

20 Extrakce a vyluhování

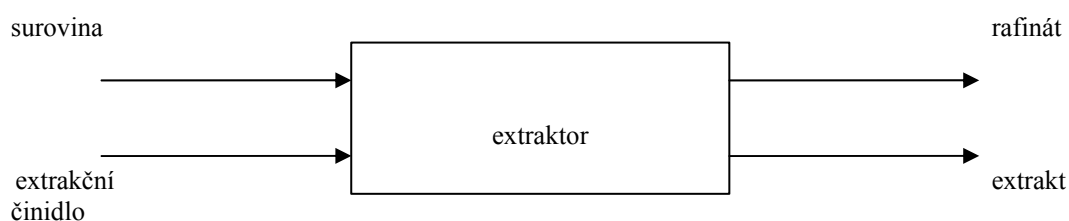
Hlavní cíle kapitoly: Kvalitativně popsat extrakci a extraktory. Uplatnit na extrakci rovnice pro stupňové provedení transportu hmoty při konstantní teplotě. Vyložit výpočet jednostupňové, opakované a protiproudové extrakce a základy výpočtu vyluhování.

Požadované znalosti: Vyjádření fázových rovnováh, hmotnostní a relativní hmotnostní zlomek, bilance hmotnosti, faktor výměníku tepla, účinek výměníku tepla.

V úvodu k této kapitole bude vyložen kvalitativní popis kapalinové extrakce, vyluhování a extrakčních zařízení, kterých se k tomu účelu používá. Hlavní část kapitoly je kvantitativní a obsahuje rovnice, z nichž se vychází při výpočtu aparátů stupňové kapalinové extrakce a vyluhování. Pro výklad je výhodné popsat kapalinovou extrakci zvlášť pro systémy s omezeně mísitelnými a pro systémy s nemísitelnými rozpouštědly. Jsou vyloženy rovnice rovnovážného vztahu, bilance složky a směsi a vyjádření účinnosti stupně.

20.1 Úvod

Účelem extrakce je dělení složek kapalné směsi přidáním jiné kapaliny, která se s původní směsí nemísí nebo je s ní jen omezeně mísitelná. Ve vzniklé druhé kapalně fázi se rozpouští část suroviny. Zařízení, ve kterém se extrakce provádí, se nazývá *extraktor* (viz obr.20.1, 29.15 a 29.20). Obsahuje dvě kapaliny. Vstupuje kapalná *surovina* a kapalina přidávaná k surovině, která má název *extrakční činidlo*. Obecně jsou to kapaliny navzájem omezeně mísitelné. V extrakčním činidle se rozpustí část suroviny a tento roztok se nazývá *extrakt*. Zbývá část suroviny, ochuzená o podíl přešlý do extraktu, je *rafinát*. Vyluhování se liší od extrakce tím, že surovina je pevná látka. Extrakce a vyluhování má rozsáhlé průmyslové využití v chemickém a potravinářském průmyslu, v petrochemii, ve farmaceutickém průmyslu, při zpracování materiálů v jaderném průmyslu a v metalurgii.



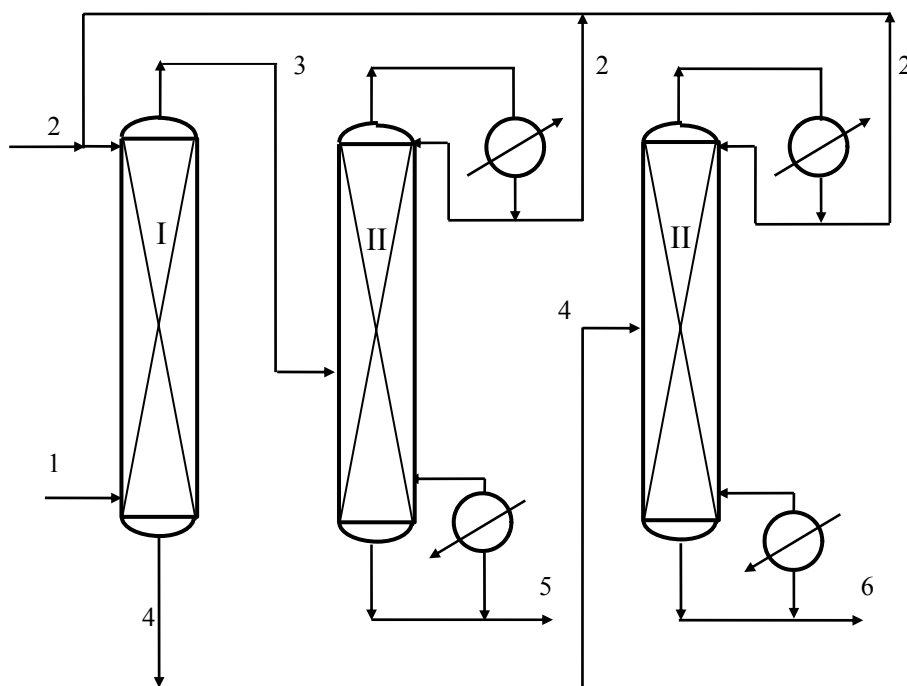
Obr. 20.1. Základní pojmy v extrakci

Po extrakci obvykle následuje další dělicí proces, např. rektifikace (bude se probírat v příští kapitole). Tou se regeneruje extrakční činidlo a koncentrují se extrahované složky^{*)}.

Rektifikace je alternativní metoda k extrakci. O volbě mezi nimi rozhodují především finanční náklady, a ty mohou být pro extrakci s rektifikací menší než pro samotnou rektifikaci. Tak např. kyselina octová se oddělí ze zředěného vodného roztoku extrakcí diisopropyletherem a z roztoku v etheru se získá rektifikací. To je levnější než dělení původního roztoku

^{*)}Ne však vždycky. Některé látky nesnášejí teplotu potřebnou pro rektifikaci. Jako příklad uveďme výrobu penicilinu. Při ní se směs odcházející z fermentoru po úpravě pH extrahuje butylacetátem, ze kterého se po smísení s roztokem fosfátu získává vodný roztok čistého penicilinu.

rektifikací, při kterém by bylo nutné dodávat mnoho energie na oddestilování vody. Schéma extrakce vodného roztoku kyseliny octové je znázorněno na *obr.20.2*. Extrakt (3), tj. roztok kyseliny octové v diisopropyletheru, se dělí rektifikací (II) na diisopropylether (2), který se vrací jako regenerované extrakční činidlo zpět k extrakci (I), a na produkt - kyselinu octovou (5). Zbývající diisopropylether se získá rektifikací (II) rafinátu (4) a jako odpad odchází voda (6) s velmi malou koncentrací kyseliny. Protože při regeneraci nastávají ztráty extrakčního činidla, nahrazují se přívodem čistého diisopropyletheru (2).



Obr. 20.2. Extrakce zředěné kyseliny octové diisopropyletherem

I-extraktor, II-rektifikační věž, 1-vodný roztok kyseliny octové, 2-diisopropylether, 3-extrakt, 4-rafinát, 5-kyselina octová, 6-voda

Při dělení ethanolu ze zředěného vodného roztoku je na rozdíl od předešlého příkladu levnější rektifikace než extrakce, protože se odpařuje především ethanol, jehož hodnota měrné výparné entalpie je výrazně menší než její hodnota pro vodu.

Průběh extrakce závisí na volbě extrakčního činidla, jehož doporučené vlastnosti jsou:

1. Dobrá selektivita, tj. možnost oddělení pouze té složky směsi, o kterou máme zájem. Veličina, která charakterizuje tuto schopnost, se nazývá *separační faktor*. Je to vlastně relativní rovnovážný poměr [viz rovn.(19.2-13)] pro extrahovanou složku A a původní rozpouštědlo C. Definuje se zlomkem, který má rovnovážný poměr (distribuční koeficient) extrahované složky A v čitateli a rovnovážný poměr původního rozpouštědla C ve jmenovateli:

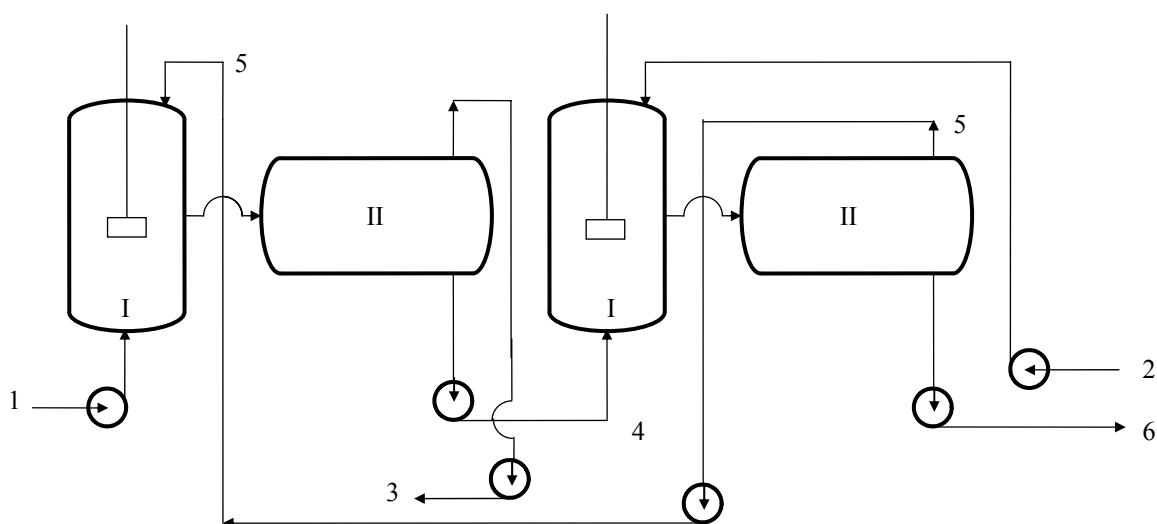
$$\alpha_{AC} \equiv \frac{\psi_A}{\psi_C} = \frac{y_A / x_A}{y_C / x_C} = \frac{\gamma_{Ax} / \gamma_{Ay}}{\gamma_{Cx} / \gamma_{Cy}} \quad (20.1-1)$$

Symbolem y_k se označuje molární zlomek složky $k = A, C$ v extraktu, x_k je její molární zlomek v rafinátu a veličina γ_k je aktivitní koeficient složky k . Vyjádření aktivitními koeficienty plyne z rovn.(19.2-15).

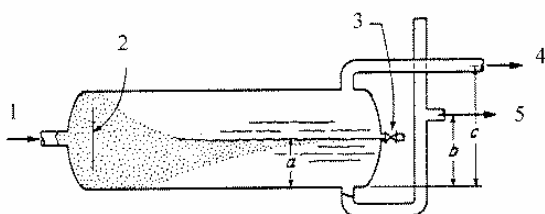
2. Relativně velký rozdíl hustot extraktu a rafinátu (zkracuje dobu usazování, tedy potřebnou dobu prodloužení směsi v usazováku).
3. Malá viskozita extraktu (usnadňuje čerpání, dispergaci a transport hmoty).
4. Malá vzájemná rozpustnost rozpouštědel B a C (usnadňuje regeneraci extrakčního činidla).
5. Malé mezifázové napětí (napomáhá dispergaci a transportu hmoty, ale zpomaluje koalescenci kapek).
6. Nízká cena a dobrá dostupnost.
7. Malá toxicita, hořlavost, korozivnost a kontaminace produktu, velká stálost.

Za dispergovanou fázi se obvykle volí kapalina, která má větší hodnotu objemového toku. V aparátech s významným zpětným promícháváním se však disperguje kapalina s menší hodnotou objemového toku. Dispergovaná kapalina má méně smáčet povrch styku s extraktorem. Zadrž spojitě fáze je obvykle větší než zadrž fáze dispergované, proto má být kapalina spojitě fáze levnější a méně riziková než dispergovaná kapalina.

V praxi se při extrakci obvykle dělí více než dvě složky a extrakční činidlo může obsahovat několik rozpouštědel. Často je extrakce spojena s chemickou reakcí, kdy reaktant (extrakční činidlo) reaguje vratně s přecházející složkou, např. v hydrometalurgii. Podrobně se extrakcí zabývají některé monografie (v češtině je to např. již starší dílo [58], k novějším patří monografie [6] a příručka [35a]).



