

15 Absorpce

Václav Linek, Tomáš Moucha, Vladimír Mika

V této kapitole jsou uvedeny vztahy pro určení počtu pater nebo výšky výplně absorpčních kolon pro jednosložkovou absorpci bez doprovodu chemickou reakcí. Výpočty kolon pro vícesložkovou absorpci či absorpci za doprovodu chemickou reakcí lze nalézt v monografiích [Z1, D1]. Výpočet tlakové ztráty kolony je zahrnut do kapitoly 3.

A Výpočtové vztahy

Bilanční a rychlostní vztahy jsou zapsány v molárních veličinách. Obdobné vztahy platí pro veličiny hmotnostní.

15.1 Rovnovážná rozpustnost plynů v kapalinách

Rovnovážné složení plynné a kapalné fáze je charakterizováno rovnovážným součinitelem ψ_A , který představuje poměr rovnovážných molárních zlomků složky A v plynné a kapalné fázi

$$y_A = \psi_A x_A \quad (15-1)$$

Pokud platí Henryův zákon

$$p_A = H_A x_A \quad (15-2)$$

kde p_A je rovnovážný parciální tlak složky A, H_A je Henryův koeficient, plyne pro rovnovážný součinitel

$$\psi_A = H_A / p$$

Pro ideální roztoky platí Raoultův zákon, podle kterého

$$\psi_A = p_A^\circ / p$$

kde p_A° je rovnovážný tlak čisté složky A při její teplotě. Rovnovážný koeficient ψ_A je závislý na teplotě, tlaku a často i na koncentraci složky A, takže rovnovážný vztah mezi koncentracemi je nelineární. Někdy jej lze v rozmezí hodnot koncentrací na vstupu a výstupu z absorberu považovat za lineární, tj. platí

$$y_A = \psi'_A x_A + b_1 \quad [x_{Ai} \leq x_A \leq x_{Ae}] \quad (15-5)$$

V relativních molárních zlomcích definovaných rovnicí (15-12) má rovnovážný vztah tvar¹

$$Y_A = \varphi_A X_A \quad (15-6)$$

a v lineární oblasti lze psát

$$Y_A = \varphi'_A X_A + b_2 \quad [X_{Ai} \leq X_A \leq X_{Ae}] \quad (15-7)$$

Hodnoty ψ'_A a φ'_A jsou konstanty a představují směrnice přímků aproximujících rovnováhu v daném rozmezí koncentrací, b_1 a b_2 jsou rovněž konstanty.

Vztah mezi součiniteli φ_A a ψ_A je $\varphi_A = \psi_A / [1 - (\psi_A - 1)X_A] = \psi_A + (\psi_A - 1)Y_A$

V tabulce XII-2 jsou uvedeny hodnoty Henryova koeficientu a v tabulce XII-1 rovnovážné parciální tlaky některých plynů nad jejich vodnými roztoky v závislosti na teplotě. Hodnoty H_A z tabulky XII-2 lze k výpočtu použít pouze v oblasti velmi nízkých koncentrací, kdy H_A nezávisí na koncentraci rozpuštěného plynu. Rozpustnost jiných technicky významných systémů lze nalézt v příslušné literatuře [L1].

15.1.1 Rozpustnost plynů v roztocích anorganických elektrolytů.

Rozpustnost v těchto soustavách lze vypočítat pomocí vysolovacího koeficientu e ze vztahu

$$\log \frac{H_A}{H_A^0} = eI \quad (15-8)$$

kde H_A a H_A^0 jsou Henryovy koeficienty plynné složky pro vodný roztok elektrolytu a pro čistou vodu a I je iontová síla roztoku, definovaná vztahem

$$I = \frac{1}{2} \sum_i c_i z_i^2 \quad (15-9)$$

kde c_i je molární koncentrace (kmol m^{-3}) a z_i je náboj i -tého iontu v roztoku. Veličina e je empirický koeficient složený z příspěvků vztahujících se ke kationtům, e_+ , a aniontům, e_- , přítomným v roztoku a k danému plynu, e_g :

$$e = e_+ + e_- + e_g \quad (15-10)$$

V tab. 15-1 jsou uvedeny hodnoty e_+ , e_- a e_g pro některé ionty a plyny[O1]. Jestliže v tabulce hodnotu empirického příspěvku pro určitý ion či plyn nenajdeme, můžeme použít hodnoty pro příbuznou látku. Například hodnota pro ion NO_3^- je užívána i pro ion NO_2^- . Hodnotu příspěvku e_g pro jiné než v tab. 15-1 uvedené teploty lze získat lineární interpolací v rozmezí tabelovaných teplot.

Tímto postupem lze spočítat i rovnovážnou koncentraci plynu rozpuštěného v kapalném reagujícím systému na fázovém rozhraní plyn-kapalina, x_{Aw} . Jedná se např. o systémy CO_2 -NaOH a O_2 - Na_2SO_3 .

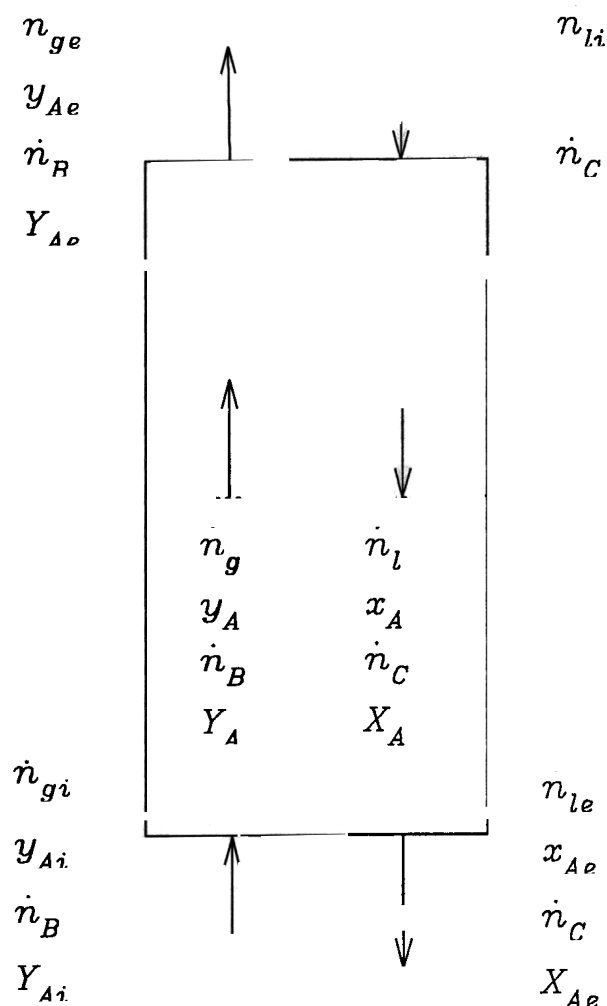
15.2 Bilance látkového množství pro absorber se spojitým stykem fází

Z obr. 15-1a, na kterém je nakreslena protiproudá absorpční věž, je patrné značení proudů a koncentrací. Stejný způsob značení budeme používat i pro souproudé uspořádání, tj. označíme vstupní veličiny indexem i a výstupní indexem e a pro libovolný průřez uvnitř absorberu je ponecháme bez indexu. Je předpokládán pístový tok fází zařízením. Všechny koncentrace jsou zprůměrněné podle průřezu.

Pro celkovou rychlost absorpce složky A v absorberu, n_A , platí bilanční vztah

$$\dot{n}_A = y_{Ai} \dot{n}_{gi} - y_{Ae} \dot{n}_{ge} = x_{Ae} \dot{n}_{le} - x_{Ai} \dot{n}_{le} \quad (15-11)$$

kde index g označuje plynnou, l kapalnou fázi, i značí vstup a e výstup fáze z absorberu. Rovnice platí pro souproud i protiproud.



Obr. 15-1a. Způsob značení proudů a koncentrací v protiproudé absorpční koloně

Pokud je rozpustnost jedné z plyných složek výrazně větší než rozpustnost ostatních složek a pokud je rovnovážný tlak par kapaliny v absorberu malý, lze předpokládat, že se plynná i kapalná fáze skládají jednak ze složky A, která přechází z jedné fáze do druhé, jednak ze složek B v plynné a C v kapalně fázi, které se výměny hmoty neúčastní. Pak se v bilančních vztazích s výhodou použijí relativní zlomky vztažené na složky B v plynné a C v kapalně fázi, neboť průtok těchto složek je podél celého absorberu konstantní. Relativní molární zlomky jsou definovány vztahy

$$X_A = \frac{\dot{n}_{Al}}{\dot{n}_C} = \frac{x_A}{x_C} \quad Y_A = \frac{\dot{n}_{Ag}}{\dot{n}_B} = \frac{y_A}{y_B} \quad (15-12)$$

Bilance látkového množství složky A je obdoba rovnice (15-11)

$$\dot{n}_A = (Y_{Ai} - Y_{Ae})\dot{n}_B = (X_{Ae} - X_{Ai})\dot{n}_C \quad (15-13)$$

Pro průtoky složek B a C v libovolném průřezu kolony platí vztah

$$\dot{n}_B = \dot{n}_g(1 - y_A) = \frac{\dot{n}_g}{1 + Y_A} \quad (15-14)$$

$$\dot{n}_C = \dot{n}_l(1 - x_A) = \frac{\dot{n}_l}{1 + X_A} \quad (15-15)$$

Vztah mezi koncentracemi složky A v plynu a kapalině v libovolném průřezu kolony je dán bilancí látkového množství složky a při grafickém řešení úloh se nazývá rovnice pracovní přímky. V distribučním diagramu při protiproudu má pro úsek absorberu mezi jeho koncem a libovolným průřezem tvar

$$Y_A = \frac{\dot{n}_C}{\dot{n}_B}(X_A - X_{Ai}) + Y_{Ae} = \frac{\dot{n}_C}{\dot{n}_B}(X_A - X_{Ae}) + Y_{Ai} \quad (15-16)$$

Byla-li složka A v daném absorpčním zařízení odstraněna z plynné fáze ze 100 □ procent, platí vztah

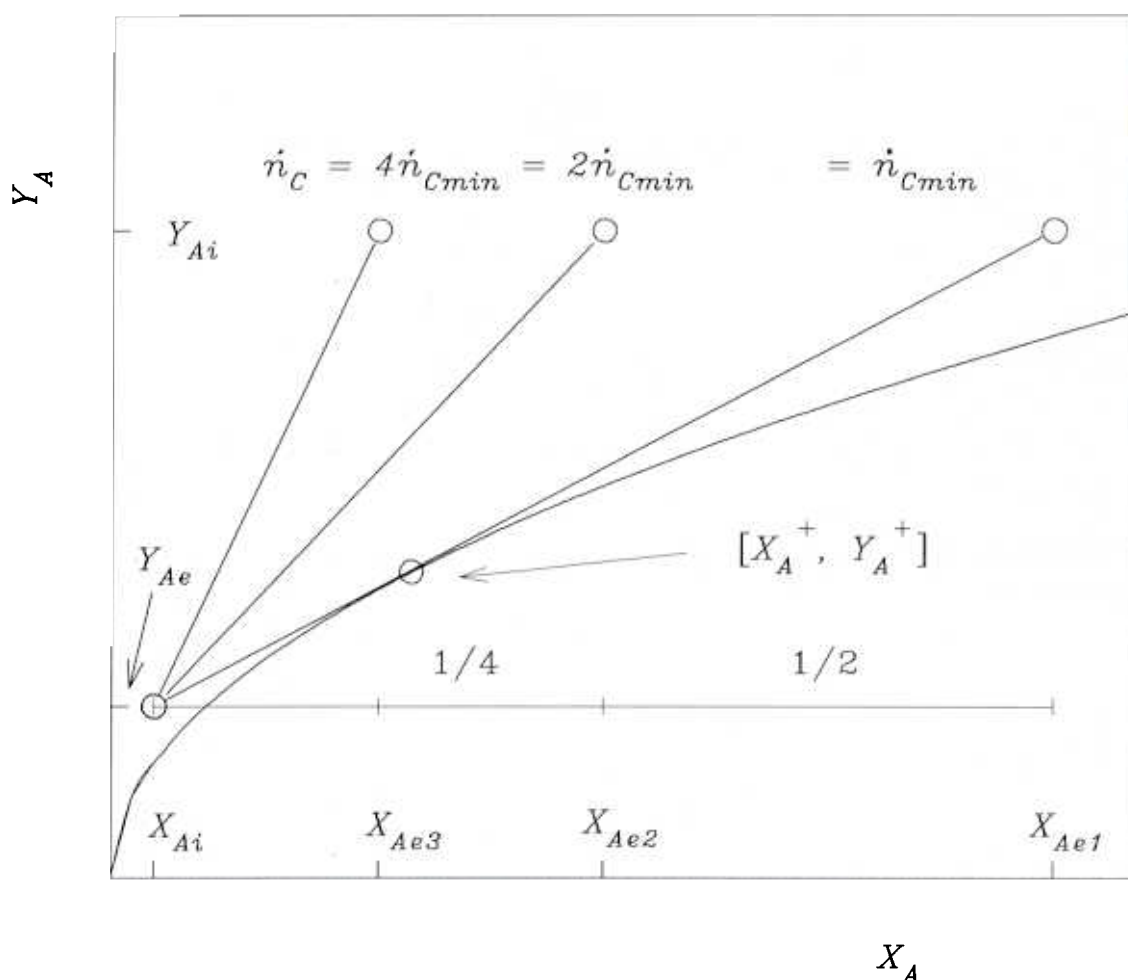
$$Y_{Ae} = (1 - \Theta)Y_{Ai} \quad (15-17)$$

Pro celkovou rychlost absorpce složky A v absorberu platí

$$\dot{n}_A = \dot{n}_B Y_{Ai} \Theta = \dot{n}_{gi} y_{Ai} \Theta \quad (15-18)$$

15.2.1 Minimální spotřeba rozpouštědla

Absorpční výpočty obvykle vycházejí ze zadaných hodnot průtoku a složení plynu vstupujícího do absorberu, přípustné koncentrace dané složky v odváděném plynu a složení přiváděné kapaliny. Průtok přiváděné kapaliny obvykle volíme a složení kapaliny odtékající z kolony vyplyne z celkové bilance (15-11) nebo (15-13). Volbou průtoku přiváděné kapaliny ovlivňujeme sklon pracovní přímky v diagramu závislosti Y_A na X_A dané rovnicí (15-16) (viz obr. 15-1b) a tím i koncentraci absorbované složky v odtékající kapalině. Konkrétní hodnota průtoku kapaliny vyplývá z ekonomických výpočtů. Minimální možný průtok rozpouštědla určíme ze směrnice pracovní přímky vedené tak, aby koncentrace absorbované složky v kapalině dosáhla v některém místě kolony rovnovážné hodnoty. Tomu odpovídá nekonečně velká výška absorberu. Pod touto hranicí průtoku už nelze dosáhnout požadovaného vyčištění plynu. Používaný průtok kapaliny bývá udáván jako násobek této minimální meze. Shora je průtok kapaliny do kolony omezen jejím zahlcením. V kolonách s vrstvou výplně se s ohledem na dobré smočení výplně a na riziko zahlcení volí průtok kapaliny v intervalu 10 až 80 % hodnoty, při které by při daném průtoku plynu došlo k zahlcení. Výpočet meze zahlcení kolony s výplní je pro různé typy výplní uveden v oddíle 3. Pro patrové absorbéry se udává např. v [M1, str.247, rovn. (11.2-3)].



