odhad dělení směsi v daném rektifikačním zařízení je početně obtížnější a vyžaduje řešení na počítači. Proto se jím tu nebudeme zabývat.

B Úlohy

U19-1: Surovina o složení 68 mol % hexanu a 32 mol. % heptanu se má dělit rovnovážnou destilací při teplotě 60 °C. Určete dělicí tlak, při kterém bude koncentrace hexanu ve zbytku 55 mol. %. Dále určete složení destilátu a množství destilátu a zbytku, které vznikne ze 100 mol nástřiku. Předpokládejte, že směs je ideální.

Výsledek: Dělicí tlak je $5,46 \cdot 10^4$ Pa, destilát obsahuje 77 mol. % hexanu a 23 mol. % heptanu, ze 100 mol suroviny vznikne 59 mol destilátu a 41 mol zbytku.

U19-2: Surovina o složení 32 hmotn. % benzenu a 68 hmotn. % toluenu se má dělit rovnovážnou destilací při teplotě 70 °C tak, aby se surovina rozdělila na 60 hmotn. % parní a 40 hmotn. % kapalnou fázi. Určete složení těchto fází a tlak, při kterém se dělení uskuteční. Předpokládejte, že směs je ideální.

Výsledek: Parní fáze obsahuje 40,1 hmotn. % benzenu a 59,9 hmotn. % toluenu, zbytek obsahuje 19,8 hmotn. % benzenu a 80,2 hmotn. % toluenu, potřebný tlak je 37,6 kPa.

U19-3: Při rovnovážné destilaci směsi obsahující 45 hmotn. % ethanolu a 55 hmotn. % butanolu za normálního tlaku se nastříkuje 1 kg s⁻¹ směsi a získává se 0,43 kg s⁻¹ destilátu. Určete složení destilátu a zbytku a teplotu destilace.

Výsledek: Destilát obsahuje 66,2 hmotn. % ethanolu a 33,8 hmotn. % butanolu, zbytek obsahuje 29,8 hmotn. % ethanolu a 70,2 hmotn. % butanolu, teplota destilace je 94 °C.

U19-4: Při rovnovážné destilaci směsi obsahující 72 mol. % hexanu a 28 mol. % oktanu při tlaku 480 mbar se získává zbytek obsahující 60 mol. % oktanu. Určete složení destilátu, teplotu, při níž probíhá destilace, a tok látkového množství suroviny, má-li se produkovat $8,6 \text{ mol s}^{-1}$ zbytku.

Výsledek: Destilát obsahuje 81,9 mol. % hexanu a 18,1 mol. % oktanu, destilace probíhá při $67,8^\circ\text{C}$, přivádí se $36,4 \text{ mol s}^{-1}$ suroviny.

U19-5: Surovina o složení 40 hmotn. % ethanolu a 60 hmotn. % vody a teplotě 20°C se nejprve pod tlakem zahřívá a pak se při normálním tlaku dělí rovnovážnou destilací. Parní fáze, obsahující 60 hmotn. % ethanolu, v kondenzátoru kondenzuje a chladí se na 20°C . Kapalná fáze se v chladiči zbytku rovněž chladí na teplotu 20°C . Proces probíhá při ustáleném stavu. Určete množství energie dodávané v přehříváči nástřiku a množství energie odebírané v kondenzátoru a v chladiči zbytku a hmotnost vzniklého destilátu, vše vztaženo na 1 kg nástřikované suroviny.

Výsledek: Ke zpracování 1 kg suroviny je třeba dodat v přehříváči 0,97 MJ a odebrat v kondenzátoru 0,84 MJ a v chladiči zbytku 0,13 MJ energie. Vznikne 0,51 kg destilátu.