Obr. 20.3. Dvoustupňový extraktor typu míšič-usazovák při protiproudu
I-míšič, II-usazovák, 1-surovina, 2-extrakční činidlo, 3-extrakt z 1. stupně (produkt), 4-rafinát z 1. stupně, 5-extrakt z 2. stupně, 6-rafinát z 2. stupně (produkt)

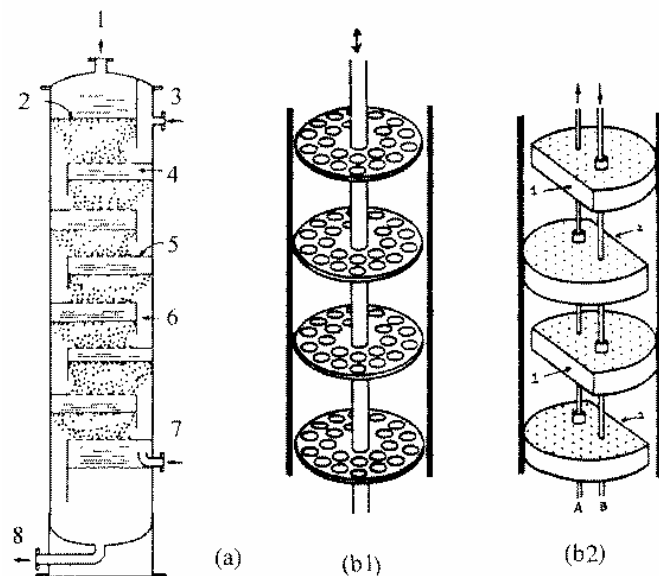


Obr. 20.3a. Gravitační usazovák kapalinové disperze

1-přívod disperze, 2-uklidnění vstupního proudu, 3-výpust nečistot z fázového rozhraní, 4- odvod lehčího produktu, 5- odvod těžšího produktu

V extraktorech je kontakt obou kapalných fází buď stupňový, nebo spojitý. Stupňový kontakt fází nastává v soustavě míšič-usazovák (obr.20.3) a ve věžích se sítovými patry (obr.20.4a) či s míchadly (obr.29.19). Spojitý kontakt fází je ve věžích s výplní, ve sprchové

věži (*obr.29.15*) nebo v odstředivce. Na *obr.20.3* je znázorněn stupňový extraktor složený z dvojic mísič-usazovák. Mísič obsahuje obvykle mechanické míchadlo, kterým se rozptýlí (disperguje) jedna z přiváděných kapalin ve druhé kapalině a podpoří se transport extrahované složky z rafinátu do extraktu. Kapalná směs se míchá vrtulovým míchadlem nebo prochází odstředivým cirkulačním čerpadlem. Emulze se vede do usazováku, který musí umožnit tak velkou dobu prodlení, aby se koalescencí (spojováním) kapek znovu vytvořily dvě homogenní kapalná fáze^{*)}, které se pak každá zvlášť z usazováku (viz *obr. 20.3a*) odvádějí k dalšímu zpracování. Doba prodlení směsi v usazováku bývá 30 až 60 min. Jak je z *obr.20.3* patrné, vyžaduje soustava mísičů a usazováků větší délku potrubí a větší počet čerpadel než věžové uspořádání. Používá se obvykle nanejvýš pětistupňový aparát [71].



Obr. 20.4. Stupňové věžové extraktory

a) extraktor se síťovými patry
1-výstup lehčí fáze, 2-fázové rozhraní, 3-vstup těžší fáze, 4-dispergovaná fáze po koalescenci, 5-síťové patro, 6-přepad, 7-vstup lehčí fáze, 8-výstup těžší fáze

b) část extraktoru s vibraujícími patry
b1) patra na společném hřídeli
b2) patra na dvou hřídelích (na hřídeli A jsou patra 1, na hřídeli B jsou patra 2)

Tabulka 20.1 Porovnání některých průmyslových extraktorů

<i>typ extraktoru</i>	<i>výkonnost</i> (pro obě kapaliny) m h^{-1}	<i>výška převod.</i> <i>jednotky</i> m	<i>účinnost stupně</i> %	<i>vzdálenost mezi stupni</i> m	<i>proměřovaný proces</i>
soustava mísič-usazovák			$\langle 75; 100 \rangle$		dělení aromatických od alifatických uhlovodíků
sprchová věž	$\langle 15; 75 \rangle$	$\langle 3; 6 \rangle$			amoniakální extrakce NaCl z roztoku NaOH
věž s výplní	$\langle 6; 45 \rangle$	$\langle 1,5; 6 \rangle$			extrakce fenolu z vodných roztoků
věž se síťovými patry	$\langle 3; 60 \rangle$		$\langle 5; 25 \rangle$	$\langle 0,1; 0,6 \rangle$	dělení uhlovodíků
věž s míchadly	$\langle 15; 30 \rangle$		$\langle 80; 100 \rangle$	$\langle 0,3; 0,6 \rangle$	izolace organických léčiv

Pro více stupňů se proto často používá věžových extraktorů (viz *obr.20.4* a *obr.29.19*). V extraktoru se síťovými (děrovanými, průměr otvorů 3 až 8 mm) patry (vzdálenost pater je 15 až 60 cm) se kapalina procházející patrem rozptýluje na kapky. Je-li to kapalina s menší hustotou, pak kapky stoupají vzhůru a vyměňují hmotu s okolní spojitou kapalinou, koaleskují

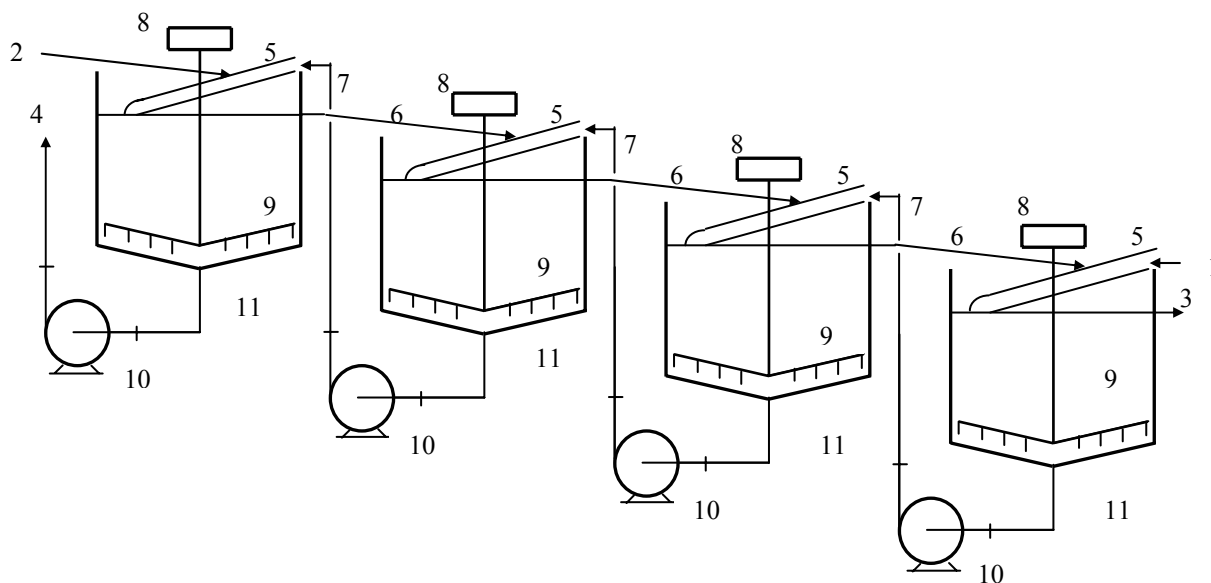
^{*)}V reálném aparátu neodděluje spojitě fáze rovinné rozhraní, nýbrž vrstva emulze, jejíž tloušťka závisí na rychlosti koalescence fází (viz *obr.20.3a*). Tento jev je znám i z vytřepávání v laboratoři.

a vytvářejí pod následujícím patrem spojitou vrstvu, ze které po průchodu patrem opět vzniknou kapky atd. Kapalina s větší hustotou prochází přepady opačným směrem. Rozdíly hustot obou kapalin jsou poměrně malé a jejich relativní rychlosti proudění jsou tedy rovněž malé. S relativní rychlostí fází klesá rychlost transportu hmoty mezi fázemi. Proto se nedostatečná síla tíže nahrazuje odstředivou silou v extrakční odstředivce nebo se na přívodu fází zavádějí pulzace dodáváním energie zvenčí pohybem pístu (orientační hodnota frekvence pulzací je 60 min^{-1} s amplitudami 6 až 25 mm).

Další ze způsobů extrakce s dodáváním energie je na obrázku extraktor s vibrujícími patry (*obr. 20.4b*). Sítová patra jsou upevněna na společné hřídeli, která kmitá v axiálním směru (jak naznačují šipky). Tím se zintenzivňuje tvorba a rychlost pohybu kapek a transport hmoty jejich povrchem v okolí vibrujících pater. Varianta se dvěma hřídelemi zvětšuje turbulenci tím, že hřídele kmitají navzájem opačným směrem. Jedna z konstrukcí používaných v průmyslu je založena na československém patentu, jehož autory byli pracovníci ústavu chemického inženýrství VŠCHT Praha.

Jiný typ extraktorů používá rotující hřídele nesoucí soustavu disků [extraktory RDC (Rotating Disk Contactor)] či míchadel (viz *obr. 29.19*).

Aparáty se spojitým kontaktem fází jsou např. věže s výplní nebo sprchové extraktory. Velmi krátké doby kontaktu a přitom požadované změny koncentrace se dosahuje v extrakční odstředivce, která též umožňuje zpracovat obtížně dělitelné emulze. Její cena je však relativně vysoká. V *tab.20.1* se porovnávají některé typy extraktorů [39].



Obr.20.5. Vyluhovací baterie.

1-přívod pevné suroviny, 2-přívod rozpouštědla, 3-odvod produkovaného extraktu, 4-odvod produkovaného rafinátu, 5-směšovací trubka pro kapalinu a suspenzi, 6-odvod extraktu do dalšího stupně, 7-přívod rafinátu z následujícího stupně, 8-pohon hrabla, 9-rameno hrabla, 10-kalové čerpadlo, 11-usazovák

Vyluhování je metoda odstraňování rozpustné složky pevné směsi přidáním kapalného rozpouštědla. Používá se v potravinářském průmyslu např. k získávání rostlinných tuků a olejů nebo při výrobě cukru. Ve velkém měřítku se uplatňuje při zpracování rud. Ve farmaceutickém průmyslu má vyluhování význam pro zpracování přírodních surovin. Podobá se promývání filtračního koláče.^{*)}

^{*)}Zde nazýváme rozpouštění součásti pevné fáze kapalným rozpouštědlem vyluhování. V literatuře se však též používá názvu extrakce a rozeznává se kapalinová extrakce a extrakce pevných látek.

Při vyluhování se může rozpustit značný podíl pevné fáze a její struktura se může výrazně měnit, třeba z hrubé drti na kaši. Rozpadající se částice pevné fáze se rozptýlí míchadlem v kapalině a po vyloužení se oddělí od loužicího činidla usazováním. Pokud se při vyluhování struktura pevné fáze nemění, může se vyluhování provádět tak, že se nehybná vrstva částic promývá protékajícím rozpouštědlem.

Vyluhování vrstvy částic se děje často v několika za sebou zařazených a navzájem propojených nádobách obsahujících loužený materiál. V každé nádobě probíhá loužení vsádkově do předepsané minimální koncentrace výluhu, pak se nádoba vyprázdí a znovu naplní surovinou. Čerstvé loužicí činidlo se přivádí do nádoby s nejmenší koncentrací loužené složky, roztok postupuje do nádob s rostoucí koncentrací a nakonec prochází nádobou s čerstvou vsádkou. Proces tedy napodobuje protiproud. S postupnou výměnou obsahu nádob se přepíná přívod loužicího činidla a odvod koncentrovaného výluhu. Takové zařízení se nazývá *loužicí (extrakční) baterie*. Pokud je propustnost vrstvy malá, přivádí se rozpouštědlo při zvýšeném tlaku. Částice vytvářející během vyluhování nebo již před ním nepropustnou vrstvu se dispergují v nádobách s míchadlem a po vyloužení se oddělí od loužicího činidla usazováním. Dokonalejší průběh vyluhování nastává v aparátech s pohyblivou pevnou fází při protiproudu. Pevná fáze se dopravuje buď kalovým čerpadlem, nebo šnekovým dopravníkem. Příklad takového zařízení je na obr.20.5.

Postupně nabývá na významu vyluhování v nadkritických podmínkách (při větším tlaku a teplotě, než jsou hodnoty pro kritický bod loužicího činidla; viz *obr.19.6* v kap.19). Uplatňuje se zejména v potravinářském průmyslu. K používaným činidlům patří oxid uhličitý, halomethany, alkany a alkeny C_2 až C_4 , amoniak a voda. Výhody těchto činidel při nadkritických podmínkách ve srovnání s obyčejnými kapalinami jsou

- a) větší rychlost vyluhování,
- b) větší rozpustnost vyluhované složky,
- c) snadné oddělení loužicího činidla jeho převedením do plynného stavu snížením tlaku a jeho regenerace kompresí (úspora energie),
- d) pružnost podmínek vyluhování (malé změny teploty a tlaku vyvolávají velké změny hustoty a rozpouštěcí schopnosti činidla).

Tento postup má ovšem i své nevýhody, především nutnost práce při velkých hodnotách tlaku a s tím spojené velké investiční a provozní náklady.

20.2 Systémy s omezeně mísitelnými rozpouštědly

20.2.1 Úvod

Tato kapitola obsahuje rovnice stupňového provedení extrakce. V kap.19 byl uveden soubor rovnic popisujících typický rovnovážný stupeň. Ten bude uplatněn na extrakci. Aby výklad byl jednodušší, předpokládá se ustálený děj bez chemické reakce a pro vsádkový proces se uvažuje bilanční období rovné jedné periodě. V bilanci pak není zdrojový ani akumulací člen.

Obvykle má extrahovaná složka v surovině poměrně malou koncentraci a proces probíhá za přibližně konstantní teploty a bez tepelné výměny s okolím. Pak není pro výpočet nutná bilance entalpie.