Obr. 15-1b. Způsob určení minimální spotřeby rozpouštědla

Při protiproudu plynu a kapaliny mohou podle tvaru rovnovážné křivky nastat dva případy. V prvním případě znázorněném na obr. 15-1b se rovnováha ustavuje v některém průřezu uvnitř absorbéru a pracovní přímka se právě dotýká rovnovážné čáry a prochází bodem představujícím složení vstupující kapaliny a vystupujícího plynu. Složka A má ve vystupující kapalině maximální možnou koncentraci $X_{Ae,max}$ a směrnice pracovní přímky je

$$\frac{\dot{n}_{Cmin}}{\dot{n}_B} = \frac{Y_{Ai} - Y_{Ae}}{X_{Ae,max} - X_{Ai}} \quad (15-19)$$

Pro $\psi_A = \text{konst}$, tj. při platnosti Henryova a Raoultova zákona a konstantní teplotě, se směrnice tečny k rovnovážné čáře a hodnota minimálního toku rozpouštědla dá zjistit numericky. Kladný reálný kořen kvadratické rovnice

$$(Y_{Ae} - \psi_A X_{Ai})Z^2 + 2wY_{Ae}Z + (wY_{Ae} - 1)w = 0 \quad (15-19a)$$

poskytuje souřadnice bodu dotyku $X_A^+ = (\psi_A Z)^{-1}$ a $Z_A^+ = (Z + w)^{-1}$, kde $w = \psi_A^{-1} - 1$. Rovnice směrnice tečny pak je

$$\frac{\dot{n}_{Cmin}}{\dot{n}_B} = \frac{Y_A^+ - Y_{Ae}}{X_A^+ - X_{Ai}} \quad (15-19b)$$

V druhém případě nastává rovnováha v místě přívodu plynu do kolony a platí

$$\frac{\dot{n}_{C\min}}{\dot{n}_B} = \frac{Y_{Ai} - Y_{Ae}}{X_{Ae}^* - X_{Ai}} \quad (15-20)$$

kde X_{Ae}^* je rovnovážná koncentrace vůči složení vstupujícího plynu Y_{Ai} . Při souproudu může rovnováha nastat pouze v místě odvodu plynu a kapaliny z kolony.

Při desorpci se obdobným způsobem může určit minimální spotřeba plynu potřebná k požadovanému odstranění složky A z kapaliny. Pokud platí $\psi_A = \text{konst}$, lze použít rovnic (15-19a) a (15-19b), v nichž se zamění X_{Ae} za X_{Ai} , Y_{Ai} za Y_{Ae} , $n_{B\min}$ za $\dot{n}_b$ a $\dot{n}_c$ za $\dot{n}_{c\min}$.

15.3 Bilance entalpie pro absorbér se spojitým stykem fází

Předpokládáme konstantní toky inertních složek plynné a kapalně fáze B a C podél absorbéru. Pro konečný úsek ustáleně pracující kolony mezi libovolným průřezem uvnitř absorbéru a hlavou kolony platí při protiproudu vztah

$$(I_g - I_{ge})\dot{n}_B = (I_l - I_{li})\dot{n}_C = \dot{Q} \quad (15-21)$$

a při souproudu

$$(I_{gi} - I_g)\dot{n}_B = (I_l - I_{li})\dot{n}_C = \dot{Q} \quad (15-22)$$

kde $I_g = H_g/n_B$ je relativní molární entalpie plynné fáze vztažená na látkové množství složky B, $I_l = H_l/n_C$ relativní molární entalpie kapalně fáze vztažená na látkové množství složky C, $\dot{Q}$ - tok tepla do okolí v daném úseku absorbéru. Volíme-li jako standardní stavy složky A a B v plynném a C v kapalném stavu při teplotě 0 °C a tlaku v absorbéru, pak pro I_l platí vztah

$$I_l = (c_{pC} + X_A c_{pA})t_l + X_A(\Delta h_{sA} - \Delta h_{lgA}) \quad (15-23)$$

kde c_{pi} je střední molární tepelná kapacita při konstantním tlaku čistých složek v kapalně fázi v intervalu teplot od 0 do t_l °C, t_l - teplota kapaliny, Δh_{sA} - molární integrální rozpouštěcí entalpie kapalně složky A v roztoku při teplotě t_l , vztažená na jednotkové látkové množství složky A, Δh_{lgA} - molární výparná entalpie složky A při 0 °C.

Zanedbáme-li změnu entalpie (zjevné teplo) plynně fáze při průchodu kolonou a je-li změna koncentrace složky A v kapalně fázi malá, takže se dá použít střední hodnoty integrální rozpouštěcí entalpie, lze odvodit z rovnice (15-21) vztah pro teplotu kapaliny v libovolném průřezu absorbéru

$$(c_{pC} + X_A c_{pA})t_l = (c_{pC} + X_{Ai} c_{pA})t_{li} + (X_{Ai} - X_A)\langle\Delta h_{aA}\rangle - \dot{Q}/\dot{n}_C \quad (15-24)$$

kde $\langle\Delta h_{aA}\rangle$ je střední molární absorpční entalpie složky A, definovaná vztahem

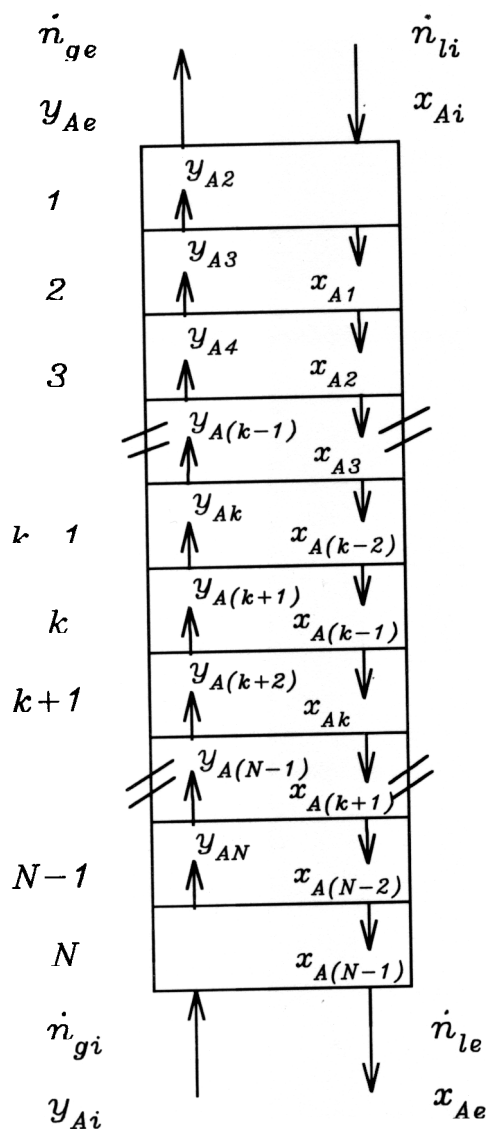
$$\langle\Delta h_{aA}\rangle = \langle\Delta h_{sA}\rangle - \Delta h_{lgA} \quad (15-25)$$

kde $\langle\Delta h_{sA}\rangle$ je střední molární integrální rozpouštěcí entalpie složky A. Dvojitá lomená závorka značí dvojí zprůměrnění v teplotě a v koncentraci.

15.4 Patrové kolony

15.4.1 Počet rovnovážných stupňů kolony

Z obr. 15-2a je patrný způsob značení koncentrací jednotlivých proudů kolony, jedná se o protiproud. Vstupní proudy jsou označeny indexem i a výstupní indexem e . Indexem k označujeme veličiny vztahující se k proudům odcházejícím z k -tého stupně kolony. Celkový počet rovnovážných stupňů je N .



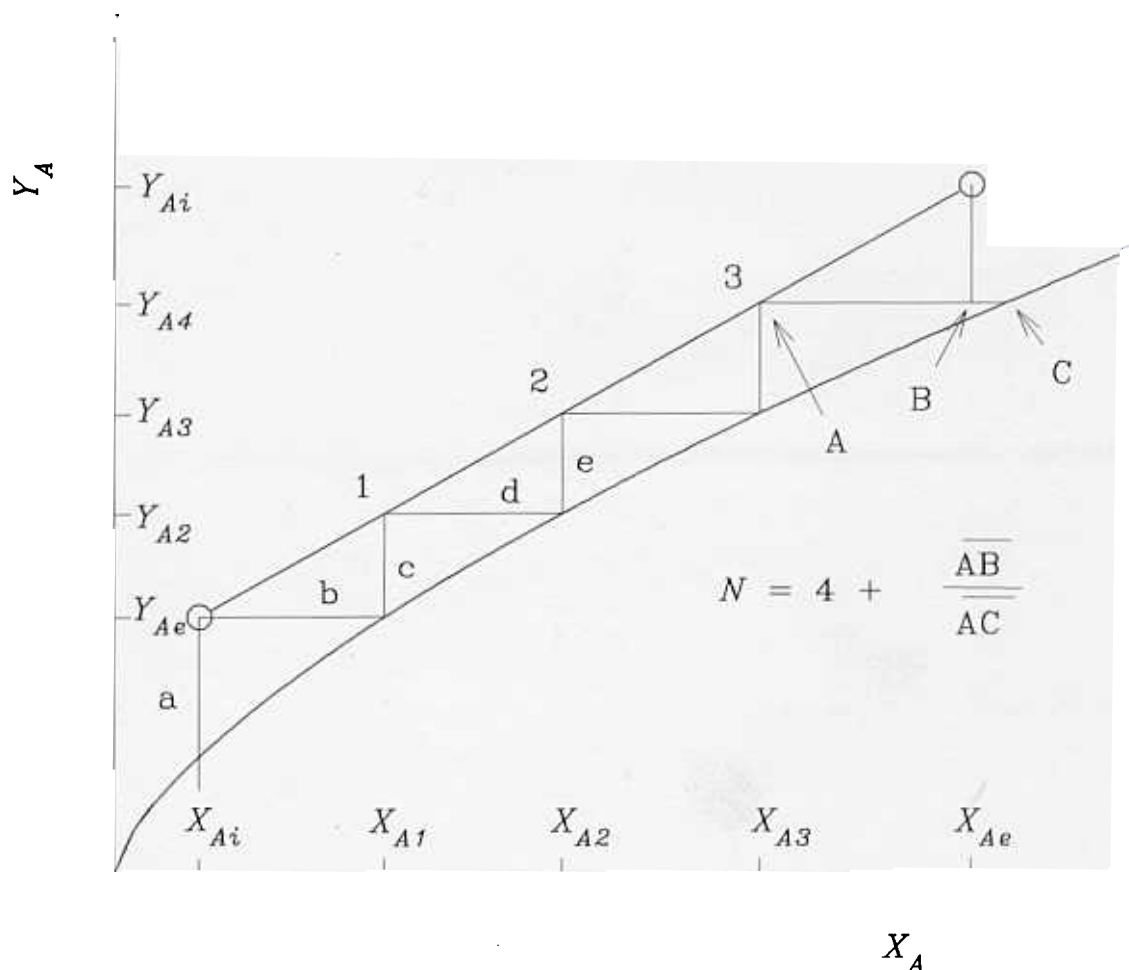
Obr. 15-2a. Způsob značení proudů a koncentrací v patrové koloně

Jestliže se obě fáze skládají z inertní složky B resp. C, které se neúčastní výměny hmoty a z absorbované složky A, pak vztah mezi složením plynu vstupujícího do k -tého stupně a kapalinou z k -tého stupně vystupující, tj. mezi proudy v průřezu kolony pod k -tým stupněm, je pro úsek mezi horním koncem a zvoleným průřezem absorberu dán bilancí látkového množství např. ve tvaru

$$\dot{n}_{A(k+1)} = \frac{\dot{n}_C}{\dot{n}_B} (X_{Ak} - X_{Ai}) + Y_{Ae} \quad (15-26)$$

Mezi koncentracemi proudů opouštějících k -tý rovnovážný stupeň je rovnovážný vztah

$$Y_{Ak} = \varphi_{Ak} X_{Ak} \quad (15-27)$$



Obr. 15-2b. Grafické určení počtu rovnovážných stupňů absorpční kolony

15.4.1.1 Nelineární rovnovážný vztah

Počet rovnovážných stupňů kolony lze určit numericky nebo graficky. Grafický výpočet se provádí v diagramu $Y_A(X_A)$ kreslením pravoúhlých kroků mezi rovnovážnou čarou plynoucí z rovnice (15-27) a pracovní přímkou podle rovnice (15-26) v rozmezí koncových koncentrací. Fyzikální smysl této konstrukce je znázorněn na obr. 15-2b: jedná se o postupné určení koncentrací proudů v koloně mezi jednotlivými stupni pomocí rovnovážného (kroky b, d na obrázku) a bilančního vztahu (kroky a, c, e). Tento postup se opakuje až do dosažení požadované koncentrace v proudech na protilehlém konci kolony. Celkový počet rovnovážných stupňů N nemusí být celé číslo. Grafický postup určení N je výhodný k ověření výsledku numerického výpočtu pro případy, kdy rovnováha je nelineární. Tento postup je použitelný i pro neizotermní absorpci s tím rozdílem, že rovnovážná čára se zakreslí s přihlédnutím k rozložení teplot v absorbéru tak, jak bylo popsáno v oddíle 15.3.