U19-6: Při destilaci směsi obsahující 90 mol. % furalu a 10 mol. % vody má přejít do destilátu 40 mol. % původní směsi. Předpokládejte, že v daném rozmezí koncentrací je rovnovážný distribuční koeficient vody konstantní a rovný 8,0 (při vyjádření koncentrací v molárních zlomcích). Jaký bude molární zlomek vody v destilátu a zbytku, provádí-li se

- a) rovnovážná destilace při normálním tlaku,
- b) diferenciální destilace při normálním tlaku.

Výsledek:

- a) Při rovnovážné destilaci bude molární zlomek vody v destilátu 0,211 a ve zbytku 0,026.
- b) Při diferenciální destilaci bude molární zlomek vody v destilátu 0,246 a ve zbytku 0,003.

U19-7: Diferenciální destilací se má zmenšit obsah furalu ve směsi s vodou z 1 hmotn. % na 0,1 hmotn. %. Určete podíl hmotnosti původní směsi, který je třeba oddestilovat za normálního tlaku. Dále určete složení destilátu a podíl furalu z původní směsi, který zůstane v destilačním zbytku. Předpokládejte, že v daném rozmezí koncentrací je rovnovážný distribuční koeficient vody konstantní a rovný 3,0 (při vyjádření koncentrací v hmotnostních zlomcích).

Výsledek: Je třeba oddestilovat 68,4 hmotn. % původní směsi. Destilát obsahuje 1,4 hmotn. % furalu a 98,6 hmotn. % vody. V destilačním zbytku zůstane 3,2 hmotn. % původního furalu.

U19-8: Má se zpracovat 100 kg směsi obsahující 40 hmotn. % benzenu a 60 hmotn. % toluenu diferenciální destilací za normálního tlaku. Zbytek má obsahovat 20 hmotn. % benzenu. Určete hmotnostní zlomek benzenu v destilátu a hmotnost destilátu. Výpočet proveďte pro hodnotu střední relativní těkavosti benzenu vzhledem k toluenu 2,50.

Výsledek: Hmotnostní zlomek benzenu v destilátu je 0,528, destilát má hmotnost 61 kg.

U19-9: Diferenciální destilací za normálního tlaku se má rozdělit 100 kg směsi methanolu a vody. Směs obsahuje 65 hmotn. % methanolu, destilát má obsahovat 76,4 hmotn. % methanolu. Vypočítejte hmotnost destilátu a složení zbytku a počáteční i konečnou teplotu destilace.

Výsledek: Hmotnost destilátu je 83,8 kg, zbytek obsahuje 5,9 hmotn. % methanolu a 94,1 hmotn. % vody. Počáteční teplota destilace je 73 °C, konečná 94 °C.

U19-10: Diferenciální destilací za normálního tlaku se dělí 135 kg směsi obsahující 65 hmotn. % ethanolu a 35 hmotn. % vody. Surovina má teplotu 20 °C, ve zbytku má být 95 hmotn. % vody, destilát se má ochladit na teplotu 20 °C. Určete hmotnost zbytku a destilátu, střední složení destilátu, množství energie dodané do vařáku a odebrané při kondenzaci a chlazení destilátu.

Výsledek: Vznikne 15,7 kg zbytku a 119,3 kg destilátu. Destilát obsahuje 72,9 hmotn. % ethanolu a 27,1 hmotn. % vody. Do vařáku je třeba přivést 174 MJ a při kondenzaci a chlazení je třeba odebrat 170 MJ energie.

U19-11: Při tlaku $2,1 \cdot 10^4$ Pa se zbavuje tetrachlorethan netěkavých kapalných příměsí kontinuálním přeháněním vodní párou. Předpokládejte, že množství příměsí v nástřiku je zanedbatelné, a že se předestiluje všechen tetrachlorethan. Účinnost stupně je 75 %. Určete teplotu destilace a hmotnost vodní páry, která přejde s 1 kg tetrachlorethanu do destilátu.

Tetrachlorethan je prakticky nerozpustný ve vodě a jeho molární hmotnost je 0,1678 kg mol⁻¹. Závislost tlaku par tetrachlorethanu na teplotě udává tab. 19-25.