20.2.2 Jednostupňová extrakce

Jednostupňový extraktor znázorňuje *obr.20.6*. Symbol F označuje surovinu, S extrak-

ční činidlo, R rafinát a E extrakt. Hmotnostní zlomek složky k [$k = 1, 2, \dots, K$] v rafinátu je označen symbolem x_k , v extraktu y_k .

Pro rovnovážné stupně platí podmínka fázové rovnováhy mezi vzniklým extraktem a rafinátem (od koncentrací v reálných stupních se odlišují hvězdičkou)

$$y_k^* = \psi_k x_k^* \quad [T_x = T_y = T, p_x = p_y = p, k = 1, 2, \dots, K] \quad (20.2-1)$$

kde hodnota rovnovážného poměru hmotnostních zlomků ψ_k se liší od hodnoty rovnovážného poměru molárních zlomků ψ_k , který je definován rovn.(19.2-11)*. K rozpadu kapaliny na dvě omezeně mísitelné směsi dochází pouze tehdy, když je směs z termodynamického hlediska neideální. Podle rovn.(19.2-15) je rovnovážný poměr složky k pro molární zlomky, ψ_k , vyjádřen při extrakci poměrem jejích aktivitních koeficientů v obou kapalinách, proto

$$\psi_k = (M_x / M_y)(\gamma_{kx} / \gamma_{ky}) \quad (20.2-2)$$

Bilanci hmotnosti složky k vyjadřuje obdoba rovnice (19.2-18), která pro extrakci při nulové akumulaci a bez chemické reakce bude

$$\dot{m}_F x_{kF} + \dot{m}_S y_{kS} = \dot{m}_R x_k + \dot{m}_E y_k \quad [R = 0, \frac{dm_{ks}}{d\tau} = 0] \quad (20.2-3)$$



Obr.20.6. Bilanční schéma jednostupňového extraktoru

Je-li bilanční období rovné intervalu mezi naplněním a vyprázdněním extraktoru, bilance se vyjádří v hmotnostech a nikoli v tocích. K ručním výpočtům systémů tříložkových směsí je výhodné rovnici doplnit členem představujícím součet množství složky k v obou fázích, $Z_k m_M$, kde Z_k je myšlený hmotnostní zlomek složky k v pomocném proudu s hmotností m_M

$$\boxed{m_F x_{kF} + m_S y_{kS} = m_R x_k + m_E y_k = m_M Z_k} \quad (20.2-4)$$

Bilance proudů je součtem bilancí všech složek

$$\boxed{m_F + m_S = m_R + m_E = m_M} \quad (20.2-5)$$

Obdoba podmínky (19.2-20) má tvar

$$\boxed{\sum_{k=1}^K x_k = 1, \quad \sum_{k=1}^K y_k = 1} \quad (20.2-6)$$

*) Podle původní definice (19.2-11) v molárních zlomech závisí vztah mezi koeficienty ψ_k a ψ_k na molárních hmotnostech stýkajících se fází

$$\begin{aligned} \psi_k &= y_k / x_k = (m_{ky} / m_y) / (m_{kx} / m_x) = [(M_k n_{ky}) / (M_y n_y)] / [(M_k n_{kx}) / (M_x n_x)] = (M_x / M_y)(y_k / x_k) = \\ &= (M_x / M_y) \psi_k \end{aligned}$$

K řešení soustavy rovnic je třeba znát závislost hodnoty rovnovážného poměru složek na teplotě, tlaku a složení fází (vliv tlaku na rovnovážný poměr má význam pouze při podmínkách nad kritickým bodem rozpouštědla; viz *obr.19.6*).

Pro směs obsahující K složek je možné sestavit K nezávislých rovnic hmotnostní bilance, K nezávislých rovnovážných vztahů, přičemž pro každý proud lze uplatnit jednu z rovnic (20.2-6). Pro dva proudy tedy je k dispozici $2(K+1)$ rovnic.

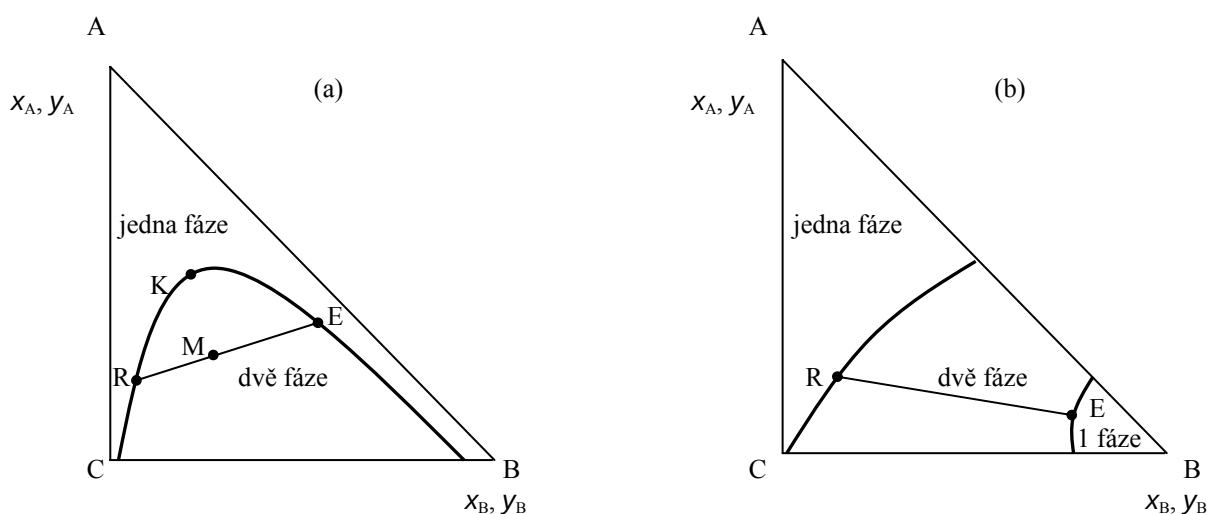
Je-li známé množství, složení, teplota a tlak vstupujících proudů, je třeba určit množství a složení vystupujících proudů. Pro každý vystupující proud je to K údajů o koncentracích složek a jeden údaj o množství proudu, tj. celkem $2(K+1)$ neznámých. Soustava je proto řešitelná. Uplatní se na ni příslušný postup řešení souboru nelineárních rovnic.

Základy řešení úloh extrakce budou vyloženy na směsích se třemi složkami označenými A,B,C. Symbol A bude použit pro extrahovanou složku, symbol B pro extrakční rozpouštědlo, tj. pro složku, ze které se převážně skládá extrakční činidlo a symbol C pro původní rozpouštědlo, tj. složku, která provází extrahovanou složku v surovině. Tak při extrakci zředěné kyseliny octové popisované v úvodu je složka A-kyselina octová, B-diisopropylether a C-voda. Extrakční činidlo je buď čistá složka B, nebo obecněji její směs se složkami A a C, v níž převládá složka B.

Při jednostupňové extrakci (viz *obr.20.5*) bude v rovnicích (20.2-1) až (20.2-6) $k = A,B,C$, tj. 3 bilance hmotnosti, 3 vyjádření fázové rovnováhy a pro každý proud se uplatní jedna z rovnic (20.2-6), tedy celkem 8 rovnic. Je-li známé množství a složení vstupujících proudů, budou neznámé hodnoty množství a složení vystupujících proudů, což je $2(3+1) = 8$ neznámých. Pokud nejsou k dispozici naměřené údaje, je výpočet rovnovážného složení ze vzorců pro výpočet aktivitních koeficientů obecně časově náročnější. Podle rovn.(19.2-21) platí vzhledem k rovnicím (19.2-20)

$$\psi_k = \psi_k(T, p, x_A, x_B, y_A, y_B) \quad [k = A, B, C] \quad (20.2-7)$$

Složení žádného vystupujícího proudu není předem známo, proto je nutné se k hodnotám koncentrací dopracovat iteračními výpočty. Pro četné tříložkové směsi jsou však k dispozici pokusné údaje o fázové rovnováze mezi dvěma kapalinami.



Obr.20.7 Fázová rovnováha v trojúhelníkovém diagramu

Trojúhelníkový diagram na *obr.20.7* je grafické znázornění stavu tříložkové směsi při konstantní teplotě a tlaku. Vrcholy trojúhelníku představují čisté složky A,B,C, strany zobrazují směsi dvou složek a body plochy trojúhelníku směsi všech tří složek. Koncentrace dvou ze tří složek jsou nezávislé. Na obrázku jsou nezávislé koncentrace složek A a B, koncentrace složky C se dopočte z rovn.(20.2-6).

Diagram znázorňuje fázovou rovnováhu v tříložkové soustavě. Plocha trojúhelníku na *obr.20.7a* je rozdělena na dvě části rovnovážnou *křivkou rozpustnosti*. Oblast pod křivkou znázorňuje podmínky existence dvou kapalných fází, oblast nad křivkou je oblast jedné fáze. Bod K je *kritický bod*, který dělí křivku rozpustnosti na rafinátovou a extraktovou větev. Čára rafinátu znázorňuje rovnovážnou závislost $x_B(x_A)$ a čára extraktu rovnovážnou závislost $y_B(y_A)$. Bod R představuje rafinát a bod E extrakt, který je v rovnováze s rafinátem. Spojnice jejich složení, tj. složení rovnovážných fází, se nazývá *konoda* a vyjadřuje jeden bod rovnovážné závislosti $y_k(x_k)$. Na *obr.20.7b* je oblast dvou fází vymezena křivkou extraktu a oddělenou křivkou rafinátu. Graf neobsahuje kritický bod (tvar křivek závisí na složení, teplotě a tlaku směsi, *obr.20.7b* tedy může znázorňovat směs z *obr.20.7a* při jiné teplotě a tlaku). Rovnovážné údaje potřebné k nakreslení diagramu jsou např. v kap.XIV *Tabulek*.

Znázornění fázové rovnováhy v trojúhelníkovém diagramu umožňuje poměrně snadno dospět graficky k současnému řešení rovnic bilance a rovnováhy. Proto bylo před uplatněním počítačů grafické řešením jediným používaným způsobem výpočtu extrakce. V příloze B1.1.1 je vyložen postup grafického výpočtu jednostupňové extrakce pro tříložkovou směs.

Změna koncentrace extrahované složky při průchodu skutečným jednostupňovým extraktorem je menší než v rovnovážném stupni. Důvodem je konečná rychlost sdílení hmoty. Rychlost extrakce závisí na podmínkách proudění uvnitř extraktoru a na fyzikálně chemických vlastnostech obou fází. Popisuje se modelem kinetiky procesu, umožňuje odhadnout změnu koncentrace ve skutečném extrakčním stupni. Příklad takového modelování je v příl.B5. Zejména u procesů se složitým mechanismem, k nimž extrakce patří (viz poznámku po čarou na konci oddílu 22.4.2), je přístupnější výpočet pomocí pokusně určené účinnosti stupně. Její nevýhodou je, že se naměřené údaje nedají zobecnit. *Účinnost stupně E* je číslo, kterým je nutné vynásobit změnu koncentrace vypočtenou pro rovnovážný stupeň, aby se získala změna koncentrace ve skutečném stupni. Hodnota účinnosti je obecně pro každou složku jiná. Koncentraci na výstupu z rovnovážného stupně označíme hvězdičkou a pro skutečnou změnu koncentrace v rafinátové fázi pak máme rovnici

$$x_{kF} - x_k = E_{kx} (x_{kF} - x_k^*) \quad (20.2-8)$$

kde x_k je hmotnostní zlomek složky k v rafinátu ze skutečného stupně a x_k^* je hodnota rovnovážná k hodnotě koncentrace y_k^* v extraktu podle rovnovážného vztahu (20.2-1). Index x u veličiny E ukazuje, v jakém druhu koncentrace je účinnost vyjádřena. Definiční rovnice účinnosti stupně je tedy pro rafinátovou fázi

$$E_{kx} \equiv \frac{x_{kF} - x_k}{x_{kF} - x_k^*} \quad (20.2-9)$$

a podobně pro extraktovou fázi platí

$$E_{ky} \equiv \frac{y_k - y_{kS}}{y_k^* - y_{kS}} \quad (20.2-10)$$

kde je y_k hodnota koncentrace ve skutečném extraktu a y_k^* rovnovážná hodnota k hodnotě x_k^* v rafinátu. Umožňuje vypočítat koncentraci složky k na výstupu ze skutečného stupně ze změny koncentrace v rovnovážném stupni. S výjimkou binární směsi je hodnota účinnosti pro každou složku jiná. Větší část výkladu se však bude týkat binárních směsí, proto je index složky u symbolu účinnosti v dalším textu vynechán.

20.2.3 Opakovaná extrakce

Když se rafinát smísí s čerstvým extrakčním činidlem, dá se z něj získat další podíl extrahované složky. Ta přejde do extraktu, který vznikne po této další extrakci, a vzniklý rafinát je tedy o tuto složku ve srovnání s původním rafinátem ochuzen. Tento postup se nazývá opakovaná extrakce a opakuje se dokud koncentrace extrahované složky v rafinátu neklesne na požadovanou hodnotu, tj. dokud se neodstraní předepsaný podíl extrahované složky z rafinátu. Z tvaru bilančního schématu opakované extrakce na *obr.20.8* plyne, že je to obdoba křížového proudu v tepelném výměníku (viz *obr.17.1f*).