Grafické řešení lze provést i v diagramu $y_A(x_A)$. Pak pracovní čára obecně není lineární.

Při numerickém výpočtu se opakovaně uplatňují rovnice bilance (15-26) a rovnováhy (15- 27) až do dosažení požadované koncentrace v proudech na protilehlém konci kolony. Necelá část počtu rovnovážných stupňů se určí lineární interpolací koncové koncentrace, např. jako podíl $(X_{Ae} - X_{Ak})/(X_{A(k+1)} - X_{Ak})$.

15.4.1.2 Lineární rovnovážný vztah

Lze-li vztah mezi koncentracemi při fázové rovnováze aproximovat lineárním vztahem (15-7) pro celý absorbér, je výhodné pracovat s absorpčním faktorem ζ_Z ($Z = X, Y$)

$$\zeta_Y = \frac{\dot{n}_C}{\phi'_A \dot{n}_B}; \quad \zeta_X = \frac{1}{\zeta_Y} \quad (15-28)$$

a účinkem absorbéru η_Z

$$\eta_X = \frac{X_{Ae} - X_{Ai}}{X_{Ae}^* - X_{Ai}} \quad (15-29)$$

$$\eta_Y = \frac{Y_{Ai} - Y_{Ae}}{Y_{Ai} - Y_{Ae}^*} = \frac{\eta_X}{\zeta_X} \quad (15-30)$$

kde ϕ'_A je směrnice přímky aproximující rovnovážnou čáru v souřadnicích (X_A, Y_A) v rozmezí koncových koncentrací v absorbéru, X_{Ae}^* - koncentrace v odtékající kapalině rovnovážná s koncentrací ve vstupujícím plynu Y_{Ai} , Y_{Ae}^* - koncentrace ve vystupujícím plynu rovnovážná s koncentrací ve vstupující kapalině X_{Ai} . Při hodnotách $\zeta_Z > 1$ platí pro počet rovnovážných stupňů N [M1, str.47, rovn. (2.3-49)]

$$N = \frac{\ln \frac{1 - \eta_Z / \zeta_Z}{1 - \eta_Z}}{\ln \zeta_Z} \quad Z=X,Y \quad (15-31)$$

Při $\zeta_Z = 1$ se vztahy (15-31) redukují na

$$N = \frac{\eta_Z}{1 - \eta_Z} \quad Z=X,Y \quad (15-32)$$

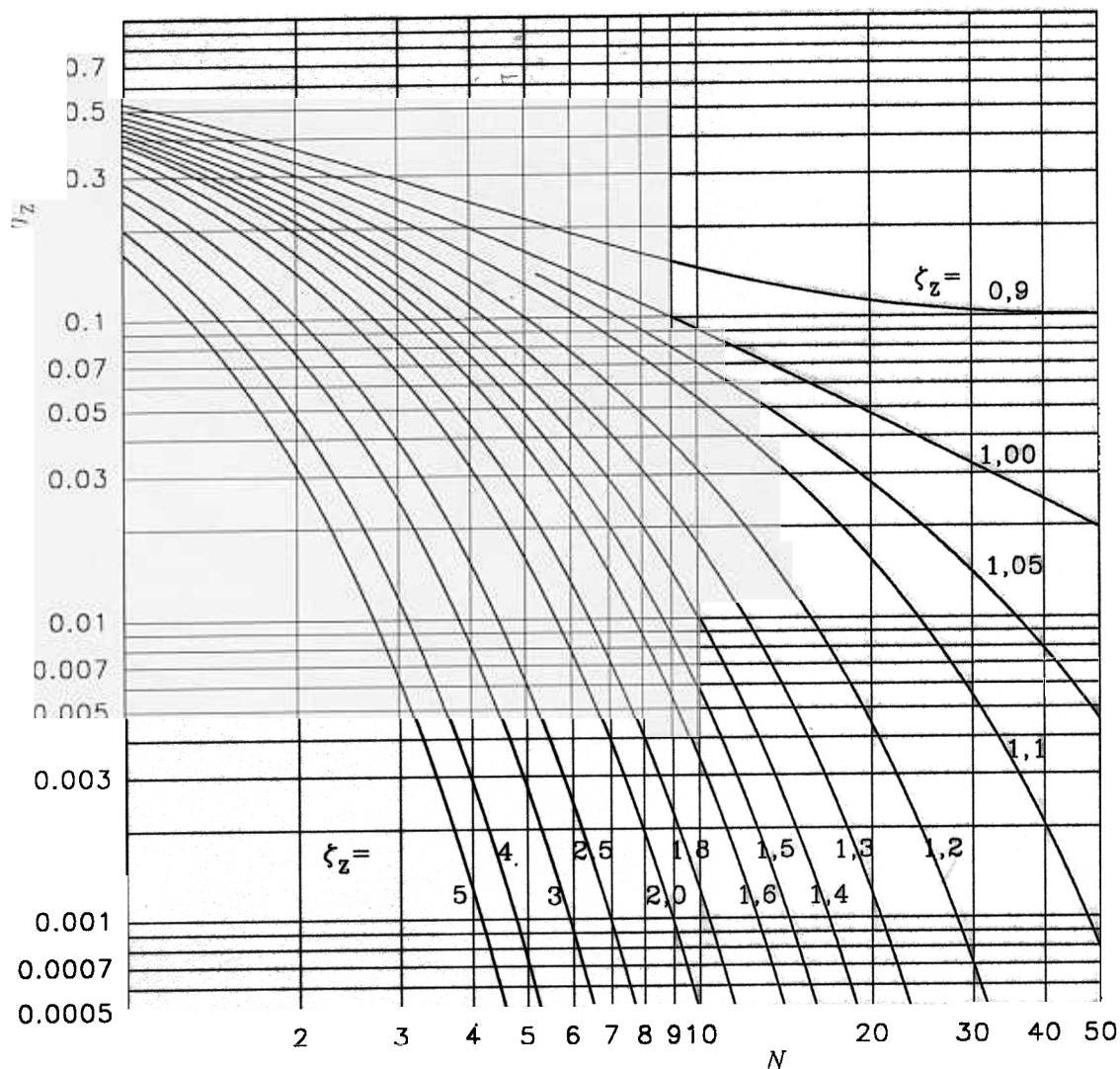
Při tzv. kontrolním výpočtu se počítá složení vystupujících proudů v již existujícím aparátu. Pak je výhodné místo rovnice (15-31) použít vzorce vyjadřujícího explicitně účinek aparátu [M1, str.46, rovn. (2.3-48)]

$$\eta_Z = \frac{1 - \zeta_Z^{-N}}{1 - \zeta_Z^{-(N+1)}} \quad Z=X,Y \quad (15-31a)$$

Když $\zeta_Z = 1$, rovnice se zjednoduší na

$$\eta_Z = \frac{N}{1+N} \quad Z=X,Y \quad (15-32a)$$

Pro urychlení výpočtu jsou vztahy (15-31) a (15-32) znázorněny na obr. 15-3



Obr. 15-3. Grafické znázornění závislosti vztahů (15-31) a (15-32)

Vztahy (15-28)-(15-32) lze k výpočtu použít s přijatelnou přesností i pro molární zlomky (x_A , y_A) pokud je koncentrace absorbované složky v obou fázích nízká, zhruba pod 3 molární %. Změny průtoků fází vyvolané absorpcí složky A lze potom zanedbat a pracovní čáru uvažovat jako přímku i v souřadnicích (x_A , y_A) se směrnici n_{li}/n_{gi} . V tom případě absorpční faktor počítáme ze vztahu

$$\zeta_y = \frac{\dot{n}_i}{\psi'_A \dot{n}_{gi}}, \quad \zeta_x = \frac{1}{\zeta_y} \quad (15-33)$$

přičemž ψ'_A je směrnice přímky aproximující rovnováhu v souřadnicích (x_A , y_A), rovnice (15-5). Při malých koncentracích obvykle platí Henryův zákon, absorpce je izotermní a $\psi'_A \approx \psi_A = H_A/p$.

K přibližnému řešení lze vzorce s molárními zlomky použít i při vyšších koncentracích, jestliže se do vztahů dosazuje hodnota absorpčního faktoru vypočtená jako geometrický střed hodnot pro oba konce absorberu.

15.4.2 Skutečná výška kolony

Skutečná výška kolony se určuje z počtu skutečných pater a vzdálenosti mezi nimi. Počet skutečných pater se určí z počtu rovnovážných stupňů pomocí účinnosti skutečných pater a vzdálenost mezi patry závisí na únosu kapek na nejbližší vyšší patro.

15.4.2.1 Celková účinnost kolony

Počet skutečných pater kolony N_s určíme ze vztahu

$$N_s = N/E_c \quad (15-34)$$

kde je E_c celková účinnost kolony.

K odhadu celkové účinnosti kolony s kloboučkovými patry lze použít empirického vztahu [M1, str.249, rovn.(11.2-4)]

$$E_c = 0,268 + 7,12 \cdot 10^{-2} \ln(\psi_A M_l v_l) + 4,68 \cdot 10^{-3} \ln^2(\psi_A M_l v_l) \quad (15-35)$$

kde M_l je molární hmotnost a v_l kinematická viskozita kapaliny. Vlastnosti se dosazují při střední teplotě a tlaku v koloně.

Pro síťová patra uvádí Bakowski [B2] pro celkovou účinnost vztah

$$E = \left(1 + 3,7 \cdot 10^4 \frac{\psi_A M_l}{h' \rho_l T} \right) \quad (15-36)$$

M_l - molární hmotnost kapalné fáze (kg mol^{-1}), ρ_l - hustota kapalné fáze (kg m^{-3}), h' - efektivní výška kapaliny na síťovém patře (m), T - termodynamická teplota (K).

15.4.2.2 Účinnost patra

Účinnost k -tého patra (Murphreeova účinnost) je definována vztahy

$$E_{yk} = \frac{y_{A(k+1)} - y_{Ak}}{y_{A(k+1)} - y_{Ak}^*} \quad (15-37)$$

$$E_{xk} = \frac{x_{Ak} - x_{A(k-1)}}{x_{Ak}^* - x_{A(k-1)}} \quad (15-38)$$

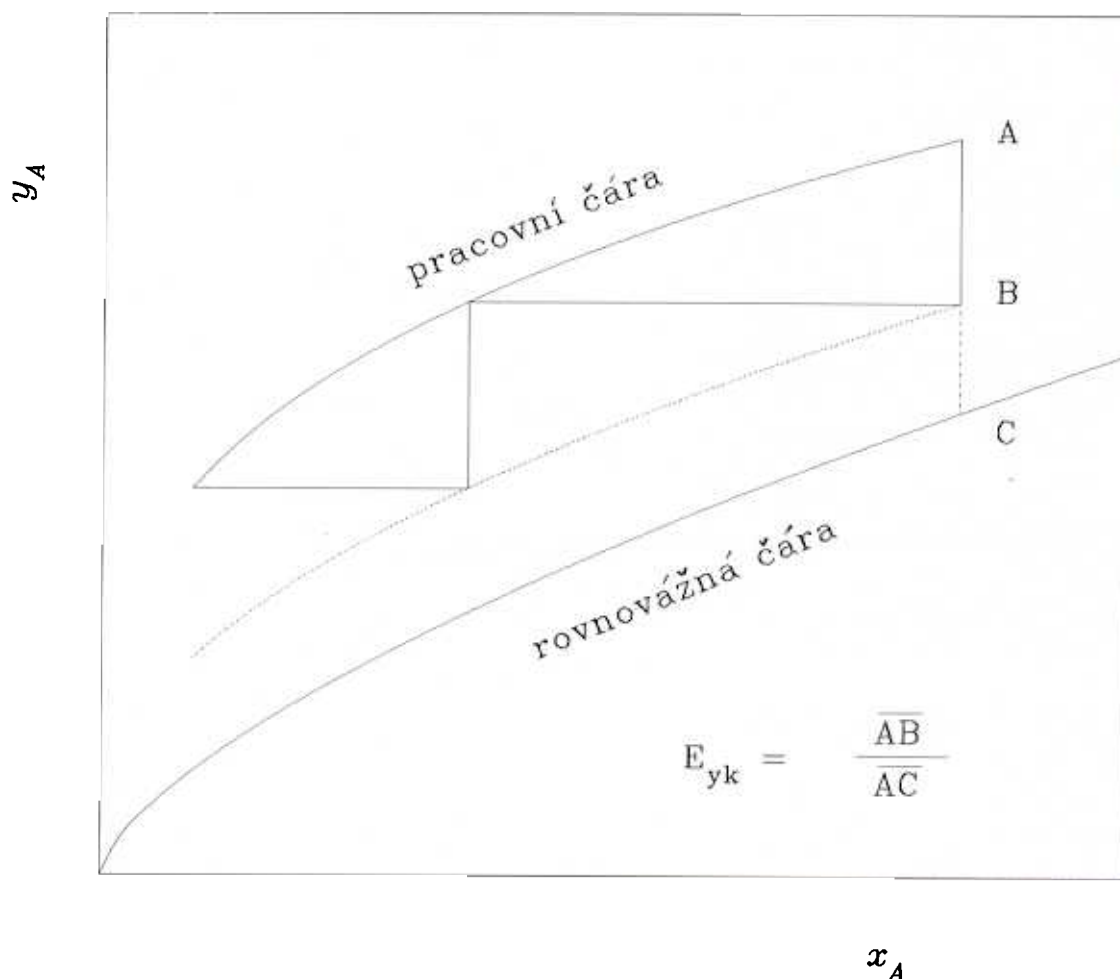
Pro kloboučková patra bylo navrženo Murphreeovu účinnost počítat ze vztahu

$$E_{yk} = 1 - e^{-K} \quad (15-39)$$

kde podle [W1]

$$K = \frac{h}{(23,5 + 55,5 \cdot 10^3 \psi_A M_l / \rho_l) \eta_l^{0,68} b^{0,33}} \quad (15-40)$$

M_l - molární hmotnost kapalné fáze (kg mol^{-1}), ρ_l - hustota kapalné fáze (kg m^{-3}), η_l - viskozita kapalné fáze ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$), h' - vertikální vzdálenost středu štěrbin kloboučku a výšky přepadu kapaliny na patře, b - šířka štěrbin kloboučku (m).