Tabulka 19-25 Závislost tlaku par tetrachlorethanu na teplotě

$p_A^0 / 10^3 \text{ Pa}$	1	2	3	5	8	13
$t / ^\circ\text{C}$	27,2	40,5	48,4	59,3	70,0	82,4

Výsledek: Teplota destilace je 56 °C; s 1 kg tetrachlorethanu přejde do destilátu 0,59 kg vodní páry.

U19-12: Terpentýn se čistí přeháněním vodní párou při tlaku 0,1 MPa, aby se zbavil netěkavých příměsí. K přehánění se používá nasycená vodní pára o tlaku 0,12 MPa.

Do destilátu má přejít všechnen terpentýn. Koncentrace netěkavých příměsí je zanedbatelná. Zařízení není zahříváno zvenčí, ke ztrátě energie do okolí a k energii k zahřátí na bod varu není třeba přihlížet. Účinnost stupně je 0,9. Směs terpentýnu a vody za daného tlaku vře při teplotě 96 °C. Měrná entalpie vypařování při této teplotě je $3,1 \cdot 10^5 \text{ J kg}^{-1}$, hustota směsi je 865 kg m^{-3} a její molární hmotnost $0,136 \text{ kg mol}^{-1}$. Určete hmotnost vodní páry potřebné k predestilování 1 m^3 terpentýnu.

Výsledek: K predestilování 1 m^3 terpentýnu je zapotřebí 1032 kg vodní páry.

U19-13: Určete počet rovnovážných stupňů rektifikační kolony a nástřikový stupeň pro kontinuální dělení směsi acetonu a toluenu. Nástřikován je roztok obsahující 42 hmotn. % acetonu při svém bodu varu. Do destilátu má přejít 96 % acetonu; koncentrace acetonu v destilátu má být 94 hmotn. %. Hodnota poměru zpětného toku je 0,5, kolona má rovnovážný vařák a totální kondenzátor. Proces probíhá při normálním tlaku.

Výsledek: K dělení je třeba 5,0 rovnovážných stupňů kromě rovnovážného vařáku, nástřik se přivádí do třetího stupně shora.

U19-14: Určete počet pater potřebný ke kontinuálnímu dělení směsi ethanol-butanol v rektifikační koloně s rovnovážným vařákem a totálním kondenzátorem. Nástřik je ekvimolární směs obou složek a přitéká do kolony v množství 6400 kg h^{-1} . Nástřik se přivádí

- a) jako kapalina při bodu varu,
- b) jako kapalina při teplotě 20 °C,
- c) jako přehřátá pára při $q = -1$.

Ve všech případech je poměr zpětného toku dvojnásobkem jeho minimální hodnoty. Má odcházet 2400 kg h^{-1} destilátu obsahujícího 95 mol. % ethanolu. Proces probíhá při normálním tlaku. Celková účinnost kolony je 0,55.

Výsledek: a) Je zapotřebí 9 pater, b) je třeba 9 pater, c) postačí 6 pater.

U19-15: V nepřetržitě pracující patrové rektifikační koloně s rovnovážným vařákem a totálním kondenzátorem se má získávat destilát obsahující 92 mol. % heptanu a zbytek obsahující 6 mol. % heptanu. V nástřiku je 52 mol. % heptanu a 48 mol. % oktanu a přivádí se do kolony při svém bodu varu. Proces probíhá při normálním tlaku. Určete

- a) množství heptanu (v %) přešlé z nástřiku do destilátu,
- b) minimální počet rovnovážných stupňů kolony a minimální poměr zpětného toku,
- c) potřebný počet rovnovážných stupňů kolony a nástřikový stupeň pro dvojnásobek minimálního poměru zpětného toku.

Výsledek:

- a) do destilátu přejde 95 % heptanu z nástřiku,

- b) minimální počet rovnovážných stupňů kolony je 6,3, minimální hodnota poměru zpětného toku je 1,0,
 c) potřebný počet rovnovážných stupňů je 9, nástřík se přivádí do 4. stupně shora.