Fázovou rovnováhu mezi rafinátem a extraktem vystupujícím z libovolného stupně n vyjadřuje rovnice

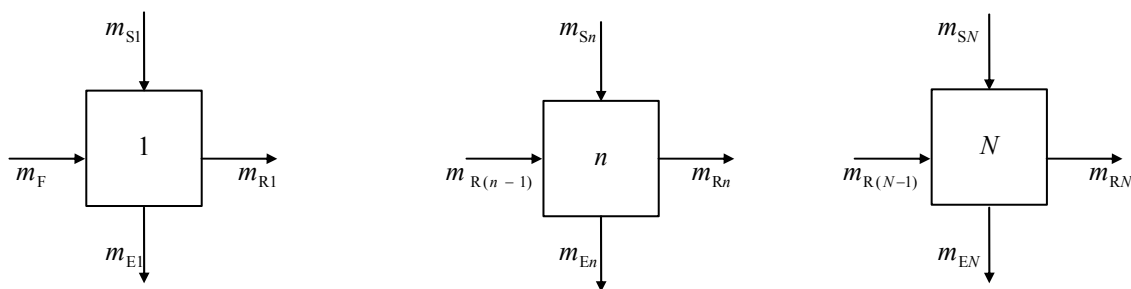
$$y_{kn}^* = \psi_{kn} x_{kn}^* \quad [k = 1, 2, \dots, K; n = 1, 2, \dots, N] \quad (20.2-11)$$

hmotnostní bilance složky k pro stupeň n je

$$m_{R(n-1)} x_{k(n-1)} + m_{Sn} y_{ks} = m_{Rn} x_{kn} + m_{En} y_{kn} = m_{Mn} z_{kn} \quad (20.2-12)$$

bilance proudů

$$m_{R(n-1)} + m_{Sn} = m_{Rn} + m_{En} = m_{Mn} \quad (20.2-13)$$



Obr.20.8. Bilanční schéma opakované extrakce

a vazba mezi koncentracemi (20.2-6)

$$\sum_{k=1}^K x_{kn} = 1, \quad \sum_{k=1}^K y_{kn} = 1 \quad [n = 1, \dots, N] \quad (20.2-14)$$

Změna koncentrace extrahované složky ve skutečném stupni se vypočte ze změny v rovnovážném stupni násobením hodnotou účinnosti. V období k rovnicím (20.2-9) a (20.2-10) platí pro obecný stupeň n

$$E_{xn} \equiv \frac{X_{k(n-1)} - X_{kn}}{X_{k(n-1)} - X_{kn}^*} \quad (20.2-15)$$

$$E_{yn} \equiv \frac{Y_{kn} - Y_{kS}}{Y_{kn}^* - Y_{kS}} \quad (20.2-16)$$

Postup řešení je opakování postupu pro jednostupňový extraktor, přičemž výsledek pro předešlý stupeň slouží jako vstupní údaj pro stupeň následující. Grafické i numerické řešení ukazuje *P17-1* v *Příkladech*. Typickou úlohou pro opakovanou extrakci je např. určení počtu stupňů potřebných k dosažení předepsané koncentrace extrahované složky v rafinátu, nebo určení koncentrace extrahované složky v rafinátu vystupujícím z extraktoru se známým počtem stupňů.

Postup řešení opakované extrakce tříložkové směsi v trojúhelníkovém diagramu se vykládá v příloze B1.1.2.

20.2.4 Stupňová extrakce při protiproudu

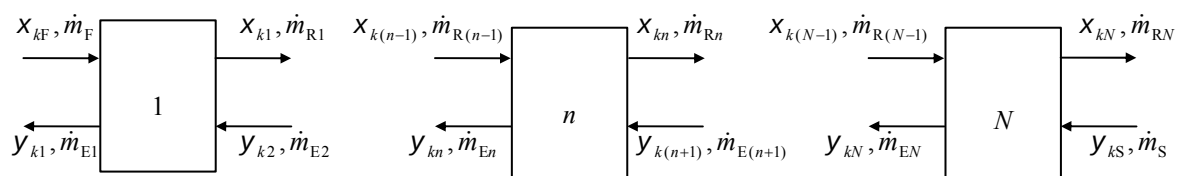
Opakování extrakce umožňuje zmenšit koncentraci extrahované složky v rafinátu na libovolně malou hodnotu. S rostoucím počtem stupňů však stoupá spotřeba rozpouštědla a klesá koncentrace extrahované složky v extraktu. Proto rostou náklady na extraktor, na extrakční činidlo a na oddělení extrahované složky od rozpouštědla. Postup je tedy ekonomicky nevýhodný. Růst spotřeby extrakčního činidla a pokles koncentrace extrahované složky v extraktu nenastává při protiproudu. Jeho bilanční schéma je na *obr.20.9*. Surovina se přivádí do stupně 1 a extrakční činidlo do posledního stupně N . Při průchodu extraktorem se rafinát ochuzuje o extrahovanou složku a extrakt se jí obohacuje. Koncentrace extrahované složky v produkovaném rafinátu je nejmenší a v produkovaném extraktu největší z jejích hodnot v celém extraktoru.

Pro obecný rovnovážný stupeň n platí rovnovážný vztah mezi koncentracemi extrahované složky k v extraktu a v rafinátu na výstupu

$$y_{kn} = \psi_{kn} x_{kn} \quad [k = 1, 2, \dots, K; n = 1, 2, \dots, N] \quad (20.2-17)$$

a hmotnostní bilance složky k při ustáleném ději bez chemické reakce

$$\dot{m}_{R(n-1)} x_{k(n-1)} + \dot{m}_{E(n+1)} y_{k(n+1)} = \dot{m}_{Rn} x_{kn} + \dot{m}_{En} y_{kn} \quad (20.2-18)$$



Obr.20.9. Bilanční schéma stupňové extrakce při protiproudu

Úpravou této rovnice vznikne rozdílový tvar bilance

$$\dot{m}_{R(n-1)} x_{k(n-1)} - \dot{m}_{En} y_{kn} = \dot{m}_{Rn} x_{kn} - \dot{m}_{E(n+1)} y_{k(n+1)} \quad (20.2-19)$$

Z *obr.20.9* je patrné, že rozdíly se týkají dvojic proudů v průřezu před a za stupněm n . Hodnota n

je libovolná v mezích 1 až N , rozdíly jsou tedy nezávislé na hodnotě n , tj. na místě v extraktoru a platí i pro jeho konce [viz rovn.(19.2-24a),(19.2-28)]. Rovn.(20.2-19) proto lze rozšířit na vztahy

$$\boxed{\begin{aligned} \dot{m}_{R(n-1)}X_{k(n-1)} - \dot{m}_{En}Y_{kn} &= \dot{m}_{Rn}X_{kn} - \dot{m}_{E(n+1)}Y_{k(n+1)} = \\ &= \dot{m}_F X_{kF} - \dot{m}_{E1}Y_{k1} = \dot{m}_{RN}X_{kN} - \dot{m}_S Y_{kS} = \Delta \dot{m}_k \end{aligned}} \quad (20.2-20)$$

První člen v rozdílu má fyzikální význam hmotnostního toku složky k ve směru proudění rafinátu a druhý člen představuje hmotnostní tok složky k ve směru proudění extraktu. Rozdíl těchto toků $\Delta \dot{m}_k$ je tedy stejný ve všech průřezích extraktoru. Totéž platí pro balance proudů

$$\dot{m}_{R(n-1)} - \dot{m}_{En} = \dot{m}_{Rn} - \dot{m}_{E(n+1)} = \dot{m}_F - \dot{m}_{E1} = \dot{m}_{RN} - \dot{m}_S = \Delta \dot{m} \quad (20.2-21)$$

kde $\Delta \dot{m}$ je výsledný tok hmotnosti proudů ve směru proudění rafinátu.

Numerický výpočet rovnovážného poměru je bez počítače časově náročný a ve cvičeních se řeší úlohy s tříložkovými směsmi grafickým postupem. Ten je vyložen v příl.B1.1.3.

Pro ilustraci přístupu k řešení extrakce směsí s více než třemi složkami na počítači, budou uvedeny bez podrobností vlastního řešení výchozí rovnice pro výpočet množství a složení proudů z jednotlivých stupňů extraktoru se známým počtem stupňů.

Pro obecný stupeň n platí rovn. (20.2-18), která je v anulovaném tvaru

$$\dot{m}_{R(n-1)}X_{k(n-1)} + \dot{m}_{E(n+1)}Y_{k(n+1)} - \dot{m}_{Rn}X_{kn} - \dot{m}_{En}Y_{kn} = 0 \quad (20.2-22)$$

Do rovnice se dosadí z rovnovážného vztahu (20.2-17) a upraví se na tvar

$$\dot{m}_{R(n-1)}X_{k(n-1)} - (\dot{m}_{Rn} + \dot{m}_{En}\psi_{kn})X_{kn} + \dot{m}_{E(n+1)}\psi_{k(n+1)}X_{k(n+1)} = 0 \quad (20.2-23)$$

Pro stupeň 1 plyne z rovn.(20.2-23) a (20.2-20)

$$-(\dot{m}_{R1} + \dot{m}_{E1}\psi_{k1})X_{k1} + \dot{m}_{E2}\psi_{k2}X_{k2} = -\dot{m}_F X_{kF} \quad (20.2-24)$$

a pro stupeň N je

$$\dot{m}_{R(N-1)}X_{k(N-1)} - (\dot{m}_{RN} + \dot{m}_{EN}\psi_{kN})X_{kN} = -\dot{m}_S Y_{kS} \quad (20.2-25)$$

Balance (20.2-23) až (20.2-25) se dají formálně přepsat do tvaru obsahujícího koeficienty A_n , B_n , C_n a D_n

$$A_n X_{k(n-1)} + B_n X_{kn} + C_n X_{k(n+1)} = D_n \quad (20.2-26)$$

Rovnice obsahuje proměnné $X_{k(n-1)}$, X_{kn} a $X_{k(n+1)}$ násobené koeficienty obsahujícími toky fází a rovnovážný poměr. Pro $n = 1, 2, \dots, N$ je to N rovnic, které lze vyjádřit jediným vztahem obsahujícím tzv. tridiagonální matici, která má kromě prvků ve třech úhlopříčkách ostatní prvky nulové

$$\begin{pmatrix} B_1 & C_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ A_2 & B_2 & C_2 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & A_{N-1} & B_{N-1} & C_{N-1} \\ 0 & \dots & 0 & 0 & A_N & B_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{k1} \\ X_{k2} \\ \dots \\ X_{k(N-1)} \\ X_{kN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \dots \\ D_{N-1} \\ D_N \end{pmatrix} \quad (20.2-27)$$

Při řešení této soustavy se nejprve vhodným způsobem odhadnou hodnoty jednotlivých koeficientů a iteračním postupem se tyto hodnoty zpřesňují (viz např. [46] nebo [72]). Při iteraci se využívá balance proudů, která je

podle rovn. (20.2-21) pro úsek mezi stupněm 1 a stupněm n

$$\dot{m}_{Rn} = \dot{m}_{E(n+1)} - \dot{m}_{E1} + \dot{m}_F \quad (20.2-28)$$

Pro zadaný počet stupňů se řešením obdrží hodnoty toků proudů vystupujících z každého stupně a jejich složení.

Skutečná změna koncentrace extrahované složky ve stupni n plyne z jeho účinnosti. Autorem nejčastěji používaného typu účinnosti při protiproudu fází je Murphree, podle kterého je účinnost stupně pro složku k v rafinátu

$$E_{xn} \equiv \frac{x_{k(n-1)} - x_{kn}}{x_{k(n-1)} - x_{kn}^*} = \frac{x_{k(n-1)} - x_{kn}}{x_{k(n-1)} - y_{kn} \psi_{kn}^{-1}(y_{kn})} \quad (20.2-29)$$

a v extraktu

$$E_{yn} \equiv \frac{y_{kn} - y_{k(n+1)}}{y_{kn}^* - y_{k(n+1)}} = \frac{y_{kn} - y_{k(n+1)}}{\psi_{kn}(x_{kn})x_{kn} - y_{k(n+1)}} \quad (20.2-30)$$

U jednostupňové či opakované extrakce si dovedeme představit, že se při jejich vsádkovém provedení rafinát a extrakt z rovnovážného stupně stýkaly tak dlouho, až mezi nimi nastala fázová rovnováha. Při protiproudu však je děj ustálený, do stupně neustále přitékají vstupní a odtékají výstupní proudy. Rovnovážná koncentrace v definici účinnosti je tedy pouze vypočtená, nikoli skutečná hodnota. Hodnota x_{kn}^* se spočte podle rovnovážného vztahu ze skutečné koncentrace složky k v odcházejícím extraktu, y_{kn} ,

$$x_{kn}^* \equiv \frac{y_{kn}}{\psi_{kn}(y_{kn})} \quad (20.2-31)$$

a hodnota y_{kn}^* se spočte podle rovnovážného vztahu ze skutečné koncentrace složky k v odváděném rafinátu, x_{kn} ,

$$y_{kn}^* \equiv \psi_{kn}(x_{kn})x_{kn} \quad (20.2-32)$$

Odlišnost účinnosti jednostupňové či opakované extrakce a Murphreeovy účinnosti bude graficky znázorněna v příštím oddílu.