Obr. 15-4. Použití Murphreeovy účinnosti E_{yk} k stanovení skutečných pater kolony grafickou metodou

Na obr. 15-4 je znázorněno grafické určení počtu skutečných pater kolony, jestliže se hodnota Murphreeovy účinnosti významně mění od patra k patru. Čárkovaná čára je vedena tak, že rozděluje vertikální vzdálenost pracovní a rovnovážné čáry v poměru daném účinností E_{yk} . Například pro spodní patro kolony platí na obr. 15-4 vztah $AB/AC = E_{yN}$. Obdobný postup je pro účinnost E_{yk} . Při numerickém výpočtu se opakovaně uplatňují rovnice bilance, rovnováhy a vztah pro účinnost patra.

Je-li rovnice rovnováhy i bilance lineární a Murphreeova účinnost je pro všechna patra konstantní, platí mezi účinností celkovou E_c a Murphreeovou E_z [M1, str. 47, rovn. (2.3-56)] tento vztah:

$$E \cdot \ln \frac{1}{\zeta} = \ln \left[1 + E_z \left(\frac{1}{\zeta_z} - 1 \right) \right] \quad (15-41)$$

15.5 Absorbéry se spojitým stykem fází.

Celkovou mezifázovou plochu A mezi plynem a kapalinou ve vrstvě výplně lze vyjádřit pomocí výšky vrstvy výplně absorbéru h

$$A = a_s S h \quad (15-42)$$

kde a_s je hustota smočeného povrchu výplně, S - průřez vrstvy výplně. Výšku vrstvy výplně lze určit integrací některé z následujících diferenciálních rovnic rychlosti absorpce

$$d\dot{n}_A = d(\dot{n}_g y_A) = k_y a_s S (y_A - y_{Aw}) dh = K_y a_s S (y_A - y_A^*) dh \quad (15-43)$$

$$d\dot{n}_A = d(\dot{n}_l x_A) = k_x a_s S (x_{Aw} - x_A) dh = K_x a_s S (x_A^* - x_A) dh \quad (15-44)$$

kde indexem w jsou označeny koncentrace na fázovém rozhraní a platí mezi nimi rovnovážný vztah. Symboly k_z jsou označeny koeficienty přestupu hmoty pro složku A, K_z jsou koeficienty prostupu hmoty pro složku A. Vazba mezi nimi je vyjádřena rovnicemi

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{\psi_y}{k_x}; \quad \frac{1}{K_x} = \frac{1}{\psi_x k_y} + \frac{1}{k_x}; \quad \psi_y = \frac{y_{Aw} - y_A^*}{x_{Aw} - x_A}; \quad \psi_x = \frac{y_A - y_{Aw}}{x_A^* - x_{Aw}}; \quad (15-45)$$

Zde je ψ_y směrnice úsečky spojující body (x_{Aw}, y_{Aw}) a (x_A^*, y_A) , ψ_x směrnice úsečky spojující body (x_{Aw}, y_{Aw}) a (x_A, y_A^*) , viz lit. [M1, str. 284, obr. B4.1]. Je-li v rozmezí koncentrací v absorbéru rovnovážná čára přímka, platí

$$\psi_y = \psi_x = \psi_A'; \quad K_x = \psi_A' K_y \quad (15-45a)$$

Z rovnic (15-43), (15-44), (15-14) a (15-15) dostáváme integrací

$$h = \frac{\dot{n}_B}{a_s S} \int_{y_{Aw}}^{y_A} \frac{dy_A}{k_y (1 - y_A)^2 (y_A - y_{Aw})} = \frac{\dot{n}_B}{a_s S} \int_{y_{Aw}}^{y_A} \frac{dy_A}{K_y (1 - y_A)^2 (y_A - y_A^*)} \quad (15-46)$$

$$h = \frac{\dot{n}_C}{a_s S} \int_{x_{Aw}}^{x_A} \frac{dx_A}{k_x (1 - x_A)^2 (x_{Aw} - x_A)} = \frac{\dot{n}_C}{a_s S} \int_{x_{Aw}}^{x_A} \frac{dx_A}{K_x (1 - x_A)^2 (x_A^* - x_A)} \quad (15-47)$$

Při výpočtu obvykle používáme koncentrací té fáze, v níž převládá odpor proti absorpci. To platí i pro vztahy uváděné dále.

Obsahuje-li plyn v kapalině nerozpustnou složku B a kapalně rozpouštědlo C se v absorbéru významně neodpařuje, jsou vztahy (15-46) a (15-47) obecné a při integraci mohou být vzaty v úvahu změny průtoku fází, teploty, koeficientů přestupu či prostupu hmoty a směrnice rovnovážné čáry podél zařízení. Je-li rovnováha lineární je výhodné používat vztahy obsahující koeficienty prostupu hmoty. Tak se eliminuje nutnost počítat koncentrace složky na fázovém rozhraní. Dále jsou uvedeny vztahy pro výpočet výšky vrstvy výplně v některých jednodušších situacích.

15.5.1 Absorpce s malou koncentrací (pod 3 % molární) absorbované složky v obou fázích

Při malých koncentracích lze ve vztazích (15-14), (15-15), (15-46) a (15-47) zanedbat hodnoty x_A a y_A vůči jedničce (to jest zanedbat změny průtoků fází podél absorbéru) a rovněž lze zanedbat vliv změn koncentrace složky A podél zařízení na koeficienty přestupu hmoty.

15.5.1.1 Nelineární rovnovážný vztah

Není-li rovnovážný vztah lineární, mění se podél absorberu hodnoty koeficientů prostupu hmoty v důsledku změn lokální směrnice tečny k rovnovážné čáře. Výška vrstvy výplně se pak počítá ze vztahů využívajících koeficientů přestupu hmoty, obvykle psané ve tvaru

$$h = h_x n_x = h_y n_y \quad (15-48)$$

Hodnoty výšky převodové jednotky h_z a příslušného počtu převodových jednotek n_z se počítají takto

$$h_x = \frac{\dot{n}_{li}}{k_x a_s S} \quad h_y = \frac{\dot{n}_{gi}}{k_y a_s S} \quad (15-49)$$

$$n_x = \int_{x_{Ai}}^{x_{Ae}} \frac{dx_A}{x_{Aw} - x_A}; \quad n_y = \int_{y_{Ae}}^{y_{Ai}} \frac{dy_A}{y_A - y_{Aw}} \quad (15-50)$$

Vztah mezi koncentracemi na fázovém rozhraní (označenými indexem w) a středními koncentracemi složky A uvnitř fází, nutný pro numerické nebo grafické stanovení hodnot integrálů (15-50) získáme z rovnic (15-43) a (15-44)

$$\frac{y_A - y_{Aw}}{x_A - x_{Aw}} = -\frac{k_x}{k_y} \quad (15-51)$$

Vztah mezi koncentracemi x_{Aw} a y_{Aw} je rovnovážný. Vztah mezi koncentracemi x_A a y_A složky A uvnitř fází je dán bilancí látkového množství, kterou lze v tomto případě považovat za lineární a pro protiproud má tvar

$$y_A = \frac{\dot{n}_{li}}{\dot{n}_{gi}}(x_A - x_{Ai}) + y_{Ae} = \frac{\dot{n}_{li}}{\dot{n}_{gi}}(x_{Ae} - x_A) + y_{Ai} \quad (15-52)$$

Při neizotermní absorpci lze v prvním přiblížení počítat pouze s teplotní závislostí rovnovážných dat a teplotní závislost koeficientů přestupu hmoty zanedbat.

15.5.1.2 Lineární rovnovážný vztah

Lze-li rovnováhu přibližně popsat lineárním vztahem (15-5) pro celý absorber (přímka nemusí procházet počátkem), je výhodné pracovat s koeficienty prostupu hmoty, do jejichž definice (15-45) se podle rovnice (15-45a) dosadí směrnice linearizované části rovnovážné čáry ψ_A' . Výška vrstvy výplně se pak počítá ze vztahů

$$h = H_x N_x = H_y N_y \quad (15-53)$$

Hodnoty výšky převodové jednotky prostupu hmoty H_z a příslušného počtu převodových jednotek prostupu hmoty N_z se počítají takto

$$H_x = \frac{\dot{n}_{li}}{K_x a_s S} \quad H_y = \frac{\dot{n}_{gi}}{K_y a_s S} \quad (15-54)$$

$$N_x = \frac{x_{Ae} - x_{Ai}}{(x_A^* - x_A)_{ls}}; \quad N_y = \frac{y_{Ai} - y_{Ae}}{(y_A - y_A^*)_{ls}} \quad (15-55)$$

kde $(x_A^* - x_A)_{ls}$ a $(y_A - y_A^*)_{ls}$ jsou logaritmické střední rozdíly koncentrací na obou koncích absorberu. Vztah vyhovuje pro souprouté i protiproudé uspořádání.

Jiný způsob určení počtu převodových jednotek využívá absorpčního faktoru ζ_z

$$\zeta_y = \frac{\dot{n}_{li}}{\psi_A' \dot{n}_{gi}}; \quad \zeta_x = \frac{1}{\zeta_y} \quad (15-56)$$

a účinku absorbéru η_z

$$\eta_x = \frac{x_{Ae} - x_{Ai}}{x_{Ae}^* - x_{Ai}} = \frac{\eta_y}{\zeta_x} \quad (15-57)$$

$$\eta_y = \frac{y_{Ai} - y_{Ae}}{y_{Ai} - y_{Ae}^*} = \frac{\eta_x}{\zeta_y} \quad (15-58)$$

kde ψ_A' je směrnice přímky aproximující rovnovážnou čáru v souřadnicích (x_A, y_A) , x_{Ae}^* - koncentrace v odtékající kapalině rovnovážná s koncentrací ve vstupujícím plynu y_{Ai} , y_{Ae}^* - koncentrace ve vystupujícím plynu rovnovážná s koncentrací ve vstupující kapalině x_{Ai} . Pro protiproudé uspořádání a pro $\zeta_z > 1$ platí

$$N_z = \frac{\zeta_z}{\zeta_z - 1} \ln \frac{1 - \eta_z/\zeta_z}{1 - \eta_z} \quad z = x, y \quad (15-59)$$