U19-16: V nepřetržitě pracující patrové rektifikační věži s rovnovážným vařákem a totálním kondenzátorem se má dělit směs obsahující 52 mol. % heptanu a 48 mol. % oktanu na destilát obsahující 92 mol. % heptanu a zbytek s 6 mol. % heptanu. Nástřík se přivádí do kolony při teplotě o 10 °C nižší, než je jeho bod varu a za 8 hodin nepřetržitého provozu se má zpracovat 25 kmol suroviny. Poměr zpětného toku je 1,5-násobkem minimální hodnoty. Proces probíhá při normálním tlaku. Intenzita hmotnostního toku kapalně fáze u paty kolony má být $0,15 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Určete počet rovnovážných pater, umístění nástřikového patra a průměr kolony.

Výsledek: Kolona má mít 16 pater, přičemž nástřík se přivádí na 8. patro shora, průměr kolony má být 1,25 m.

U19-17: V rektifikační věži o průměru 0,15 m, plněné Raschigovými kroužky průměru 10 mm, se má kontinuálně dělit směs obsahující 55 mol. % ethanolu a 45 mol. % butanolu. Má se získat destilát obsahující 96 mol. % ethanolu a zbytek s 95 mol. % butanolu. Věž má rovnovážný vařák a totální kondenzátor. Nástřík se přehřívá a přivádí se jako rovnovážná ekvimolární směs kapaliny a páry. Hodnota poměru zpětného toku je 1,25-násobkem jeho minimální hodnoty. Střední hodnota intenzity hmotnostního toku kapalně fáze v ochuzovací části věže je $0,4 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Proces probíhá při normálním tlaku. Určete tok látkového množství nástříku a výšku vrstvy výplně obohacovací a ochuzovací části věže. Pro odhad výšky ekvivalentní rovnovážnému stupni vyjděte z podmínek druhého rovnovážného stupně pod kondenzátorem a druhého rovnovážného stupně nad vařákem.

Výsledek: Tok látkového množství nástříku je $0,11 \text{ mol s}^{-1}$, výška vrstvy výplně v obohacovací části je 1,77 m a ochuzovací části 0,82 m.

U19-18: Při kontinuální rektifikaci směsi obsahující 40 hmotn. % methanolu a 60 hmotn. % vody se získává destilát s 96 hmotn. % methanolu a zbytek s 98 hmotn. % vody. Směs se nástříkuje do kolony jako kapalina při bodu varu. Na tuto teplotu se přehřívá v přehříváči nasycenou vodní párou o tlaku 3 bar z teploty 20 °C. Hodnota poměru zpětného toku je 1,5, zpětný tok se vrací při svém bodu varu. Proces probíhá při normálním tlaku. Vypočtěte hmotnost vyrobeného destilátu a zbytku za směnu, zpracuje-li se 2500 kg suroviny. Určete úhrnnou hmotnost spotřebované páry, vytápí-li se vařák nasycenou vodní párou o tlaku 3 bar. Ke ztrátám energie do okolí nepřihlížejte. Dále určete hmotnost chladicí vody spotřebované v kondenzátoru a v chladičích, chladí-li se oba produkty na 25 °C. Voda se ohřívá o 20 °C.

Výsledek: Hmotnost vyrobeného destilátu je 1011 kg, zbytku 1489 kg. Spotřebovaná pára má hmotnost 1633 kg a chladicí vody se spotřebovuje 41,7 tun.

U19-19: Nepřetržitou rektifikací při normálním tlaku se má zpracovat 80 kg h^{-1} směsi kyseliny octové s vodou, obsahující 42 hmotn. % vody. Destilát má obsahovat 5 hmotn. % kyseliny octové a zbytek 1 hmotn. % vody. Hodnota poměru zpětného toku je 8. Určete hmotnostní tok destilátu a zbytku a průměr kolony, je-li plněna keramickými Raschigovými kroužky průměru 25 mm. Při odhadu průměru vyjděte z podmínek v hlavě kolony.