Na činnost extraktoru má značný vliv velikost poměru toků extrakčního činidla a suroviny, tj. spotřeba reakčního činidla na jednotkové množství suroviny. S rostoucí hodnotou tohoto poměru klesá koncentrace extrahované složky v produkovaném extraktu a rafinátu. Rostou též náklady na spotřebu extrakčního činidla a jeho dopravu a náklady na oddělení extrahované složky od extrakčního činidla. Naproti tomu při velké hodnotě tohoto poměru postačí pro požadovanou změnu koncentrace v rafinátu menší počet stupňů, tedy investiční náklady jsou nižší. Při snižování hodnoty tohoto poměru roste koncentrace extrahované složky v extraktu, je menší spotřeba extrakčního činidla, které se snáze regeneruje. Ovšem pro požadovanou změnu koncentrace extrahované složky v rafinátu roste potřebný počet stupňů. Znázorňuje to *obr.20.14* pro extrakci s nemísitelnými rozpouštědly.

Poměr toků extrakčního činidla a suroviny nelze snižovat libovolně. Aby se složka extrahovala, musí mít její koncentrace ve vstupujícím rafinátu větší hodnotu než jaká by byla při rovnováze s vystupujícím extraktem. Když je konstantní tok suroviny a postupně se

snižuje tok extrakčního činidla, může při určité hodnotě toku extrakčního činidla v některém místě extraktoru koncentrace extrahované složky v rafinátu vstupujícím do stupně dosáhnout hodnoty rovnovážné s koncentrací ve vystupujícím extraktu a hybná síla extrakce je nulová. Tok extrakčního činidla, při kterém to nastane, se nazývá *minimální tok extrakčního činidla* a požadované změny koncentrace v extraktoru by se dosáhlo jen kdyby se počet stupňů blížil nekonečnu. Při dalším zmenšení hodnoty toku extrakčního činidla je nemožné v daném extraktoru dosáhnout požadované změny koncentrace extrahované složky.

20.3 Systémy s nemísitelnými rozpouštědly

20.3.1 Úvod

Výklad v tomto oddílu souvisí se skutečností, že ve směsi tří složek A, B, C je vzájemná rozpustnost rozpouštědla C obsaženého v surovině a rozpouštědla B obsaženého v extrakčním činidle někdy tak malá, že zavádíme jen malou chybu předpokladem, že tato rozpouštědla jsou navzájem nemísitelná. Pak rafinát, extrakt, extrakční činidlo a surovina jsou dvousložkové směsi a popis extrakce se výrazně zjednoduší.

Když se rozpouštědla B a C navzájem nemísí, nepřecházejí do druhé kapalně fáze a tudíž množství rozpouštědla B v extraktu a množství rozpouštědla C v rafinátu se při průchodu extraktorem nemění. S obdobou této situace se setkáme též např. při popisu absorpce (v kap.23), adsorpce (v kap.24) nebo sušení (v kap.25). Koncentrace extrahované složky se vztáhne na neměnné množství rozpouštědla ve směsi, tj. zavede se relativní hmotnostní zlomek transportované složky [viz kap.2, rovn. (2-14)]. V jeho definici se množství složky přecházející do druhé fáze vztahuje na množství složky, která je v druhé fázi nerozpustná (referenční složka, viz kap.2). Relativní zlomky označujeme velkými písmeny. Pro složku A v rafinátu či v surovině pak platí

$$m_A = \frac{m_A}{m_C} m_C = X_A m_C = x_A m_R = x_A (m_A + m_C) = x_A m_C (X_A + 1) \quad (20.3-1)$$

tj. referenční je složka C. V extraktu či v extrakčním činidle

$$m_A = \frac{m_A}{m_B} m_B = Y_A m_B = y_A m_E = y_A (m_A + m_B) = y_A m_B (Y_A + 1) \quad (20.3-2)$$

tj. referenční je složka B, přičemž

$$m_C = m_F (1 - x_{AF}) \quad ; \quad m_B = m_S (1 - y_{AS}) \quad (20.3-2a)$$

Přepočet hmotnostního zlomku x_A , y_A na relativní hmotnostní zlomek X_A , Y_A a naopak plyne z těchto rovnic, které je definují (viz též tabulku přepočtů v příloze prvního dílu tohoto skriptu).

20.3.2 Jednostupňová extrakce

Při průchodu extraktorem se vyskytuje současně v rafinátu a v extraktu pouze extrahovaná složka A. Proto k výpočtu postačí jediný rovnovážný vztah, a to pro složku A

$$Y_A^* \equiv \varphi_A X_A^* \quad (20.3-3)$$

Je zapsán ve tvaru formálně podobném vztahu (20.2-1) mezi obyčejnými hmotnostními zlomky. Z rovnic (20.2-1) a (20.3-1) až (20.3-3) se dá odvodit vyjádření rovnovážného poměru φ_A relativních hmotnostních zlomků pomocí rovnovážného poměru ψ_A obyčejných hmotnostních zlomků^{*)}

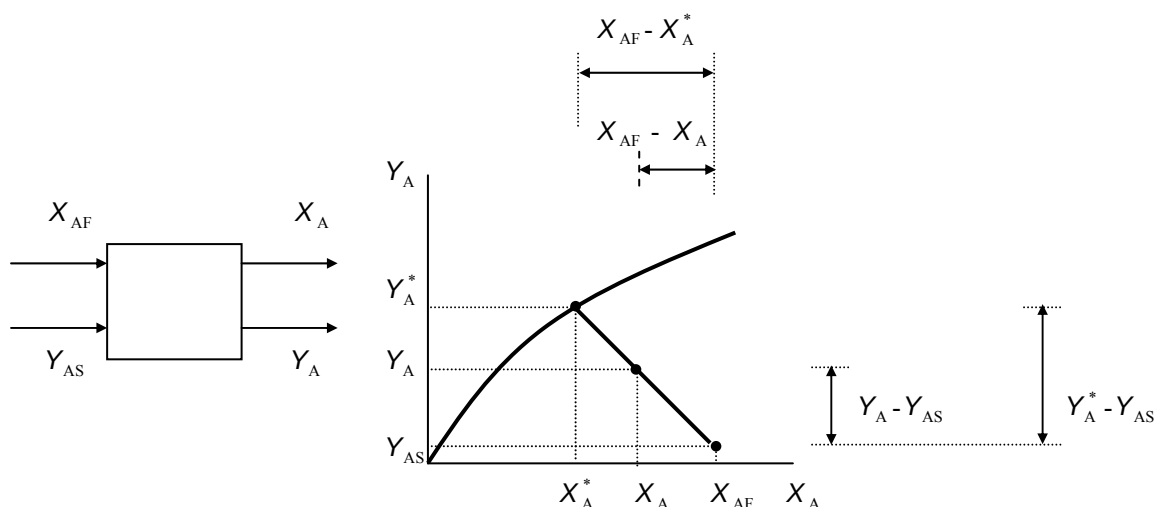
$$\varphi_A = \frac{\psi_A}{1 - (\psi_A - 1)X_A} = \psi_A + (\psi_A - 1)Y_A \quad (20.3-4)$$

Extrakci popisuje jediná rovnice balance hmotnosti a to balance hmotnosti složky A

$$m_C X_{AF} + m_B Y_{AS} = m_C X_A + m_B Y_A \quad (20.3-5)$$

Vypočtené hodnoty koncentrací pro rovnovážný stupeň korigujeme na koncentrace pro skutečný stupeň pomocí účinnosti. Je opět definována poměrem změny koncentrace ve skutečném a v rovnovážném stupni:

$$E_X \equiv \frac{X_{AF} - X_A}{X_{AF} - X_A^*} ; \quad E_Y \equiv \frac{Y_A - Y_{AS}}{Y_A^* - Y_{AS}} \quad (20.3-6)$$



Obr.20.10. Grafické znázornění extrakce ve skutečném stupni

Extrakce směsí s nemísitelnými rozpouštědly B a C se snadno znázorní graficky v souřadnicích relativních hmotnostních zlomků Y_A a X_A v obr.20.10. Křivka znázorňuje rovnovážný vztah a úsečka spojující body (X_{AF}, Y_{AS}) a (X_A^*, Y_A^*) je grafickým znázorněním balance hmotnosti (20.3-5). Lze ji totiž upravit na tvar

$$Y_A = -\frac{m_C}{m_B}(X_A - X_{AF}) + Y_{AS} \quad (20.3-5a)$$

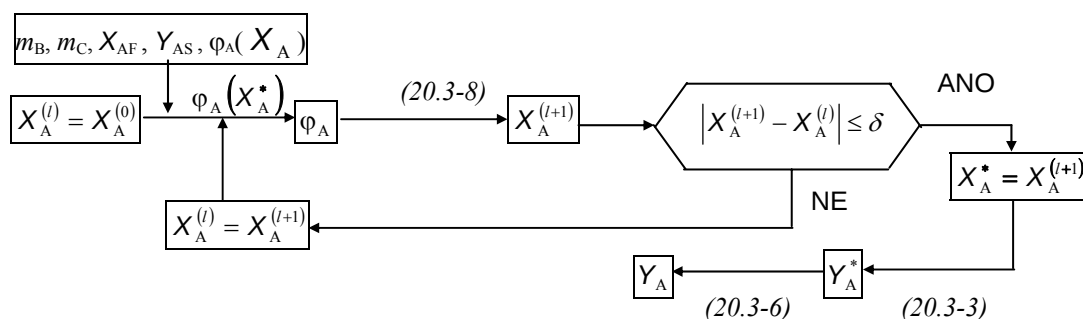
^{*)} Rovnovážený poměr ψ_A je veličina, která je pro rozličné směsi tabelována. V určitém rozmezí koncentrací může mít konstantní hodnotu. Rovnovážený poměr φ_A však i při $\psi_A = \text{konst}$ závisí na koncentraci, pokud $\psi_A \neq 1$.

a to je v diagramu závislosti Y_A na X_A rovnice přímky se směrnici $(-m_C / m_B)$. Nazývá se pracovní přímka. Na přímce leží bod (X_A^*, Y_A^*) pro výstup z rovnovážného stupně a bod (X_A, Y_A) pro výstup ze skutečného stupně. Z obrázku plyne, že pro jednostupňovou extrakci platí^{*)}

$$E_X = E_Y = E = \frac{X_{AF} - X_A}{X_{AF} - X_A^*} = \frac{Y_A - Y_{AS}}{Y_A^* - Y_{AS}} \quad (20.3-7)$$

Dosazením z rovnice fázové rovnováhy do hmotnostní bilance a úpravou dostáváme např. vzorec pro výpočet koncentrace extrahované složky v rafinátu z rovnovážného stupně

$$X_A^* = \left(1 + \frac{\varphi_A m_B}{m_C}\right)^{-1} \left(X_{AF} + Y_{AS} \frac{m_B}{m_C}\right) \quad (20.3-8)$$



Obr.20.I. Algoritmus výpočtu složení produktů jednostupňové extrakce

Tato koncentrace se dá spočítat, jsou-li známy hmotnosti obou rozpouštědel (m_B , m_C), koncentrace extrahované složky v surovině a v extrakčním činidle (X_{AF} , Y_{AS}) a hodnota rovnovážného poměru φ_A . Ta obecně závisí na složení produktů. Pokud je tato závislost významná a je známá, je třeba hodnotu X_A odhadnout a ze závislosti φ_A na koncentraci určit hodnotu φ_A . Po dosazení do rovn. (20.3-8) se získá přesnější odhad hodnoty X_A . Jestliže se za sebou následující odhady liší více než je přípustná odchylka, celý postup se opakuje. Řešení je tedy iterační. Z takto nalezené koncentrace se vypočte dosazením do vztahu pro fázovou rovnováhu (20.3-3) hodnota Y_A pro rovnovážný stupeň. Z definice účinnosti (20.3-6) se určí koncentrace na výstupu ze skutečného stupně. Grafické znázornění tohoto algoritmu je na obr.20.I.

Při výpočtech extrakce se používá bezrozměrové veličiny, *faktoru výměny* (výměníku) *hmoty* ζ a ζ' (v literatuře se vyskytují názvy absorpční a stripovací faktor) ^{**)}

^{*)} Tento vztah lze dokázat kombinací vzorce pro účinnost (20.3-6) s bilancí extrahované složky (20.3-5). Pro extrakci s omezeně mísitelnými rozpouštědly neplatí obdoba rovn.(20.3-7), neboť bilance hmotnosti není lineární vztah mezi y_k a x_k .