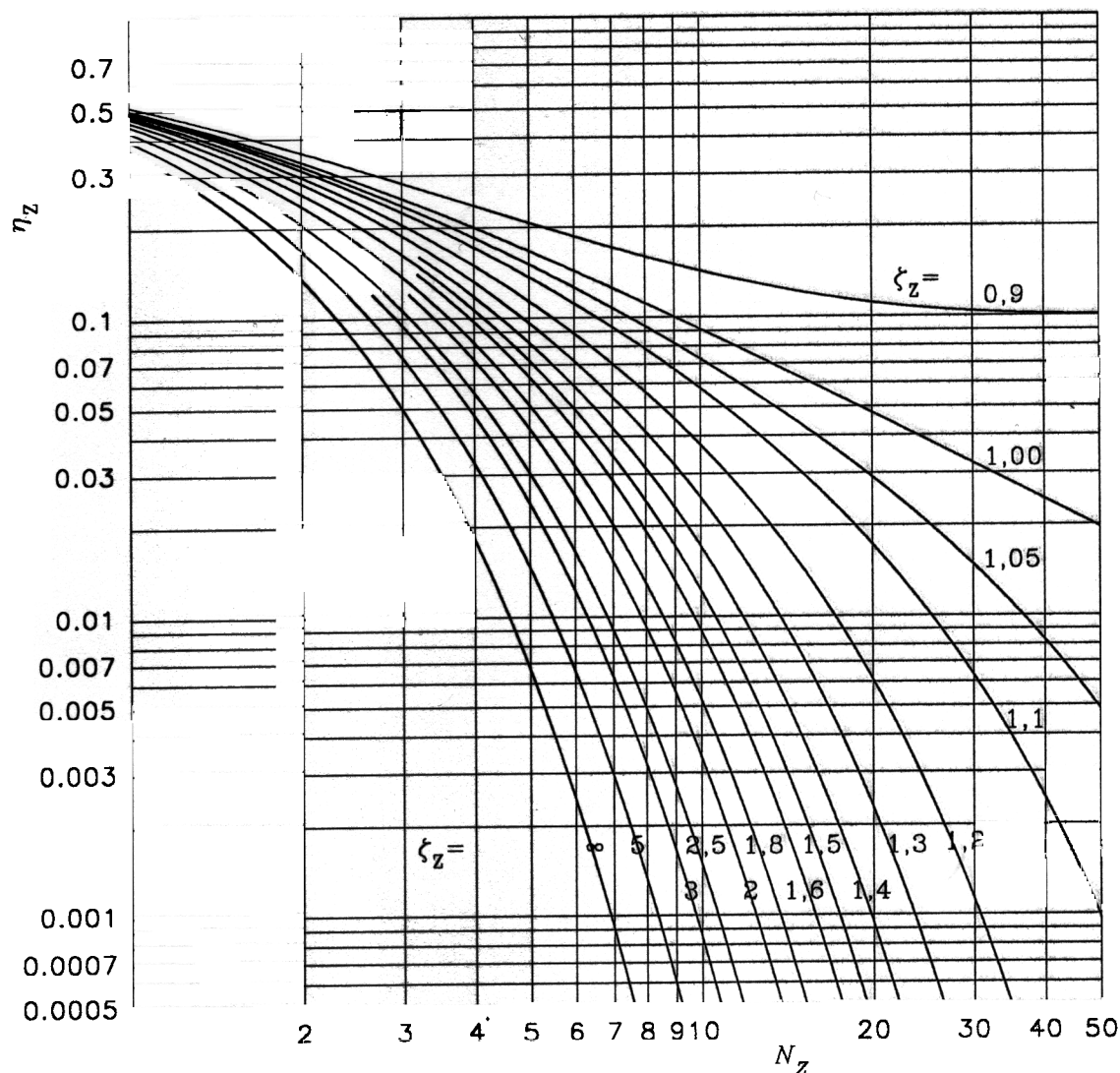
Při $\zeta_z = 1$ se rovnice zjednoduší na

$$N_z = \frac{\eta_z}{1 - \eta_z} \quad z = x, y \quad (15-60)$$

Na rozdíl od rovnice (15-55) jsou tyto vztahy vhodné i pro kontrolní výpočet týkající se již existujícího zařízení. Počítá se koncentrace složky v některém z vystupujících proudů z hodnoty účinku

$$\eta_z = \frac{1 - \exp\left[-\left(1 - \frac{1}{\zeta_z}\right)N_z\right]}{1 - \frac{1}{\zeta_z} \exp\left[-\left(1 - \frac{1}{\zeta_z}\right)N_z\right]}, \quad z = x, y \quad (15-61)$$

plynucího z rovnice (15-59). Pro urychlení výpočtu jsou vztahy (15-59) a (15-61) znázorněny na obr. 15-5.



Obr. 15-5. Grafické znázornění vztahů (15-59) a (15-61)

Obdobné vztahy pro souprouté uspořádání jsou

$$N_z = -\frac{\zeta_z}{\zeta_z + 1} \ln \left[1 - \eta_z \left(\frac{\zeta_z + 1}{\zeta_z} \right) \right] \quad z = x, y \quad (15-62)$$

$$\eta_z = \frac{\zeta_z}{\zeta_z + 1} \left[1 - \exp \left(-N_z \frac{\zeta_z + 1}{\zeta_z} \right) \right], \quad z = x, y \quad (15-63)$$

kde účinek absorbéru a absorpční faktor se definují jako při protiproudu.

Ve vztazích oddílu 15-5.1 lze s nevelkou chybou nahradit molární zlomky relativními zlomky a koeficienty prostupu a přestupu hmoty vztažené na molární zlomky se při použití relativních zlomků rovněž nezmění.

15.5.2 Absorpce s velkou koncentrací absorbované složky

Korektní postup výpočtu výšky vrstvy výplně vyžaduje numerickou integraci některého ze vztahů (15-46) či (15-47). Závislost koeficientů přestupu hmoty na koncentraci je přitom přibližně vyjádřena vztahy (viz např. lit. [M2, str. 623, rovn. (27.2.3-10)])

$$k_z = k_z^0 \left(1 - \frac{z_A + z_{Aw}}{2} \right); \quad z = x, y \quad (15-64)$$

kde k_z^0 jsou koeficienty přestupu hmoty pro nízké koncentrace složky A. Dále jsou uvedeny aproximativní výsledky této integrace.

15.5.2.1 Nelineární rovnovážný vztah

Výšku vrstvy výplně počítáme ze vztahů (15-48), přičemž použijeme střední hodnoty výšky převodové jednotky « h_z^0 », zprůměrněné přes celý absorbér tak, že do vztahu (15-49) dosadíme aritmetický střed hodnot $\dot{n}_i$, k_x^0 nebo $\dot{n}_g$ a k_y^0 na obou koncích absorbéru. Počet převodových jednotek n_z zjistíme z přibližných vztahů [M2, str. 623, rovn. (27.2.3-12)]

$$n_x = \int_{X_{Ai}}^{X_{Aw}} \frac{dX_A}{X_{Aw} - X_A} + \frac{1}{2} \ln \frac{1 - X_{Ai}}{1 - X_{Aw}} \quad (15-65)$$

$$n_y = \int_{Y_{Aw}}^{Y_{Ai}} \frac{dY_A}{Y_A - Y_{Aw}} + \frac{1}{2} \ln \frac{1 - Y_{Aw}}{1 - Y_{Ai}} \quad (15-66)$$

Vztah mezi koncentracemi na fázovém rozhraní (označenými indexem w) a středními koncentracemi složky A uvnitř fází, nutný pro numerické nebo grafické stanovení hodnot integrálů (15-65) nebo (15-66) získáme z přibližného vztahu [M2, str. 623, rovn. (27.2.3-13)]

$$\frac{Y_A - Y_{Aw}}{X_A - X_{Aw}} = - \frac{k_x^0}{k_y^0} \frac{2 + Y_A + Y_{Aw}}{2 + X_A + X_{Aw}} \quad (15-67)$$

iteračně s využitím rovnice rovnováhy (15-1) na fázovém rozhraní.

Při neizotermní absorpci lze v prvním přiblížení počítat pouze s teplotní závislostí rovnovážných dat a teplotní závislost koeficientů přestupu hmoty zanedbat.

15.5.2.2 Lineární rovnovážný vztah(15-1)

Výšku vrstvy výplně počítáme ze vztahů (15-53), přičemž použijeme střední hodnoty výšky převodové jednotky « H_z » vypočteme ze vztahu (15-54) jako aritmetický střed hodnot H_z na obou koncích absorbéru. Počet převodových jednotek N_z vyjádřený ze vztahů obsahujících relativní molární zlomky

$$N_x = \int_{X_{Ai}}^{X_{Aw}} \frac{1 + X_A^*}{X_A^* - X_A} dX_A \quad (15-68)$$

$$N_x = \int_{X_{Ai}}^{X_{Aw}} \frac{1 + X_A^*}{X_A^* - X_A} dX_A \quad (15-69)$$

má analytické řešení integrálů

$$N_x = \frac{a}{2A} \ln \frac{F_{Aw}}{F_{Ai}} + \frac{E - aB/(2A)}{G} \ln \frac{J_{Aw}}{J_{Ai}} \quad (15-68a)$$

$$a = \dot{n}_C / \dot{n}_B; \quad b = Y_{Ae} - aX_{Ai}; \quad A = a(1 - \psi_A) / \psi_A; \quad B = [a - b(1 - \psi_A)] / \psi_A - 1; \quad C = b / \psi_A; \\ E = b + 1; \quad F_A = AX_A^2 + BX_A + C; \quad G = \sqrt{B^2 - 4AC}; \quad J_A = (2AX_A + B - G) / (2AX_A + B + G)$$

a

$$N = \frac{a}{2A\psi_A} \ln \frac{F_{Ai}}{F_{Ai}} + \frac{E - aB / (2A\psi_A)}{G} \ln \frac{J_{Ai}}{J_{Ai}} \quad (15-68b)$$

$$a = \dot{n}_B / \dot{n}_C; \quad b = aY_{Ae} - X_{Ai}; \quad A = a(1 - \psi_A) / \psi_A; \quad B = [a + b(\psi_A - 1)] / \psi_A - a; \quad C = b; \\ E = (1 - b) / \psi_A; \quad F_A = AY_A^2 + BY_A + C; \quad G = \sqrt{B^2 - 4AC}; \quad J_A = (2AY_A + B - G) / (2AY_A + B + G)$$

15.5.3 Výška ekvivalentní rovnovážnému stupni

Jedna z metod určení výšky výplňové kolony užívá výšky ekvivalentní rovnovážnému stupni. Je to především v návaznosti na simulační programy, které standardně charakterizují velikost zařízení počtem rovnovážných stupňů.

Výpočet výšky vrstvy výplně h plněného absorbéru pomocí počtu rovnovážných stupňů N vychází ze vztahu

$$h = \sum_{k=1}^N h_{ek} \quad (15-70)$$

kde h_{ek} je výška výplně ekvivalentní k -tému rovnovážnému stupni. Hodnoty h_{ek} se odhadují ze vztahu odvozeného ze vzorců pro konstantní hodnoty absorpčního faktoru, hustoty mezifázového povrchu a koeficientů přestupu hmoty v obou fázích

$$h_{ek} = H_{zk} \frac{\zeta_{zk} \ln \zeta_{zk}}{\zeta_{zk} - 1}; \quad z = x, y \quad (15-71)$$

Hodnoty výšky převodové jednotky prostupu hmoty H_{zk} a absorpčního faktoru ζ_{zk} se vypočtou pomocí vztahů uvedených v oddíle 15.5.1.2 pro průtoky, složení fází a teploty v jednotlivých rovnovážných stupních. Tyto údaje jsou standardním výstupem výpočtů prováděných simulačními programy.

15.5.4 Průřez absorbéru

Z objemového toku plynu absorbérem se dělením jeho rychlostí zprůměrněnou podle průřezu vypočte průřez absorbéru. S rostoucí rychlostí plynu proto klesá potřebný průřez absorbéru. Při protiproudu omezuje rychlost shora zahlcení a při souproudu nepřipustně velký únos kapek. Rychlost plynu a tedy i průřez absorbéru se volí tak, aby náklady na zařízení a provoz byly minimální.

15.5.5 Vztahy pro výpočet koeficientů přestupu hmoty

Koeficienty přestupu hmoty při absorpci jsou empirické veličiny a obvykle se vyjadřují pomocí kritériálních vztahů.

15.5.5.1 Kolona se smáčenou stěnou

Pro turbulentní proudění plynné fáze, tj. pro hodnoty $Re_g > 2300$ se udává pro koeficient přestupu hmoty k_y vztah [G1]

$$Sh_g = 0,023 Re_g^{0,83} Sc_g^{0,44} \quad (15-72)$$

Použitá kritéria jsou definována těmito vztahy

$$c_k = \frac{k_y d}{c_g D_{AB}} = \frac{k_{og} d}{D_{AB}} \quad (15-73)$$

$$Re_g = \frac{v_g \rho_g d}{\eta_g} \quad (15-74)$$

$$Sc_g = \frac{\eta_g}{\rho_g D_{AB}} \quad (15-75)$$

kde c_g je molární hustota plynné fáze, d je průměr trubky, D_{AB} - difuzivita složky A v plynu B, η_g - viskozita plynu, ρ_g - hustota plynu, v_g - postupná rychlost plynu v trubce

$$\frac{4\dot{V}_g}{\pi d^2} \quad (15-76)$$

$\dot{V}_g$ je objemový průtok plynu trubkou.

Pro koeficient přestupu hmoty v kapalně fázi k_x Ramm [R1, str. 364] uvádí pro $Re_l < 300$ vztah

$$Sh_l = 0,888 Re_l^{0,45} Sc_l^{1/2} Ga_l^{-1/6} \quad (15-77)$$

pro $300 < Re_l < 1600$ vztah

$$Sh_l = 1,21 \cdot 10^6 \cdot 0,909^p Re_l^{\left(\frac{p}{3} - 2,18\right)} Sc_l^{1/2} Ga_l^{-p/3} \quad (15-78)$$

přičemž

$$p = \frac{3,2 - \log Re_l}{1,47} \quad (15-79)$$

a pro $Re_l > 1600$ vztah

$$Sh_l = 7,7 \cdot 10^{-5} Re_l Sc_l^{1/2} \quad (15-80)$$

Uvedená kritéria jsou definována vztahy

$$Sh_l = \frac{k_x \eta_l^{2/3}}{c_l D_{AC} \rho_l^{2/3} g^{1/3}} = \frac{k_{cl} \eta_l^{2/3}}{D_{AC} \rho_l^{2/3} g^{1/3}} \quad (15-81)$$

$$Re_l = \frac{4\dot{m}_l}{\eta_l \pi d} \quad (15-82)$$

$$Sc_l = \frac{\eta_l}{\rho_l D_{AC}} \quad (15-83)$$

$$Ga_l = \frac{g \rho_l^2 l^3}{\eta_l^2} \quad (15-84)$$

kde c_l je molární hustota kapalné fáze, l je délka smočené části trubky, D_{AC} - difuzivita složky A v kapalině C, $\dot{m}_l$ - hmotnostní průtok kapaliny stékající po stěně trubky.