Výsledek: Hmotnostní tok destilátu je $0,0097 \text{ kg s}^{-1}$, hmotnostní tok zbytku $0,0125 \text{ kg s}^{-1}$. Věž má průměr 0,33 m.

U19-20: Do nepřetržitě pracující rektifikační věže s vrstvou Raschigových kroužků vysokou 4 m se nastříkuje ekvimolární směs heptanu a oktanu při bodu varu do místa, kde složení kapaliny přibližně odpovídá složení nástřiku. Proces probíhá při normálním tlaku, ke koloně je připojen rovnovážný vařák a totální kondenzátor. Při pětinasobku minimální hodnoty poměru zpětného toku se získá destilát s obsahem 10 mol. % oktanu a zbytek obsahující 5 mol. % heptanu. Jaká je hodnota výšky vrstvy ekvivalentní rovnovážnému stupni h_e ?

Výsledek: Hodnota $h_e = 0,59 \text{ m}$.

U19-21: Zjistěte počet pater rektifikační kolony pro nepřetržité dělení směsi obsahující 30 mol. % methanolu a 70 mol. % vody. Má se získat zbytek obsahující 90 % přiváděné vody. Látkové množství zbytku má být dvojnásobkem látkového množství destilátu. Věž má rovnovážný vařák a totální kondenzátor. Murphreeova účinnost patra pro kapalnou fázi je 0,75. Nástřík se přivádí do kolony při svém bodu varu. Hodnota poměru zpětného toku je 1. Proces probíhá za normálního tlaku.

Výsledek: K dělení jsou nutná 4 patra.

U19-22: Nepřetržitou rektifikací v patrové věži se za normálního tlaku má rozdělit směs o složení 55 mol. % ethanolu a 45 mol. % butanolu. Má se získat destilát obsahující maximálně 5 mol. % butanolu a zbytek obsahující 5 mol. % ethanolu. Kolona má rovnovážný vařák a totální kondenzátor. Murphreeova účinnost pater pro parní fázi je 0,6. Nástřík se přehřívá a přivádí se do kolony jako rovnovážná ekvimolární směs kapaliny a páry. Poměr zpětného toku je 1,25-násobkem toku minimálního. Určete potřebný počet pater a umístění nástřikového patra.

Výsledek: K dělení je zapotřebí 13 pater, nástřík se přivádí na 7. patro zdola.

U19-23: V obohacovací věži se má kontinuálně zpracovávat parní směs přiváděná do paty kolony při teplotě rosného bodu, obsahující 35 hmotn. % ethanolu a 65 hmotn. % vody. Destilát a zpětný tok mají teplotu 38°C a obsahují 85 hmotn. % ethanolu. Zbytek se odvádí jako kapalina při bodu varu. Proces probíhá při normálním tlaku. Určete

a) hodnotu minimálního poměru zpětného toku, minimální množství energie odebrané z kondenzátoru (vztažené na 1 kg destilátu) a minimální hmotnostní zlomek ethanolu ve zbytku,

b) při hodnotě zpětného toku o 45 % větší než minimální určete potřebný počet rovnovážných stupňů, hmotnostní zlomek ethanolu ve zbytku a energii odebranou z kondenzátoru (vztaženou na 1 kg destilátu).

Výsledek:

a) Hodnota minimálního poměru zpětného toku je 3,30, minimální množství energie připadající na 1 kg destilátu odebrané z kondenzátoru je $5,10 \text{ MJ kg}^{-1}$, minimální hmotnostní zlomek ethanolu ve zbytku je 0,050.

b) K dělení je zapotřebí 3,0 rovnovážných stupňů, hmotnostní zlomek ethanolu ve zbytku je 0,15, množství energie připadající na 1 kg destilátu odebrané z kondenzátoru je $6,86 \text{ MJ kg}^{-1}$.