^{**)} Je to obdoba faktoru výměníku tepla, rovn.(17-41). Na rozdíl od něj však je pro tentýž výměník hmoty hodnota tohoto faktoru pro každou složku jiná, neboť obsahuje rovnovážný poměr, což je vlastnost složky. Proto dáváme přednost názvu faktor výměny hmoty. Z veličin ζ a ζ' má jedna hodnotu menší a druhá větší než jedna nebo jsou obě stejné a rovný jedné, jak plyne z jejich definice. Tvar zápisu se liší pro rozličná vyjádření koncentrace, jeho hodnota však na něm nezávisí. Uplatňuje se jak při stupňovém tak při spojitým kontaktu fází.

$$\boxed{\zeta = m_C / (\varphi_A m_B) = (\zeta')^{-1}} \quad (20.3-9)$$

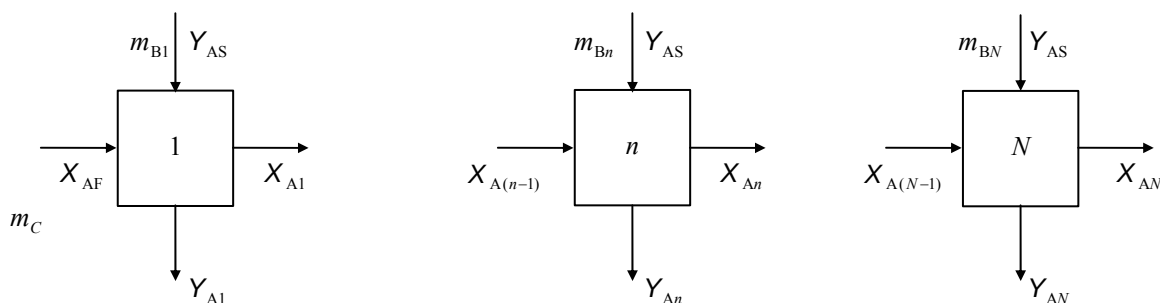
Pak z rovn.(20.3-8) dostáváme pro rovnovážný stupeň

$$X_A^* = (1 + \zeta')^{-1} \left(X_{AF} + Y_{AS} \frac{m_B}{m_C} \right) \quad (20.3-10)$$

Jinou úlohou může být určení spotřeby extrakčního činidla k tomu, aby se extrahoval předepsaný podíl složky A ze suroviny. Pak je známa hodnota X_A v rafinátu. Z ní plyne hodnota φ_A a složení extraktu v rovnovážném stupni.

20.3.3 Opakovaná extrakce

Bilanční schéma opakované extrakce je na *obr.20.11*. Pro libovolný rovnovážný stupeň n popisuje rovnovážný vztah mezi koncentracemi složky A ve vystupujících proudech rovnice



Obr.20.11. Bilanční schéma opakované extrakce (nemísitelná rozpouštědla)

$$Y_{An}^* = \varphi_{An} X_{An}^* \quad (20.3-11)$$

Podle *obr.20.11* je bilance hmotnosti složky A pro libovolný stupeň n

$$m_C X_{A(n-1)} + m_{Bn} Y_{AS} = m_C X_{An} + m_{Bn} Y_{An} \quad (20.3-12)$$

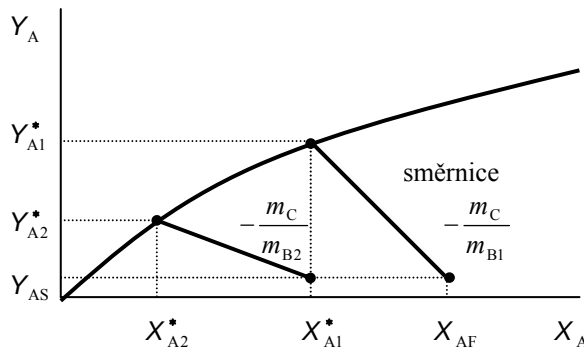
Jestliže známe množství a složení suroviny a extrakčního činidla, určíme hodnoty X_{An} a Y_{An} pro každý rovnovážný stupeň tak, že pro něj řešíme rovnici fázové rovnováhy a rovnici hmotnostní bilance. Když spojíme rovnice (20.3-11) a (20.3-12) a podle rovn.(20.3-9) zavedeme faktor výměny hmoty pro stupeň n

$$\zeta_n = \frac{m_C}{\varphi_{An} m_{Bn}} = (\zeta'_n)^{-1} \quad (20.3-13)$$

dostaneme po úpravě (viz přílohu B1.2.1) pro rovnovážný stupeň vztah

$$\frac{X_{A(n-1)}^* - (Y_{AS} / \varphi_{An})}{X_{An}^* - (Y_{AS} / \varphi_{An})} = \zeta'_n + 1 \quad (20.3-14)$$

Umožňuje spočítat změnu koncentrace ve stupni n . Základní úlohy jsou buď určit počet rovnovážných stupňů N potřebný k dosažení předepsané hodnoty koncentrace ve výsledném rafinátu X_{AN} nebo hodnotu X_{AN} ze zadané hodnoty N .



Obr.20.11a. Grafické řešení opakované dvoustupňové extrakce (nemísitelná rozpouštědla, rovnovážné stupně)

Účinnost stupně při opakované extrakci je pro libovolný stupeň n

$$E_{X_n} = \frac{X_{A(n-1)} - X_{An}}{X_{A(n-1)} - X_{An}^*} ; \quad E_{Y_n} = \frac{Y_{An} - Y_{AS}}{Y_{An}^* - Y_{AS}} \quad (20.3-15)$$

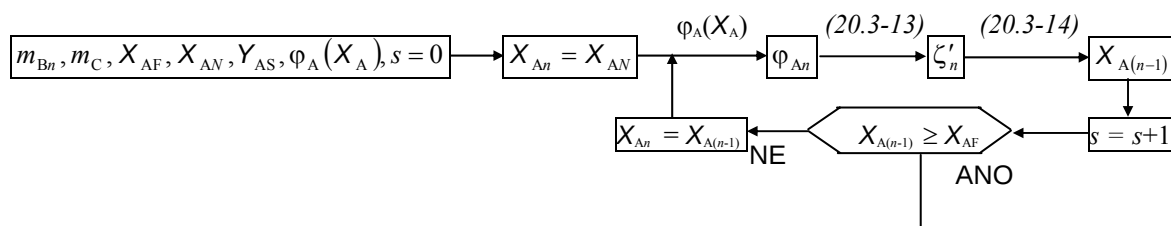
Je shodná pro obě fáze

$$E_{X_n} = E_{Y_n} = E_n \quad (20.3-16)$$

Jestliže se spojí hmotnostní bilance s rovnovážným vztahem a definicí účinnosti, dá se pro skutečný stupeň n odvodit rovnice (viz přílohu B1.2.1)

$$\frac{X_{An} - (Y_{AS} / \varphi_{An})}{X_{A(n-1)} - (Y_{AS} / \varphi_{An})} = 1 - \frac{\zeta'_n E_n}{\zeta'_n + 1} = 1 - \frac{E_n}{\zeta'_n + 1} \quad (20.3-17)$$

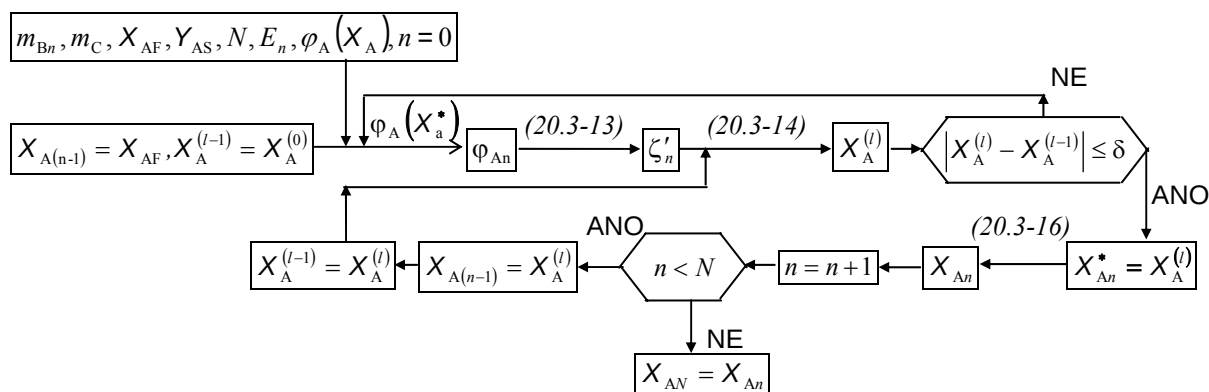
Má-li se určit počet rovnovážných stupňů potřebných k tomu, aby v rafinátu z posledního stupně byla koncentrace X_{AN} , je třeba znát hodnoty m_{Bn} , m_C , X_{AF} , X_{AN} , Y_{AS} a závislost $\varphi_A(X_A)$. Pro libovolný stupeň n se dá určit z koncentrace X_{An} hodnota rovnovážného poměru φ_{An} a faktoru výměny hmoty ζ'_n . Vyjde se ze známé hodnoty X_{AN} , dosadí do rovn.(20.3-14) a vypočte se $X_{A(n-1)}$, $\varphi_{A(n-1)}$ a $\zeta'_{(n-1)}$. Dosadí se do rovn.(20.3-14) atd. a výpočet se ukončí, když koncentrace dosáhne nebo překročí hodnotu X_{AF} . Počet opakování výpočtu je roven počtu potřebných stupňů. Graficky to znázorňuje obr.20.II.



$$N = S + z \leftarrow z = \frac{X_{A(n-1)} - X_{AF}}{X_{A(n-1)} - X_{An}} \leftarrow$$

Obr.20.II. Algoritmus určení počtu rovnovážných stupňů při opakované extrakci

Je-li úkolem zjistit, jaká bude hodnota X_{AN} v existujícím extraktoru se známou hodnotou N a jsou-li dále zadány hodnoty X_{AF} , Y_{AS} , m_{Bn} , m_C , E_n a závislost $\varphi_A(X_A)$, je nutno při výpočtu vycházet z hodnoty X_{AF} , tedy od stupně 1. Protože však není hodnota X_{A1} známa, je třeba ji odhadnout a odhad zpřesňovat tak, aby byla splněna platnost rovn.(20.3-17). Řešení je tedy iterační a po splnění příslušné podmínky se dosadí nalezená hodnota X_{An} do rovn.(20.3-17) za $X_{A(n-1)}$ a z rovnice se určuje hodnota X_{An} pro další stupeň. Tak se pokračuje až ke stupni N . Na obr.20.III je algoritmus tohoto výpočtu.



Obr.20.III. Výpočet složení rafinátu při opakované extrakci v extraktoru s daným počtem reálných stupňů

Střední hodnotu koncentrace složky A v extraktu, $\langle Y_A \rangle$, určíme z bilance pro celý extraktor

$$(X_{AF} - X_{AN})m_C = \sum_{n=1}^N (Y_{An} - Y_{AS})m_{Bn} = (\langle Y_A \rangle - Y_{AS}) \sum_{n=1}^N m_{Bn} \quad (20.3-18)$$

20.3.3.1 Konstantní hodnoty rovnovážného poměru, množství extrakčního činidla do každého stupně a účinnosti stupně

Výpočet extraktoru se velmi zjednoduší za podmínek $\varphi_{An} = \varphi_A = \text{konst}$, $m_{Bn} = m_B = \text{konst}$ a $E_n = E = \text{konst}$. Pak bude též

$$\zeta_n = (\zeta_n')^{-1} = \zeta = (\zeta') = \text{konst} \quad (20.3-19)$$

Protože platí

$$\frac{X_{AF} - (Y_{AS} / \varphi_A)}{X_{AN} - (Y_{AS} / \varphi_A)} = \frac{X_{AF} - (Y_{AS} / \varphi_A)}{X_{A1} - (Y_{AS} / \varphi_A)} \frac{X_{A1} - (Y_{AS} / \varphi_A)}{X_{A2} - (Y_{AS} / \varphi_A)} \cdots \frac{X_{A(N-1)} - (Y_{AS} / \varphi_A)}{X_{AN} - (Y_{AS} / \varphi_A)} \quad (20.3-20)$$

dostáváme podle rovn.(20.3-14) vzorec

$$\frac{X_{AF} - (Y_{AS} / \varphi_A)}{X_{AN} - (Y_{AS} / \varphi_A)} = (\zeta' + 1)^N \quad (20.3-21)$$

Takto lze činnost extraktoru s rovnovážnými stupni popsat jednou rovnicí, která obsahuje jeho hlavní charakteristiky, tj. počet rovnovážných stupňů, toky obou fází, rovnovážný poměr a koncové koncentrace extrahované složky. Umožňuje kteroukoli z těchto veličin přímo určit ze známých hodnot zbývajících veličin.

Pro extraktor se skutečnými stupni se dá odvodit vzorec (viz přílohu B1.2.1)

$$\frac{X_{AN} - (Y_{AS} / \varphi_A)}{X_{AF} - (Y_{AS} / \varphi_A)} = \left(1 - \frac{\zeta' E}{\zeta' + 1}\right)^{N_s} = \left(1 - \frac{E}{\zeta + 1}\right)^{N_s} \quad (20.3-22)$$

který má obdobný význam.

Podmínka $m_{Bn} = \text{konst}$ je většinou splněna stejně tak jako konstantnost hodnoty účinnosti stupně. Ovšem hodnota rovnovážného poměru obecně významně závisí na složení směsi. Vzorců (20.3-21) a (20.3-22) se dá přesto použít, jestliže se dosadí střední hodnota rovnovážného poměru (aritmetický či geometrický střed hodnot pro stupně 1 a N). Chyba výsledku pak roste s hodnotou odchylky od lineární závislosti rovnovážného poměru na koncentraci. Obecně výsledek slouží jako orientační údaj, např. při předběžných výpočtech nebo ke kontrole výsledku z počítače.