15.5.5.2 Kolona s vrstvou výplně

Hodnoty koeficientů přestupu hmoty a velikost smočené plochy výplně jsou závislé na tvaru a materiálu použité výplně. Pro Raschigovy kroužky, Berlova sedla a kulové částice zhotovené z různých materiálů uvádí Onda [O2] následující korelace:

Pro koeficient přestupu hmoty v plynné fázi k_y je to vztah

$$\text{Sh}_g = k \text{Re}_g^{0,7} \text{Sc}_g^{1/3} (a_t d_p)^{-2} \quad (15-85)$$

kde d_p je charakteristický rozměr částice výplně. Pro $d_p < 0,015$ m je $k = 2$ a pro $d_p \geq 0,015$ m je $k = 5,23$. Kriteria uvedená ve vztahu (15-85) jsou definována takto

$$\text{Sh}_g = \frac{k_y}{c_g a_t D_{AB}} = \frac{k_{cg}}{a_t D_{AB}} \quad (15-86)$$

$$\text{Re}_g = \frac{\dot{m}_g}{a_t} \quad (15-87)$$

kde $\dot{m}_g$ a je hmotnostní průtok plynu a hodnoty veličin d_p a a_t jsou uvedeny v tab. 15-2. Pro výpočet Schmidtova kritéria použijeme vztah (15-75). Pro koeficient přestupu hmoty v kapalné fázi k_x pro uvedené typy výplní udává vztah

$$k_x \left(\frac{\rho_l}{\eta_l g} \right)^{1/3} = k_{cl} \left(\frac{\rho_l}{\eta_l g} \right)^{1/3} = 0,0051 (\text{Re}_l')^{2/3} \text{Sc}_l^{-1/2} (a_t d_p)^{0,4} \quad (15-88)$$

Reynoldsovo kritérium Re_l' je definováno vztahem

$$\text{Re}_l' = \frac{\dot{m}_l}{a_s S \eta_l} \quad (15-89)$$

kde a_s je hustota smočeného povrchu výplně, pro kterou uvádí vztah

$$a_s / a_t = 1 - \exp \left[-1,45 (\sigma_c / \sigma)^{0,75} \text{Re}_l'^{0,1} \text{Fr}_l'^{-0,05} \text{We}_l'^{0,2} \right] \quad (15-90)$$

Kriteria v něm obsažená jsou definována takto

$$\text{Re}_l' = \frac{\dot{m}_l}{a_t S \eta_l} \quad (15-91)$$

$$\text{We}_l' = \frac{\dot{m}_l^2}{a_t S^2 \rho_l \sigma} \quad (15-92)$$

$$\text{Fr}_l' = \frac{\dot{m}_l^2 a_t}{S^2 \rho_l^2 g} \quad (15-93)$$

kde σ je povrchové napětí kapaliny, σ_c - maximální hodnota povrchového napětí kapaliny, při které ještě dochází k rozprostírání kapaliny po výplni. Hodnoty σ_c pro vodné roztoky a různé materiály výplní jsou uvedeny v tab. 15-3.

Pro novější typy výplní jako kroužky Pall a Hiflow uvádí Billet a Schultes [B1] regresní vztahy:

Pro koeficient přestupu hmoty v plynné fázi k_g

$$Sh_g = C_g Re_g^{3/4} Sc_g^{1/3} [\varepsilon(\varepsilon - z_l)]^{-1/2} \quad (15-94)$$

kde ε je mezerovitost výplně a z_l - zadrž kapaliny na výplni, pro kterou udává vztah

$$z_l = \left(12 \frac{\dot{m}_l a_l^2 \eta_l}{g S \rho_l^2} \right)^{1/3} \quad (15-95)$$

Vztahy pro výpočet kritérií jsou: pro Sherwoodovo vztah (15-86), pro Reynoldsovo vztah (15-87) a pro Schmidtovo vztah (15-75). Hodnoty konstant C_g pro různé druhy a materiály výplní jsou uvedeny v tab. 15-2.

Pro koeficient přestupu hmoty v kapalně fázi k_x

$$\frac{k_x}{c_l} \left(\frac{\rho_l}{\eta_l g} \right)^{1/3} = k_{cl} \left(\frac{\rho_l}{\eta_l g} \right)^{1/3} = C_l Re^{1/3} Sc_l^{-1/2} \left(\frac{a_l}{\varepsilon} \right)^{1/2} \left(\frac{\eta_l^2}{g \rho_l^2} \right)^{1/6} \quad (15-96)$$

a pro hustotu smočeného povrchu těchto výplní a_s uvádí vztah

$$a_s/a_l = 3\varepsilon^{1/2} Re_l^{-0,2} Fr_l^{-0,45} We_l^{0,75} \quad (15-97)$$

Vztahy pro výpočet kritérií jsou: pro Reynoldsovo vztah (15-91), pro Schmidtovo vztah (15-83), pro Weberovo vztah (15-92) a pro Froudovo vztah (15-93). Hodnoty konstant C_l pro různé druhy a materiály výplní jsou uvedeny v tab. 15-2.

15.5.6 Vliv axiální disperze

Dosud uvedené vztahy pro výpočet výšky vrstvy výplně plněných kolon byly odvozeny za předpokladu pístového toku fází zařízením. Skutečné proudění fází se může od tohoto ideálního případu lišit zvláště při velmi malých nebo naopak velkých hodnotách poměru toků kapaliny a plynu, při kterých dochází ku strhávání kapaliny plynem nebo naopak plynu kapalinou. To má za následek zvýšení axiálního promíchávání fáze v koloně a snížení hybné síly absorpce. Pro dosažení stejného rozdílu mezi vstupní a výstupní koncentrací složky A v axiálně promíchávané fázi je potom třeba většího počtu převodových jednotek a tím i vyšší vrstvy výplně než při pístovém toku fází zařízením. Při extrémních hodnotách poměrů toku kapaliny a plynu je často axiální disperze významná pouze ve fázi s nižším průtokem a ve fázi s vysokým průtokem lze obvykle zanedbat změnu koncentrace složky A podél absorbéru.

Jestliže je třeba navrhnout výšku vrstvy výplně se zahrnutím vlivu axiální disperze, vychází se ze vztahu mezi počtem převodových jednotek pro pístový profil $N_z = h/H_z$ a pro axiální disperzi $N_{zr} = h_r/H_z$. Hodnota výšky převodové jednotky H_z v těchto vztazích je vypočtena z měření nezkreslených zpětným promícháváním a h_r je výška vrstvy výplně při axiálním míchání. Vztah obsahuje Pecletovo kritérium, které charakterizuje zpětné promíchávání. Publikované hodnoty Pecletova kritéria pro disperzi ve vrstvě výplně jsou založeny na definici obsahující charakteristický délkový rozměr částice výplně d_p

$$Pe_{zp} = \frac{v_z d_p}{D_z} \quad (15-98)$$

kde v_z je mimovrstvová rychlost tekutiny, tj. rychlost vztažená na celkový průřez kolony, D_z je koeficient axiální disperze a Pe_{zp} je Pecletovo kritérium charakterizující axiální disperzi ve fázi z vztažené na velikost částice výplně d_p . Pro praktický výpočet je vhodné do definice zavést výšku vrstvy h_r

$$Pe_{zr} = \frac{v_z h_r}{D_z} = \frac{v_z d_p}{D_z} \frac{h}{d_p} \frac{h_r}{h} = Pe_{zp} \frac{h}{d_p} \frac{N_{zr}}{N_z} \quad (15-99)$$

Je-li axiální disperze významná pouze v jedné fázi a ve fázi druhé je koncentrace absorbované složky z hlediska hybné síly konstantní, je vztah mezi počtem převodových jednotek pro pístový tok N_z a pro tok s axiální disperzí N_{zr} dán ve tvaru vyjadřujícím změnu koncentrace v absorbéru (předpokládá se lineární rovnovážný vztah a $\zeta_z \rightarrow \infty$)

$$\begin{aligned} 1 - \eta_z &= \frac{z_{Ae} - z_{Ae}^*}{z_{Ai} - z_{Ai}^*} = \exp(-N_z) - \\ &= \frac{4b \exp(Pe_{zr}/2)}{(1+b)^2 \exp(b Pe_{zr}/2) - (1-b)^2 \exp(-b Pe_{zr}/2)}; \quad z=x,y \end{aligned} \quad (15-100)$$

kde

$$h = \sqrt{1 + 4 \frac{N_{zr}}{Pe_{zp}}} = \sqrt{1 + 4 \frac{N_z}{Pe_{zp} h/d_p}} \quad (15-101)$$

Tato rovnice tedy vyjadřuje změnu koncentrace průchodem vrstvou výplně v závislosti na její výšce jednak bez a jednak se zahrnutím vlivu axiální disperze. V daném absorbéru sníží axiální disperze jeho dělicí schopnost. Výška vrstvy výplně kolony s uvažováním axiální disperze h_r je potom větší než její výška pro pístový tok h a počítá se ze vztahu

$$h_r = H_z N_{zr} = h \left(\frac{N_{zr}}{N_z} \right); \quad z=x,y \quad (15-102)$$

Pro urychlení výpočtu je vztah (15-100) znázorněn na obr. 15-6 ve tvaru závislosti poměru počtu převodových jednotek pro pístový tok a tok s axiální disperzí N_z/N_{zr} ($= h/h_r$) na N_z a komplexu $(Pe_{zp} \cdot h/d_p)$ obsahujícím výšku vrstvy h vypočtenou pro pístový tok.

Hodnoty Pecletova kritéria Pe_{zp} jsou empirické veličiny a obvykle se vyjadřují pomocí kritériálních vztahů závislých mimo jiné na velikosti a tvaru výplně. Pro keramické Raschigovy kroužky a Berlova sedla velikosti menší než 0,015 m uvádí Sater a Levenspiel [S1] tyto regresní vztahy:

Pro Pecletovo kritérium v plynu Pe_{yp}

$$Pe_{yp} = 0,0585 Re_g^{-0,668} (a_t d_p)^{2,58} 10^{-0,00259 Re_t} \quad (15-103)$$

a pro Pecletovo kritérium v kapalině Pe_{xp}

$$Pe_{xp} = 19,4 Re_t^{0,747} Ga_t^{-0,693} (a_t d_p)^{1,968} \quad (15-104)$$

$$\text{kde } Re_g = \frac{\dot{m}_g d_p}{S \eta_g} \quad (15-105)$$

$$= \frac{\dot{m}_l d_p}{S \eta_l} \quad (15-106)$$

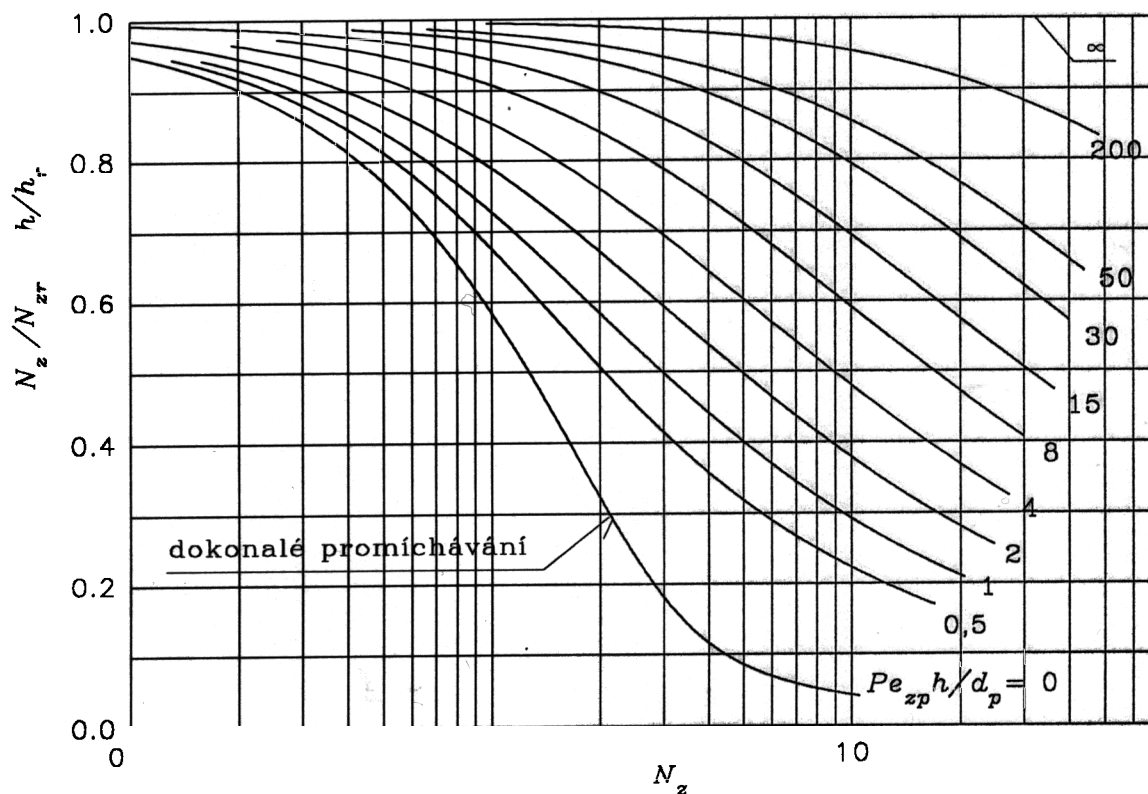
$$Ga_t = \frac{g \rho_l^2 d_p^3}{\eta_l^2} \quad (15-107)$$

Pro odhad hodnot Pecletova kritéria pro keramické Raschigovy kroužky a Berlova sedla větších rozměrů (25 a 50 mm) doporučuje Dunn a spol. [D2] vztahy

$$Pe_{yp} = (a_1 - a_2 \dot{m}_g / S) \cdot 10^{-a_3 \dot{m}_l / S} \quad (15-108)$$

$$Pe_{xp} = b_1 \cdot 10^{-0,0364 \dot{m}_l / S} \quad (15-109)$$

Hodnoty konstant a_i a b_1 pro uvedené typy výplní jsou v tab. 15-4. Veličiny průtok a průřez se dosazují v základních jednotkách SI.