U19-24: V kontinuálně pracující rektifikační koloně se má zpracovávat roztok obsahující 35 hmotn. % ethanolu a 65 hmotn. % vody. Destilát a zpětný tok mají obsahovat 90 hmotn. % ethanolu a mají mít teplotu 45°C , ve zbytku mají být 2 hmotn. % ethanolu. Nastříkuje se $0,277 \text{ kg s}^{-1}$ suroviny a hodnota zpětného toku je $0,390 \text{ kg s}^{-1}$. Proces probíhá při normálním tlaku. Celková účinnost pater kolony je 70 %, vařák pracuje jako rovnovážný stupeň. Nástřík má teplotu bodu varu. Určete

a) potřebný počet pater a umístění nástřikového patra,

b) tepelný příkon do vařáku,

c) tepelný výkon kondenzátoru.

Výsledek:

a) K dělení je zapotřebí 9 pater, nástřikové patro je 2. zdola.

b) Tepelný příkon do vařáku je 533 kW.

c) Tepelný výkon kondenzátoru je 537 kW.

U19-25: Periodickou rektifikací s konstantním poměrem zpětného toku se má z vodného roztoku obsahujícího 60 hmotn. % ethanolu vydestilovat ethanol tak, aby roztok obsahoval nejvýše 2,5 hmotn. % ethanolu. Získaný destilát má obsahovat minimálně 80 hmotn. % ethanolu. Proces se má uskutečnit v koloně s 5 rovnovážnými stupni (včetně rovnovážného vařáku) s hodnotou poměru zpětného toku 1,35. Určete, zda kolona postačuje pro požadované dělení. Dále určete složení a hmotnost destilátu, byla-li zpracována při normálním tlaku surovina o hustotě 895 kg m^{-3} v množství 2 m^3 .

Výsledek: Kolona vyhovuje. Získá se 1253 kg destilátu o složení 87 hmotn. % ethanolu a 13 hmotn. % vody.

U19-26: Při periodické rektifikaci směsi obsahující 52 hmotn. % benzenu a 48 hmotn. % toluenu se má odebírat destilát obsahující 95 hmotn. % benzenu. Proces probíhá při

normálním tlaku ve věži s vrstvou výplně, jejíž výška odpovídá 3 ekvivalentním rovnovážným stupňům. Vařák je rovnovážný, kondenzátor totální. Původní vsádka má hmotnost 1250 kg. Určete hmotnost a složení destilačního zbytku, je-li spotřeba energie ve vařáku $8,2 \cdot 10^5$ kJ. Při výpočtu předpokládejte, že energie odebraná z kondenzátoru se rovná energii dodané do vařáku a nepřihlížejte k energii odebrané v chladiči destilátu.

Výsledek: Destilační zbytek má hmotnost 907 kg a obsahuje 35,7 hmotn. % benzenu a 64,3 hmotn. % toluenu.

U19-27: V rektifikační věži s vrstvou výplně byla při totálním zpětném toku dělena směs acetonu a toluenu. Po dosažení ustáleného stavu bylo ve vzorku odebraném na výstupu z totálního kondenzátoru nalezeno 97,2 mol. % acetonu a ve vzorku kapaliny stékající do rovnovážného vařáku bylo nalezeno 2,2 mol. % acetonu. Výška vrstvy výplně je 1,4 m. Určete výšku ekvivalentní rovnovážnému stupni a výšku převodové jednotky vztažené ke kapalně fázi. Předpokládejte, že odpor proti sdílení hmoty je soustředěn v kapalině.

Výsledek: Výška ekvivalentní rovnovážnému stupni je 0,34 m, výška převodové jednotky je 0,25 m.