Opakovanou extrakci lze řešit v diagramu závislosti Y_A na X_A znázorněném na *obr.20.11*. Rovnovážný vztah je znázorněn křivkou a bilance hmotnosti pro libovolný stupeň příslušnou úsečkou. Konstrukce úseček je patrná z obrázku, tj. pro stupeň n se vychází z bodu $(X_{A(n-1)}, Y_{AS})$ a nakreslí se přímka se směrnici $(-m_C / m_{Bn})$. Její průsečík s čarou rovnováhy poskytuje hodnoty koncentrací v proudech vystupujících ze stupně n , tj. bod (X_{An}, Y_{An}) . Tento postup se opakuje z bodu (X_{An}, Y_{AS}) . Počet těchto úseček udává potřebný počet rovnovážných stupňů k překonání rozdílu koncentrací od X_{AF} do X_{AN} . Podobně se řeší úloha určení výstupní koncentrace, je-li známý počet rovnovážných stupňů. Konstrukce skutečných stupňů plyne z uplatnění účinnosti stupně (viz *obr.20.10*).

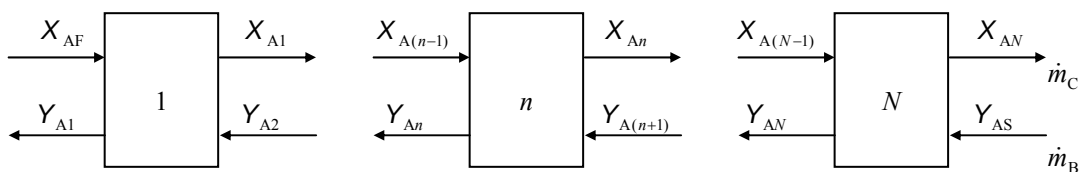
20.3.4 Stupňová extrakce při protiproudu

Bilanční schéma stupňové extrakce při protiproudu znázorňuje *obr.20.12*. Pro libovolný rovnovážný stupeň n platí rovnovážný vztah mezi koncentracemi složky A ve vystupujících proudech

$$Y_{An} = \varphi_{An} X_{An} \quad (20.3-23)$$

a změnu koncentrace při průchodu stupněm vyjadřuje bilance hmotnosti složky A

$$\dot{m}_C X_{A(n-1)} + \dot{m}_B Y_{A(n+1)} = \dot{m}_C X_{An} + \dot{m}_B Y_{An} \quad (20.3-24)$$



Obr.20.12. Bilanční schéma stupňové extrakce při protiproudu

Pro výpočet je výhodný rozdílový tvar, do kterého jsou zahrnuty i koncové proudy [viz rovn. (20.2-20)], tj.

$$\boxed{\dot{m}_C X_{A(n-1)} - \dot{m}_B Y_{An} = \dot{m}_C X_{An} - \dot{m}_B Y_{A(n+1)} = \dot{m}_C X_{AF} - \dot{m}_B Y_{A1} = \dot{m}_C X_{AN} - \dot{m}_B Y_{AS}} \quad (20.3-25)$$

Řešení extraktoru je postupným řešením bilančního a rovnovážného vztahu pro každý stupeň.

Bilanci (20.3-25) lze spojit s rovnovážným vztahem (20.3-23) a do rovnice zavést faktor výměny hmoty

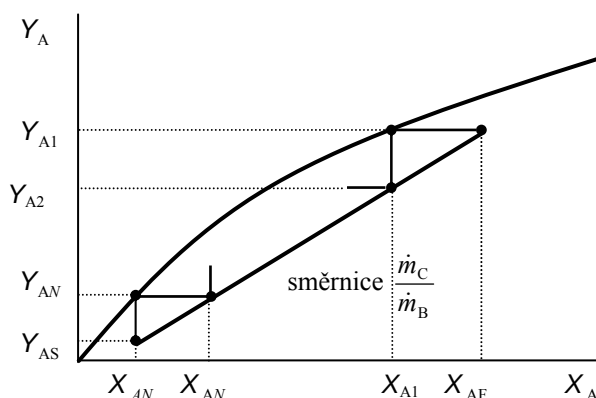
$$\zeta_n \equiv (\zeta'_n)^{-1} \equiv \frac{\dot{m}_C}{\varphi_{An} \dot{m}_B} \quad (20.3-26)$$

Kombinace rovnic (20.3-25), (20.3-23) a (20.3-26) se dá upravit na tvar vhodný pro postup od stupně N ke stupni 1

$$X_{A(n-1)} = \zeta'_n X_{An} + X_{AF} - \dot{m}_B Y_{A1} / \dot{m}_C = \zeta'_n X_{An} + X_{AN} - \dot{m}_B Y_{AS} / \dot{m}_C \quad (20.3-27)$$

nebo na tvar vhodný pro postup od stupně 1 ke stupni N

$$Y_{A(n+1)} = \zeta_n Y_{An} + Y_{A1} - \dot{m}_C X_{AF} / \dot{m}_B = \zeta_n Y_{An} + Y_{AS} - \dot{m}_C X_{AN} / \dot{m}_B \quad (20.3-28)$$



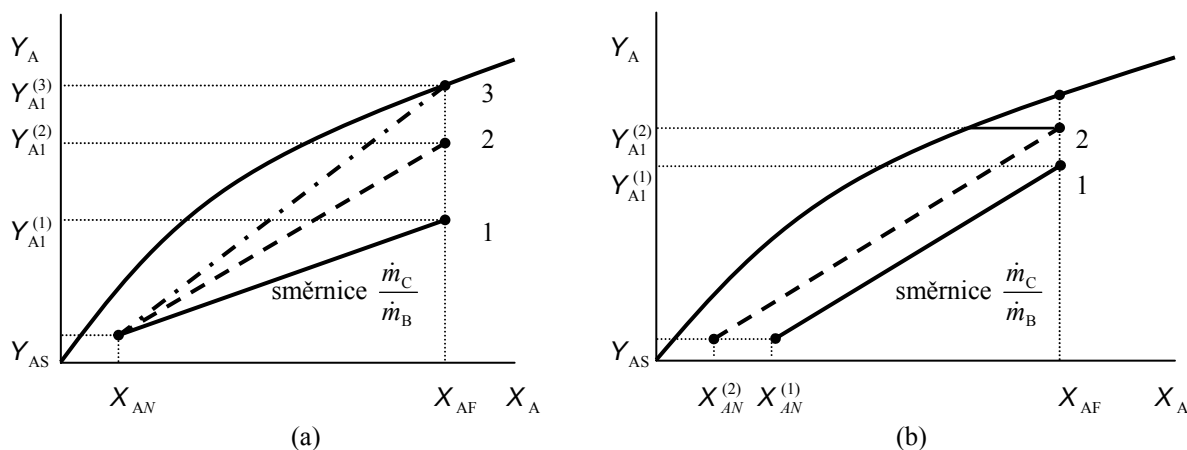
Obr.20.13. Grafické řešení extrakce s rovnovážnými stupni při protiproudu

Graficky znázorňuje extrakci při protiproudu obr.20.13. V grafu závislosti Y_A na X_A představuje křivka rovnovážný vztah (20.3-23) a spojnice bodů (X_{AF}, Y_{A1}) a (X_{AN}, Y_{AS}) bilanční vztah (20.3-25), který je v grafu úsečkou se směrnici

$$\frac{\dot{m}_C}{\dot{m}_B} = \frac{Y_{A1} - Y_{AS}}{X_{AF} - X_{AN}} \quad (20.3-29)$$

Podle rovnic (20.3-25) a (20.3-23) a *obr.20.13* představuje pravoúhlý trojúhelník tvořený body (X_{AF}, Y_{A1}) , (X_{A1}, Y_{A1}) a (X_{A1}, Y_{A2}) změnu koncentrace při průchodu rovnovážným stupněm 1. Počet rovnovážných stupňů potřebných k požadovanému dělení tedy můžeme určit nakreslením pravoúhlých stupňů mezi bilanční úsečkou a čarou rovnováhy v rozmezí bodů (X_{AF}, Y_{A1}) a (X_{AN}, Y_{AS}) .

Pro určitou rovnovážnou čáru a určitou celkovou změnu koncentrace závisí počet rovnovážných stupňů na poloze bilanční úsečky vzhledem k rovnovážné křivce. Na *obr.20.14a* je znázorněna změna polohy bilanční úsečky se změnou hmotnostního toku extrakčního činidla [viz rovn. (20.3-29)]. Vzhledem k čáře 1 způsobuje menší hodnota $\dot{m}_B$, tj. menší spotřeba extrakčního činidla, větší sklon úsečky (úsečka 2), která se tak přiblíží rovnovážné čáře. Z obrázku je patrné, že pak bude velikost pravoúhlých kroků menší, tedy na stejnou vzdálenost odpovídající rozdílu $(X_{AF} - X_{AN})$ se jich vejde více. Přitom koncentrace extrahované složky A ve výsledném extraktu, tj. hodnota Y_{A1} , vzroste. Z hlediska nákladů na extrakci znamená zvětšení počtu rovnovážných stupňů vzrůst velikosti zařízení, tedy jeho ceny. Naproti tomu se však sníží provozní náklady jednak zmenšením nákladů na oddělení extrahované složky od extrakčního činidla, neboť její koncentrace se ve výsledném extraktu zvětší, jednak zmenšením nákladů na dopravu extrakčního činidla. Setkali jsme se tak s poměrně častou situací, kdy změna podmínek procesu vyvolává navzájem protichůdné výsledky. Je to obdoba např. hledání optimálního průměru trubek potrubní soustavy (viz kap.5). Zde zřejmě existuje optimální hmotnostní tok extrakčního činidla, pro který jsou celkové náklady na extrakci minimální.



Obr.20.14. Vliv změny polohy bilanční úsečky na činnost absorbéru

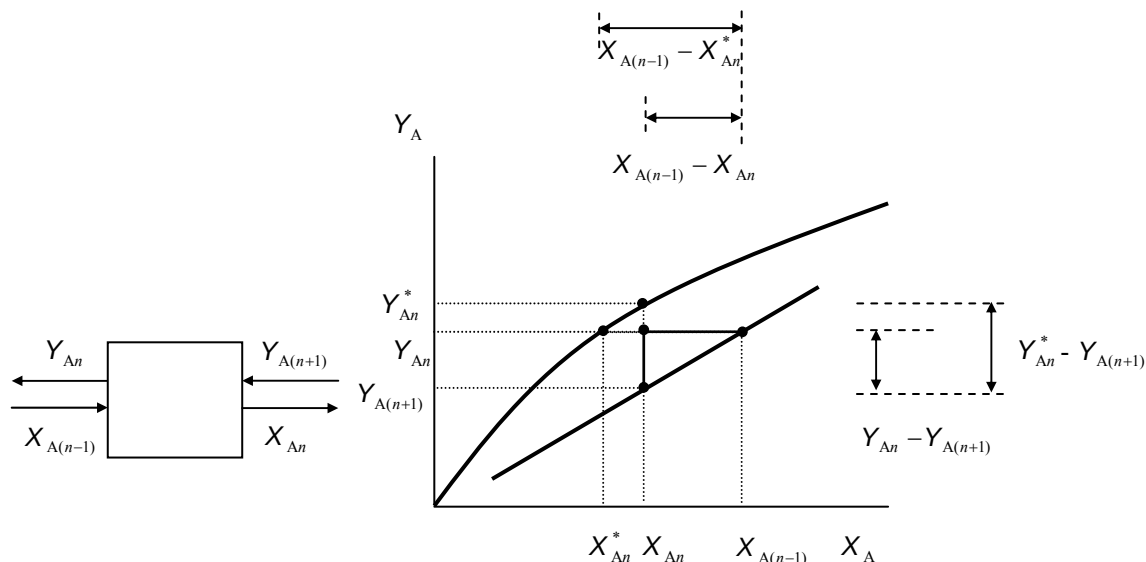
a) vliv spotřeby extrakčního činidla

b) vliv počtu stupňů

Další významný závěr, který vyplývá z *obr.20.14a*, je ten, že pokud se chce dosáhnout zadané koncentrace složky A v rafinátu, nemůže se snižovat spotřeba extrakčního činidla libovolně. Maximální možnou směrnici má bilanční úsečka 3, která se dotýká rovnovážné čáry v bodě se souřadnicí X_{AF} . Tomu odpovídá *minimální spotřeba extrakčního činidla* $\dot{m}_{Bmin}$. Pak by počet stupňů extraktoru vzrostl nade všechny meze (v bezprostřední blízkosti bodu dotyku jsou pravoúhlé kroky infinitezimální) a mezi koncentrací extrahované složky ve

výsledném extraktu a její koncentrací ve vstupující surovině by byl rovnovážný vztah. Minimální tok extrakčního činidla je významnou charakteristikou procesu a má obdobu při protiproudu v dalších procesech výměny hmoty. Při dalším snížení toku činidla by se již nedosáhlo požadované změny koncentrace.