Obr. 15-6. Závislost poměru počtu převodových jednotek pro pístový tok a tok s axiální disperzí N_z/N_{zr} na N_z a bezrozměrném výrazu $Pe_{xp} h/d_p$

15.6 Přílohy

Tab. 15-1 Hodnoty empirických konstant e_+ , e_- a e_g převzaté z literatury [O1]

Kation	$e_+ / \text{m}^3\text{kmol}^{-1}$	Anion	$e_- / \text{m}^3\text{kmol}^{-1}$	Plyn	$t / ^\circ\text{C}$	$e_g / \text{m}^3\text{kmol}^{-1}$
Li^+	0,416	Cl^-	0,3416	CO_2	0	-0,1653
Na^+	0,183	Br^-	0,3310		15	-0,2222
K^+	0,362	I^-	0,3124		25	-0,2277
Mg^+	0,568	SO_4^{2-}	0,3446		40	-0,2372
Ca^{2+}	0,547	NO_3^-	0,3230	O_2	0	-0,1653
Ba^{2+}	0,473	CO_3^{2-}	0,3754		20	-0,1771
Al^{3+}	0,726	OH^-	0,3875		25	-0,1892
NH_4^+	0,737	CNS^-	0,2612	SO_2	25	-0,3154
H^+	1,110	PO_4^{3-}	0,3265		35	-0,3122
Zn^{2+}	0,590	SO_3^{2-}	0,3275	NH_3	25	-0,2394
Fe^{2+}	0,602	HSO_3^-	0,3869	N_2O	15	-0,2118
Co^{2+}	0,534				20	-0,2128
Mn^{2+}	0,625				25	-0,2141
Ni^{2+}	0,520				40	-0,2179

Tab. 15-2 Charakteristický rozměr d_p , hustota geometrického povrchu a_t , mezerovitost ε a hodnoty empirických konstant rovnic (15-94) a (15-96) pro různé druhy a materiály výplní

Výplň	Materiál	d_p/mm	a_t/m^{-1}	$\varepsilon/-$	C_1	C_g	
Kroužky:							
Pall	ocel	50	110	0,951	0,596	0,205	
		35	145	0,965	0,506	0,171	
		25	220	0,954	0,720	0,168	
	plast	50	110	0,919	0,620	0,184	
		35	150	0,906	0,428	0,190	
		25	225	0,887	0,453	0,224	
Hiflow	keramika	50	115	0,783	0,614	0,280	
	ocel	50	92	0,977	0,584	0,204	
		25	200	0,962	0,821	0,201	
	plast	50	120	0,925	0,777	0,185	
		25	190	0,918	0,789	0,195	
	keramika	50	90	0,809	0,689	0,190	
		38	110	0,788	0,830	0,232	
	Raschig	ocel	50	110	0,950	-	-
			35	150	0,930	-	-
			25	220	0,920	-	-
15			350	0,920	-	-	
plast		50	110	0,950	-	-	
		38	190	0,930	-	-	
		25	220	0,920	-	-	
		15	350	0,920	-	-	
keramika		50	95	0,830	0,708	0,105	
		38	118	0,680	0,768	0,115	
		25	190	0,680	0,681	0,206	
		15	312	0,690	0,638	0,201	
		Sedla:					
Berl	keramika	50	120	0,700	-	-	
		38	164	0,700	0,784	0,122	
		25	260	0,680	0,623	0,194	
		15	430	0,660	-	-	
Koule:							
	keramika	50	65	0,45	-	-	
		35	85	0,48	-	-	
		25	125	0,45	-	-	
		15	210	0,45	-	-	

Tab. 15-3 Hodnoty kritického povrchového napětí σ_c pro vodné roztoky a různé materiály výplně

Materiál výplně	$\sigma_c/10^{-3} \text{ kg s}^{-2}$
ocel	71
parafin	20
polypropylen	20
porcelán	61
keramika	73
PVC	40
PTFE (teflon)	18
polyamid 6/6	46
sklo	73
uhlík	60

Hodnotu povrchového napětí vody v závislosti na teplotě udává vzorec

$$\sigma = 6,943 \cdot 10^{-5} (374-t)^{1,256} \left[1 - 9,6577 \cdot 10^{-4} (374-t) \right]$$

kde t je ve stupních Celsia a σ v kg s^{-2} .

Tab. 15-4 Konstanty rovnic (15-108) a (15-109) pro různé druhy a velikosti výplní

d_p/mm	$a_1/-$	$a_2/\text{kg}^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}$	$a_3/\text{kg}^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}$	$b_1/-$
Raschigovy kroužky keramické				
25	0,665	0,282	0,0284	0,038
50	0,756	0,138	0,0119	0,051
Berlova sedla keramická				
25	0,822	0,349	0,0284	0,033

B Úlohy

U15-1: Určete spotřebu dvounormálního roztoku diethanolaminu, je-li třeba absorbovat v plněné absorpční koloně 95 % CO_2 z plyné směsi, obsahující 17,5 obj.% CO_2 ve vzduchu, použije-li se o 25 % více roztoku, než kolik činí jeho minimální spotřeba. Hustota dvounormálního roztoku diethanolaminu je 1024 kg m^{-3} . Předpokládejte, že absorpce je izotermní při 25°C a tlaku 1 bar. Vstupní průtok plynu činí 3000 kmol h^{-1} .

Výsledek: Spotřeba dvounormálního roztoku diethanolaminu je 264 mol s^{-1} .

U15-2. Odpadní plyn, odcházející z výroby acetylenu při tlaku 4,5 at a 20°C , obsahuje vodík, který je nasycen parami acetonu. Z plynu je třeba odstranit 90 % acetonu. K absorpci se používá plněné kolony o průřezu $1,6 \text{ m}^2$, ve které je na vstupu rychlost plynu vztažená na volný průřez kolony $0,61 \text{ m s}^{-1}$. Jako rozpouštědla se používá čisté vody v množství rovnajícím se trojnásobku minimálního potřebného množství. Vypočítejte objemový průtok vody a hmotnostní % acetonu v odcházející vodě.

Rovnováha aceton - voda je zadána tabulkou v relativních hmotnostních zlomcích acetonu:

X	0,170	0,242	0,357	0,805	1,38	2,14	3,22
Y	0,415	0,550	0,700	0,985	1,16	1,26	1,36

Výsledek: Spotřeba vody je $5,55 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Koncentrace acetonu v odcházející vodě činí 25,2 hmotn.%.

U15-3. Do absorpční kolony vstupuje plyn mimovrstvovou rychlostí 640 m h^{-1} při teplotě 20°C a tlaku 3800 Torr. Obsahuje 3 obj.% HN_3 , zbytek je inertní plyn. Plyn se vypírá vodou o koncentraci 0,5 hmotn.% NH_3 . Intenzita toku vody je $1200 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Z plynu se má odstranit 92 % přiváděného celkového množství NH_3 . Určete počet teoretických pater potřebný pro daný úkol. Kolik bude skutečných pater je-li Murphreeova účinnost E_y jednotlivých pater konstantní a rovna 0,65.

Výsledek: Potřebný počet teoretických pater je 2,3 a skutečných 4,5.

U15-4: V patrové koloně se odstraňuje párou propan z absorpčního oleje. Olej obsahuje na vstupu do kolony 11 mol.% propanu a na výstupu 0,5 mol.% propanu. Kolik teoretických pater musí kolona mít, jestliže spotřeba páry bude 1,5-ti násobkem minimální spotřeby? Rovnovážný vztah při podmínkách v koloně je dán rovnicí $y = 0,526 x$.

Výsledek: Kolona musí mít 5,66 teoretických pater.

U15-5: Ze směsi SO_2 a vzduchu, obsahující 10 obj.% SO_2 , se má odstranit 95 % SO_2 absorpcí do vody ve věži s výplní. Množství zpracovávané směsi je $1500 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ při teplotě 0°C a tlaku 101,3 kPa. Ve vstupující vodě je obsaženo 0,026 hmotn.% SO_2 a v odcházející vodě 0,373 hmotn.% SO_2 . Absorpce se provádí při teplotě 50°C a tlaku 101,3 kPa. Vypočítejte potřebnou absorpční plochu, jsou-li hodnoty koeficientů přestupu hmoty $k_y = 0,27 \text{ kmol m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ a $k_x = 22,2 \text{ kmol m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.
Výsledek: Potřebná absorpční plocha je 3540 m^2 .

U15-6: Ze vzduchu obsahujícího 15 mol.% CO_2 se odstraňuje 90% CO_2 vypíráním čistou vodou při tlaku 1,26 MPa. Absorpce probíhá v plněné absorpční koloně při hustotě zkrápění (mimovrstvová rychlost kapaliny) 130 m h^{-1} a mimovrstvová rychlost plynu na vstupu do kolony činí $0,02 \text{ m s}^{-1}$. Teplota v koloně je udržována na hodnotě 10°C . Kolikrát vyšší by musela být kolona při jinak stejných podmínkách, aby se pohltilo 95 % přiváděného CO_2 . V uvedeném případě můžeme ještě předpokládat platnost Henryova zákona. Předpokládejte, že směs CO_2 se vzduchem je ideální. K výpočtu užiďte střední hodnotu absorpčního faktoru.
Výsledek: Kolona by musela být 1,36-krát vyšší.

U15-7: Ve skrubru se z $1000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ plynu při teplotě 0°C a tlaku 101,3 kPa, obsahujícího 100 g CH_3OH na 1 m^3 plynu při 0°C a 101,3 kPa, absorbuje metanol čistou vodou. Na výstupu ze skrubru má voda 67 % maximální možné koncentrace. Rovnovážný vztah pro rozpustnost CH_3OH ve vodě je $Y = 1,15 X$. Vodou se pohltí 98 % vstupujícího množství CH_3OH . Koeficient prostupu hmoty je $K_X = 0,5 \text{ kmol m}^2 \text{ h}^{-1}$. Ve skrubru je výplň z keramických Raschigových kroužků průměru 25 mm. Výplň je smočena z 60 %. Mimovrstvová rychlost plynu ve skrubru na vstupu je $0,55 \text{ m s}^{-1}$ při teplotě 27°C a tlaku 101,3 kPa. Vypočítejte hmotnostní průtok vody potřebný na zkrápění, průměr skrubru a výšku vrstvy výplně. Předpokládejte, že lze s nevelkou chybou nahradit molární zlomky relativními molárními zlomky.
Výsledek: Potřebné množství vody na zkrápění je 1260 kg h^{-1} , průměr skrubru 0,84 m a výška vrstvy výplně 17,7 m.

U15-8: Určete hmotnostní průtok čisté vody potřebný na zkrápění absorpční kolony pro pohlcování SO_2 ze vzduchu. Průtok plynu je 10 t h^{-1} . Koncentrace SO_2 ve vstupujícím plynu je 10 hmotn.%. Z plynu se má odstranit 95 % z celkového množství SO_2 . Kolona má 21 pater. Celková účinnost kolony činí 30 %. Rovnice rovnovážné přímky za daných podmínek je $Y = 22,1 X$. Vypočítejte koncentraci SO_2 v hmotnostních procentech ve vodě na výstupu z kolony.
Výsledek: Množství vody potřebné ke zkrápění je 163 t h^{-1} . Koncentrace SO_2 v kapalině na výstupu je 0,583 % hmotn.

U15-9: V protiproudé absorpční koloně se vypírá benzen ze spalných plynů minerálním olejem při 20 °C a tlaku 101,3 kPa. Prací olej vstupuje do kolony se zanedbatelnou koncentrací benzenu a vystupuje s obsahem 2 kg benzenu na 100 kg minerálního oleje. Koncentrace par benzenu v plynné směsi na vstupu do kolony je 0,807 obj.%. Střední molární hmotnost pracího oleje je 220 kg kmol⁻¹, viskozita 5 cP a hustota 840 kg m⁻³. V absorberu se odstraní 86 % z celkového množství benzenu. Předpokládejte, že rozpouštění benzenu se řídí Raoultovým zákonem. Určete potřebný počet teoretických a počet skutečných pater kolony, jestliže se použijí patra kloboučková.

Výsledek: Počet teoretických pater je 3,56 a skutečných je 12.

U15-10: Do absorpční kolony se přivádí směs par acetonu se vzduchem. Koncentrace acetonu na vstupu do kolony je 2,1 kg acetonu na 1 kg vzduchu. Z přiváděného množství acetonu se má odstranit 95 % absorpcí do čisté vody. Mímovrstvová rychlost plynu na vstupu do kolony je 0,5 m s⁻¹. Poměr hmotnostních toků vody a vzduchu při minimální spotřebě vody je 1,4. Tlak v koloně je 2100 Torr. Relativní hmotnostní zlomek acetonu ve vodě na výstupu z kolony činí 50 % maximálně teoreticky dosažitelné koncentrace. Za hodinu vstupuje do kolony 200 kg par acetonu. Teplota v koloně je 20 °C. Vypočítejte průtok vody v kg h⁻¹.

Výsledek: Průtok vody činí 267 kg h⁻¹.

U15-11: Z koksárenského plynu, který je přiváděn do absorpční kolony v množství 850 m³ h⁻¹, se vypírá benzen pracím olejem, jehož střední molární hmotnost je 260 kg kmol⁻¹. Koncentrace benzenu ve vstupujícím oleji je 0,5 mol.% a ve vstupujícím plynu 2 mol.%. Má se odstranit 95 % benzenu z přiváděného plynu. Tlak na vstupu do kolony je 1050 Torr, teplota v koloně je 30 °C. Tenze par oleje je při této teplotě zanedbatelná. K absorpci se používá 1,5-ti násobek minimální spotřeby rozpouštědla. Předpokládejte ideální roztok benzenu v oleji. Vypočtěte konečnou koncentraci benzenu v oleji. Zjistěte počet teoretických pater kolony a počet skutečných pater, jestliže Murphreeova účinnost E_y jednotlivých pater je 0,6.