U19-28: Do rektifikační věže s vrstvou výplně se má do spodního průřezu kontinuálně přivádět pára obsahující 20 mol. % ethanolu a 80 mol. % vody při svém rosném bodu. Z kondenzátoru má odcházet destilát obsahující 70 mol. % ethanolu o teplotě o 5°C nižší, než je bod varu destilátu. Hodnota poměru zpětného toku je 3,8, proces probíhá při normálním tlaku. Výška převodové jednotky přestupu hmoty $h_x = 0,46$ m, výška převodové jednotky přestupu hmoty $h_y = 0,33$ m. Určete potřebnou výšku vrstvy výplně a koncentraci ethanolu v kapalině odebírané ze spodku kolony.

Výsledek: Potřebná výška vrstvy výplně je 2,77 m, odebíraná kapalina obsahuje 7 mol. % ethanolu.

U19-29: Kapalná směs uhlovodíků obsahující 15 mol. % n-hexanu, 52 mol. % n-heptanu a 33 mol. % n-oktanu se na vstupu do rektifikační věže podrobuje rovnovážné destilaci při tlaku 0,13 MPa a teplotě, která je aritmetickým středem bodu varu a rosného bodu směsi. Určete, jaký podíl látkového množství suroviny přejde do parní fáze a jaké bude složení vzniklých fází.

Výsledek: Do parní fáze přejde 49,5 % látkového množství suroviny, pára bude obsahovat 21,2 mol. % n-hexanu, 57,2 mol. % n-heptanu a 21,6 mol. % n-oktanu; kapalina bude obsahovat 8,9 mol. % n-hexanu, 46,8 mol. % n-heptanu a 44,3 mol. % n-oktanu.

U19-30: Kapalná směs uhlovodíků obsahující 15 mol. % n-hexanu, 52 mol. % n-heptanu a 33 mol. % n-oktanu se má dělit kontinuální rektifikací tak, aby do parní fáze přešlo 95 %

n-heptanu obsaženého v nástřiku a 5 % n-oktanu obsaženého v nástřiku. Věž bude mít totální kondenzátor a rovnovážný vařák. Nástřík se má přivádět při svém bodu varu, hodnota poměru $R / R_{\min} = 1,4$, pracovní tlak má být 0,13 MPa. Odhadněte potřebný počet rovnovážných stupňů rektifikační kolony a počet rovnovážných stupňů nad nástřikovým stupněm.

Výsledek: K dělení je potřeba rektifikační věž s dělicí schopností 14 rovnovážných stupňů, nad nástřikovým patrem je třeba 9 rovnovážných stupňů.

Literatura

- | | |
|----|---|
| F1 | Fenske M.R.: Ind.Eng.Chem. 24, 482 (1932). |
| G1 | Gilliland E.R.: Ind.Eng.Chem. 32, 1220 (1940). |
| H1 | Holeček O.: <i>Chemickoinženýrské tabulky</i> . Skriptum VŠCHT, Praha 1997. |
| H2 | Hands C.H.G., Whitt F.R.: J.Appl.Chem. 1, 135 (1951). |
| K1 | Kafarov V.V., Dytnerskij J.I.: Ž.prikl.chim. 30, 1698 (1957). |
| K2 | Kirkbride C.G.: Petrol.Refiner 23 (9), 321 (1944). |
| M1 | Míka V., Neužil L.: <i>Chemické inženýrství II</i> . Skriptum VŠCHT, Praha 1999. |
| M2 | Molokanov J.K.: Int.Chem.Eng. 12 (2), 209 (1972). |
| N1 | Nekovář P.: <i>Difuzní procesy</i> . Skriptum VŠCHT, MON Praha 1988. |
| | Nekovář P.: <i>Difuzní procesy. Sbíрка příkladů</i> . Skriptum, ES VŠCHT, Praha 1993. |
| N2 | Neužil L., Míka V.: <i>Chemické inženýrství I</i> . Skriptum, ES VŠCHT, Praha 1998. |
| U1 | Underwood A.J.R.: J.Inst.Petr. 31, 111 (1945); <i>l.c.</i> 32, 598 (1946); Chem. Eng.Progr. 44, 603 (1948). |