Výsledek: Olej na výstupu z kolony obsahuje 11,9 mol.% benzenu. Počet teoretických pater kolony je 7,1 a počet skutečných pater je 13.

U15-12: V plněné absorpční koloně se absorbuje SO₂ ze vzduchu čistou vodou. Vstupující plyn je do kolony přiváděn v množství 12 t h⁻¹ o koncentraci 10 hmotn.% SO₂. Do zařízení se přivádí 130 t h⁻¹ vody. Výstupní koncentrace plynu je 4 hmotn.% SO₂. Na stejném zařízení při stejném průtoku a vstupní koncentraci plynu se má koncentrace SO₂ v plynu na výstupu z kolony snížit na 2 hmotn.% SO₂. Jakou provozní veličinu je nutno změnit a na jakou hodnotu, jestliže tlak v koloně 1000 Torr a teplota 20 °C zůstává v obou případech konstantní? V daném rozmezí koncentrací lze předpokládat platnost Henryova zákona s konstantou $H = 35,5 \cdot 10^5$ Pa. Stupeň smočení výplně je 60 % a je přibližně konstantní. Pro malé koncentrace lze hmotnostní či molové zlomky

zaměnit za relativní zlomky. Předpokládejte, že odpor vůči mezifázovému přenosu hmoty je pro tento systém soustředěn v plynné fázi.

Výsledek: Je nutné zvýšit průtok vody na hodnotu 359 t h^{-1} .

U15-13: V průmyslovém zařízení je třeba připravit 110 kg h^{-1} čpavkové vody o koncentraci 10 hmotn.% při tlaku 505 kPa a teplotě 20°C . Výchozí surovinou je odpadní plyn obsahující 5 hmotn.% amoniaku. Molární hmotnost inertního plynu je 27 kg kmol^{-1} . Z technických důvodů (není k dispozici kolona potřebného průměru) nebylo možné pracovat v jediné koloně a pracuje se ve dvou. Čpavková voda vytékající z první kolony se nastříkuje do druhé, kdežto plyn se vede do každé kolony čerstvý. Zařízení je navrženo tak, že se v obou kolonách absorbuje stejné množství amoniaku. Do první kolony se přivádí čistá voda.

Jaký hmotnostní průtok plynu se musí přivádět do každé z kolon předpokládáme-li, že výstupní koncentrace plynu z druhé kolony $(Y_{\text{Ae}})_2 = 1,6 Y_{\text{Ae,min}}$, kde $Y_{\text{Ae,min}}$ je minimální možná koncentrace amoniaku v plynu odcházejícím z druhé kolony a výstupní koncentrace z první kolony $(Y_{\text{Ae}})_1 = 0,4 Y_{\text{Ae,min}}$.

Výsledek: Do první kolony je nutno přivádět 109 kg h^{-1} a do druhé 123 kg h^{-1} plynu.

U15-14: Je třeba absorbovat benzenové páry ze směsi obsahující 12,7 mol.% benzenových par pracím olejem. Prací olej na vstupu do kolony obsahuje 1 mol.% benzenu. Absorpce probíhá při 30°C a tlaku 0,6 bar. Do kolony se přivádí $28,5 \text{ kmol h}^{-1}$ směsi plynů a 13 kmol h^{-1} absorpčního oleje s benzenem. Odcházející plyn smí obsahovat maximálně 1,5 obj.% benzenu. Předpokládejte ideální roztok benzenu v oleji. Tenzi par oleje lze při této teplotě zanedbat. Zjistěte počet převodových jednotek N_y . Při výpočtu využijte účinek absorbéru.

Výsledek: Počet převodových jednotek je 3,37.

U15-15: Ze směsi vzduch- SO_2 se má odstranit 98 % vstupujícího SO_2 absorpcí ve vodě. Vstupující plyn obsahuje 1,1 obj.% SO_2 . Voda vystupující z kolony obsahuje 0,31 hmotn.% SO_2 . Mimovrstvová rychlost plynu je $0,45 \text{ m s}^{-1}$. Do kolony se přivádí $35 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ SO_2 (průtok vztažen na teplotu 0°C a tlak 101,3 kPa). Teplota v koloně je 10°C a tlak 100 kPa. Vypočítejte výšku vrstvy výplně kolony, je-li objemový koeficient přestupu hmoty $k_y a = 0,13 \text{ kmol m}^{-3} \text{ s}^{-1}$. Rovnováhu lze při takto nízkých koncentracích aproximovat vztahem: $p_{\text{SO}_2} = 3,3 \cdot 10^5 \cdot X_{\text{SO}_2}$, kde p_{SO_2} je parciální tlak SO_2 v Pa. Předpokládejte, že veškerý odpor vůči mezifázovému přestupu hmoty je soustředěn v plynné fázi.

Výsledek: Výška vrstvy výplně je 3,7 m.

U15-16: Ze vzduchu obsahujícího 3 obj.% NH_3 se má absorbovat amoniak čistou vodou při 20°C a tlaku 101,3 kPa. Intenzita hmotnostního toku plynu na vstupu do kolony je $1,1 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Výplň je z Berlových keramických sedel průměru 38 mm. Intenzita

zaměnit za relativní zlomky. Předpokládejte, že odpor vůči mezifázovému přenosu hmoty je pro tento systém soustředěn v plynné fázi.

Výsledek: Je nutné zvýšit průtok vody na hodnotu 359 t h^{-1} .

U15-13: V průmyslovém zařízení je třeba připravit 110 kg h^{-1} čpavkové vody o koncentraci 10 hmotn.% při tlaku 505 kPa a teplotě 20°C . Výchozí surovinou je odpadní plyn obsahující 5 hmotn.% amoniaku. Molární hmotnost inertního plynu je 27 kg kmol^{-1} . Z technických důvodů (není k dispozici kolona potřebného průměru) nebylo možné pracovat v jediné koloně a pracuje se ve dvou. Čpavková voda vytékající z první kolony se nastříkuje do druhé, kdežto plyn se vede do každé kolony čerstvý. Zařízení je navrženo tak, že se v obou kolonách absorbuje stejné množství amoniaku. Do první kolony se přivádí čistá voda.

Jaký hmotnostní průtok plynu se musí přivádět do každé z kolon předpokládáme-li, že výstupní koncentrace plynu z druhé kolony $(Y_{\text{Ae}})_2 = 1,6 Y_{\text{Ae,min}}$, kde $Y_{\text{Ae,min}}$ je minimální možná koncentrace amoniaku v plynu odcházejícím z druhé kolony a výstupní koncentrace z první kolony $(Y_{\text{Ae}})_1 = 0,4 Y_{\text{Ae,min}}$.

Výsledek: Do první kolony je nutno přivádět 109 kg h^{-1} a do druhé 123 kg h^{-1} plynu.

U15-14: Je třeba absorbovat benzenové páry ze směsi obsahující 12,7 mol.% benzenových par pracím olejem. Prací olej na vstupu do kolony obsahuje 1 mol.% benzenu. Absorpce probíhá při 30°C a tlaku 0,6 bar. Do kolony se přivádí $28,5 \text{ kmol h}^{-1}$ směsi plynů a 13 kmol h^{-1} absorpčního oleje s benzenem. Odcházející plyn smí obsahovat maximálně 1,5 obj.% benzenu. Předpokládejte ideální roztok benzenu v oleji. Tenzi par oleje lze při této teplotě zanedbat. Zjistěte počet převodových jednotek N_y . Při výpočtu využijte účinek absorberu.

Výsledek: Počet převodových jednotek je 3,37.

U15-15: Ze směsi vzduch- SO_2 se má odstranit 98 % vstupujícího SO_2 absorpcí ve vodě. Vstupující plyn obsahuje 1,1 obj.% SO_2 . Voda vystupující z kolony obsahuje 0,31 hmotn.% SO_2 . Mimovrstvová rychlost plynu je $0,45 \text{ m s}^{-1}$. Do kolony se přivádí $35 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ SO_2 (průtok vztažen na teplotu 0°C a tlak 101,3 kPa). Teplota v koloně je 10°C a tlak 100 kPa. Vypočítejte výšku vrstvy výplně kolony, je-li objemový koeficient přestupu hmoty $k_y a = 0,13 \text{ kmol m}^{-3} \text{ s}^{-1}$. Rovnováhu lze při takto nízkých koncentracích aproximovat vztahem: $p_{\text{SO}_2} = 3,3 \cdot 10^5 \cdot X_{\text{SO}_2}$, kde p_{SO_2} je parciální tlak SO_2 v Pa. Předpokládejte, že veškerý odpor vůči mezifázovému přestupu hmoty je soustředěn v plynné fázi.

Výsledek: Výška vrstvy výplně je 3,7 m.

U15-16: Ze vzduchu obsahujícího 3 obj.% NH_3 se má absorbovat amoniak čistou vodou při 20°C a tlaku 101,3 kPa. Intenzita hmotnostního toku plynu na vstupu do kolony je $1,1 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Výplň je z Berlových keramických sedel průměru 38 mm. Intenzita

zkrápění je $2,5 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Ze směsi se má absorbovat 95 % celkového množství NH_3 . Vypočítejte výšku vrstvy výplně za předpokladu, že odpor proti sdílení hmoty je v kapalně fázi zanedbatelný a že platí lineární rovnovážný vztah $y = 0,153 x$. Předpokládejte, že se fyzikální vlastnosti plynné fáze přítomností amoniaku mění jen v nevýznamné míře. Difuzivita amoniaku ve vzduchu za podmínek v koloně činí $0,175 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$.

Výsledek: Výška vrstvy výplně je 1,54 m (počítáno z rovnice (15-85)) nebo 0,857 m (počítáno z rovnice (15-94)).

U15-17: Vypočítejte, jak vysoká má být kolona se smáčenou stěnou o vnitřním průměru 3 cm, jestliže má být použita k sycení roztoku obsahujícího $0,2 \text{ kmol m}^{-3} \text{ Na}_3\text{PO}_4$ a $0,2 \text{ kmol m}^{-3} \text{ KNO}_3$ čistým kyslíkem. Koncentrace kyslíku v roztoku na vstupu do kolony činí 20 % a na výstupu z kolony se má rovnat 70 % z koncentrace při nasycení za podmínek v koloně. Absorpce je izotermní při teplotě 20°C a tlaku 1,01 bar. Roztok je do kolony přiváděn v množství $2,4 \text{ l min}^{-1}$. Při výpočtu předpokládejte, že přítomnost solí významně neovlivní hustotu a viskozitu vody, odpor vůči přestupu hmoty je soustředěn v kapalně fázi a složení plynu se vzhledem k malé rozpustnosti kyslíku ve vodě při průtoku kolonou nemění. Difuzivita kyslíku v roztoku je $2,1 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$.

Výsledek: Kolona má být 3,33 m vysoká.

U15-18: Z kolika procent lze nasýtit kyslíkem roztok obsahující $1 \text{ kmol m}^{-3} \text{ Na}_3\text{PO}_4$ v koloně průměru 0,3 m, vysoké 1 m a plněné keramickými Raschigovými kroužky o průměru 15 mm, jestliže před vstupem do kolony byl zbaven všech rozpuštěných plynů. Do kolony se přivádí 200 kg h^{-1} roztoku. Vzduch je do kolony přiváděn v takovém množství, že nedochází k významnému poklesu koncentrace kyslíku v plynu při průchodu kolonou. Předpokládejte, že veškerý odpor proti sdílení hmoty je soustředěn v kapalně fázi. Sycení probíhá při teplotě 20°C a tlaku 101 kPa. Fyzikální vlastnosti vody se přítomností soli významně nemění. Difuzivita kyslíku ve vodě za podmínek sycení je $2,1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. K výpočtu použijte vztah (15-88).

Výsledek: Roztok lze nasýtit z 99 % rovnovážné hodnoty.

Literatura

- [B1] Billet R., Schultes M.: *Chem. Eng. Technol.* **16** 1 (1993).
- [B2] Bakowski J.: *Brit. Chem. Eng.* **14** 945 (1969).
- [D1] Danckwerts P.V.: *Reakce v soustavě plyn-kapalina*, SNTL, Praha 1975 (překlad z anglického originálu).
- [D2] Dunn W.E., Vermeulen T., Wilke C.R., Word T.T.: *Ind. Eng. Chem. Fundam.* **16** 116 (1977).

- [G1] Gilliland E.R., Sherwood T.K.: *Ind. Eng. Chem.* **26** 516 (1934).
- [L1] Landolt-Börnstein: *Thermodynamische Eigenschaften von Gemischen, Verbrennung, Wärmeübertragung*. Band IV, 4b der 6. Auflage
- [M1] Míka V.: *Chemické inženýrství II*, VŠChT Praha, (1999).
- [M2] Míka V.: *Základy chemického inženýrství*, SNTL Praha, (1977).
- [O1] Onda K., Sada E., Kito B., Ito K.: *J. Chem. Eng. Japan* **3** 18 (1970).
- [O2] Onda K., Sada E., Takeuchi H.: *J. Chem. Eng. Japan* **1** 62 (1968).
- [P1] Perry R.H., Green D.: *Perry's Chemical Engineering Handbook*. 6. vyd., McGraw-Hill, New York 1984.
- [R1] Ramm V.M.: *Absorpcija gazov*, Chimija, Moskva (1966).
- [S1] Sater V.E., Levenspiel O.: *Ind. Eng. Chem. Fundam.* **5** 86 (1966).
- [W1] Walter J.F., Sherwood T.K.: *Ind. Eng. Chem.* **33** 493 (1941).
- [Z1] Zarzycki R., Chacuk A.: *Absorption*, Pergamon Press Ltd., Oxford, New York, Seoul, Tokyo (1993).