Jiná změna polohy pracovní přímky nastane tehdy, když se ponechají stejné jak vstupní koncentrace extrahované složky, tak toky obou rozpouštědel, ale změní se počet stupňů extraktoru (viz *obr.20.14b*). Zvětšení počtu stupňů posune pracovní přímku směrem k rovnovážné čáře (přechod od úsečky 1 k úsečce 2), přičemž směrnice se nemění. Tím se zmenší koncentrace extrahované složky v rafinátu a zvětší její koncentrace v extraktu, tj. vzroste množství složky přešlé do extraktu.



Obr.20.15. Grafické znázornění skutečného stupně pro extrakci při protiproudu

Skutečné stupně se charakterizují jejich účinností. Jak bylo uvedeno v předešlém oddílu, při protiproudu se běžně užívá Murphreeovy účinnosti. Graficky ji znázorňuje *obr.20.15* a definována je rovnicemi pro rafinát

$$E_{X_n} \equiv \frac{X_{A(n-1)} - X_{An}}{X_{A(n-1)} - X_{An}^*} = \frac{X_{A(n-1)} - X_{An}}{X_{A(n-1)} - (Y_{An} / \varphi_{An})} \quad (20.3-30)$$

a pro extrakt

$$E_{Y_n} \equiv \frac{Y_{An} - Y_{A(n+1)}}{Y_{An}^* - Y_{A(n+1)}} = \frac{Y_{An} - Y_{A(n+1)}}{\varphi_{An} X_{An} - Y_{A(n+1)}} \quad (20.3-31)$$

Veličiny označené hvězdičkou

$$Y_{An}^* \equiv \varphi_{An}(X_{An})X_{An} \quad ; \quad X_{An}^* \equiv Y_{An} / \varphi_{An}(Y_{An}) \quad (20.3-32)$$

představují hodnotu koncentrace složky *A* v jedné fázi vystupující ze stupně *n*, jakou bychom vypočetli z rovnovážného vztahu, kdybychom do něj dosadili skutečnou koncentraci této složky ve druhé vystupující fázi. Je to tedy nadefinovaná rovnovážná koncentrace na rozdíl od jednostupňové nebo opakované extrakce, kde platí $Y_{An}^* = \varphi_{An} X_{An}^*$.

Mezi účinnostmi E_{Xn} a E_{Yn} existuje vztah, který plyne z definic (20.3-30,31) a z bilance (20.3-25)

$$E_{Yn} = [1 + (E_{Xn}^{-1} - 1)\zeta'_n]^{-1} \quad (20.3-33)$$

Výpočet reálného extraktoru se skládá z postupného řešení rovnic bilance hmotnosti, rovnovážného vztahu a vyjádření účinnosti stupně pro každý stupeň extraktoru.

Obdoba rovnic (20.3-27) a (20.3-28) se dá odvodit i pro reálné stupně (viz příl. B1.2.2)

$$X_{A(n-1)} = \varepsilon_{Yn} X_{An} + E_{Yn} (X_{AN} - \dot{m}_B Y_{AS} / \dot{m}_C) \quad (20.3-34a)$$

$$a$$

$$Y_{A(n+1)} = \varepsilon_{Xn} Y_{An} - E_{Xn} (\dot{m}_C X_{AF} / \dot{m}_B - Y_{A1}) \quad (20.3-34b)$$

kde

$$\varepsilon_{Xn} = 1 - E_{Xn} (1 - \zeta_n) \quad (20.3-35a)$$

$$\varepsilon_{Yn} = 1 - E_{Yn} (1 - \zeta'_n) \quad (20.3-35b)$$

přičemž platí

$$\varepsilon_{Xn} = \varepsilon_{Yn}^{-1} \quad (20.3-35c)$$

$$\varepsilon_{Xn} = \varepsilon_{Yn} = 1 \quad [\zeta = \zeta'_n = 1]$$

$$\varepsilon_{Xn} = \zeta_n \quad [E_{Xn} = 1]$$

$$\varepsilon_{Yn} = \zeta'_n \quad [E_{Yn} = 1] \quad (20.3-35d)$$

V Příkladech kap.17 se používá vztah obdobný k rovn.(20.2-23)

$$(\zeta'_{(n+1)} / E_{X(n+1)}) X_{A(n+1)} - [\mu_{X(n+1)} + (\zeta'_n / E_{Xn})] X_{An} + \mu_{Xn} X_{A(n-1)} = 0 \quad (20.3-36a)$$

$$a$$

$$(\zeta_{(n-1)} / E_{Y(n-1)}) Y_{A(n-1)} - [\mu_{Y(n-1)} + (\zeta_n / E_{Yn})] Y_{An} + \mu_{Yn} Y_{A(n+1)} = 0 \quad (20.3-36b)$$

kde

$$\mu_{Xn} = 1 + \zeta'_n (E_{Xn}^{-1} - 1) \quad (20.3-37a)$$

$$\mu_{Yn} = 1 + \zeta_n (E_{Yn}^{-1} - 1) \quad (20.3-37b)$$

přičemž platí

$$\mu_{Zn} = 1 \quad [Z = X, Y; E_{Zn} = 1] \quad (20.3-38a)$$

$$\mu_{Zn} = E_{Zn}^{-1} \quad [Z = X, Y; \zeta_n = \zeta'_n = 1] \quad (20.3-38b)$$

Vztah mezi koeficienty ε a μ je $\varepsilon_{Xn} = \zeta_n E_{Xn} \mu_{Xn}$ a $\varepsilon_{Yn} = \zeta'_n E_{Yn} \mu_{Yn}$.

Je-li k dispozici hodnota celkové účinnosti extraktoru E_c definované rovn.(19.2-30), určí se počet skutečných stupňů N_s z počtu rovnovážných stupňů N podle rovnice

$$N_s = N / E_c \quad (20.3-39)$$

20.3.4.1 Konstantní hodnota rovnovážného poměru a účinnosti stupně

Výpočet extraktoru se silně zjednoduší, když platí

$$\varphi_{An} = \varphi_A = \text{konst}, \quad E_{Zn} = E_Z = \text{konst} \quad [Z = X, Y] \quad (20.3-40)$$

Z toho pak vyplývá

$$\zeta_n = \zeta = \text{konst}, \quad \varepsilon_{Zn} = \varepsilon_Z = \text{konst} \quad [Z = X, Y] \quad (20.3-41)$$

Za uvedených podmínek se obdrží pro celý extraktor s rovnovážnými stupni vzorec (viz přílohu B1.2.2)

$$\frac{X_{AN} - (Y_{AS} / \varphi_A)}{X_{AF} - (Y_{AI} / \varphi_A)} = \zeta^N \quad [\varphi_A = \text{konst}] \quad (20.3-42)$$

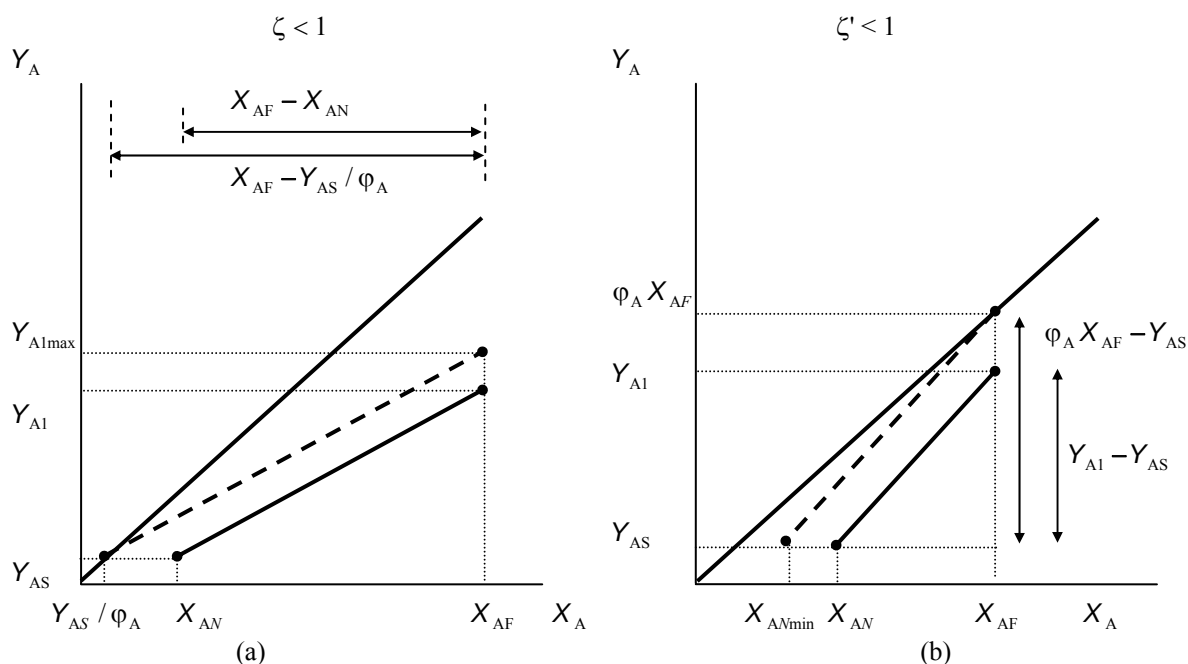
ze kterého se spočte libovolná neznámá z hodnot ostatních veličin. Rovnice ukazuje, že při zadaných hodnotách X_{AF} a X_{AN} klesá významně spotřeba extrakčního činidla s rostoucím počtem stupňů (závislost je exponenciální).

Obdoba rovn.(20.3-42) pro skutečné stupně je vzorec

$$\frac{X_{AN} - (Y_{AS} / \varphi_A)}{X_{AF} - (Y_{AI} / \varphi_A)} = \varepsilon_X^{N_s} \quad [\varphi_A = \text{konst}, E_Z = \text{konst}] \quad (20.3-43)$$

odvozený v příloze B1.2.2. Poskytuje vztah mezi počtem skutečných stupňů a koncovými koncentracemi extrahované složky v extraktoru.

Když nejsou splněny podmínky platnosti uvedených vzorců, dá se jich použít k orientačním výpočtům, dosadí-li se zprůměrněné hodnoty rovnovážného poměru a účinnosti stupně.



Obr.20.16. Grafické znázornění účinku výměny hmoty

Podobně jako u tepelných výměníků [viz rovn.(17-28)] se činnost výměníku hmoty charakterizuje tzv. *účinkem výměníku hmoty*. Pro rafinátovou fázi je definován vzorcem

$$\eta_X \equiv \frac{X_{AF} - X_{AN}}{X_{AF} - (Y_{AS} / \varphi_A)} \quad (20.3-44)$$

Je to skutečná změna koncentrace extrahované složky v celém extraktoru lomená její maximálně možnou změnou. Graficky je účinek znázorněn obr.20.16. Je-li $\varphi_A = \text{konst}$, rovnovážný vztah zobrazuje přímka, která prochází počátkem a hodnota její směrnice se rovná hodnotě rovnovážného poměru. Bilanci znázorňuje úsečka vymezená koncentracemi (X_{AF}, Y_{A1}) a (X_{AN}, Y_{AS}) , která má směrnici $\dot{m}_C / \dot{m}_B$.

Porovnává se skutečný výměník hmoty s výměníkem, v němž se dosáhne maximální možné změny koncentrace při stejných výchozích parametrech procesu, tj. při stejných hodnotách $X_{AF}, Y_{AS}, \dot{m}_B, \dot{m}_C$. Větší změny koncentrace se dá dosáhnout zvětšením počtu stupňů. Z diskuse vlivu spotřeby extrakčního činidla na činnost extraktoru je známo, že když se bilanční úsečka dotkne rovnovážné čáry, vzroste počet potřebných stupňů nade všechny meze. Je tedy rozdíl $X_{AF} - (Y_{AS} / \varphi_A)$, kde $Y_{AS} / \varphi_A = X_{ANmin}$, maximálním možným rozdílem koncentrací extrahované složky v rafinátu. Faktor výměny hmoty ζ je vlastně poměr směrnic bilanční úsečky a přímky rovnováhy. Na obr.20.16a je hodnota $\varphi_A > \dot{m}_C / \dot{m}_B$, a proto $\zeta < 1$.

Obr.20.16b ukazuje situaci, kdy je hodnota $\varphi_A < \dot{m}_C / \dot{m}_B$, tj. $\zeta' < 1$. Vystihuje se účinkem definovaným pro koncentrace extrahované složky v extraktu

$$\eta_Y \equiv \frac{Y_{A1} - Y_{AS}}{\varphi_A X_{AF} - Y_{AS}} \quad (20.3-45)$$

tj. $Y_{A1max} = \varphi_A X_{AF}$. Kombinací rovnic (20.3-44), (20.3-45) a (20.3-25) obdržíme vztah mezi oběma účinky

$$\eta_Y = \zeta \eta_X \quad (20.3-46)$$

Dosažením účinku převedeme rovn. (20.3-42) na vztah mezi třemi bezrozměrovými proměnnými, jež globálně charakterizují činnost výměníku hmoty (viz přílohu B1.2.2). Z rovn. (20.3-42) obdržíme vzorec

$$\zeta^N = \frac{1 - \eta_X}{1 - \eta_Y} = \frac{1 - \eta_X}{1 - \zeta \eta_X} = \frac{1 - \eta_Y / \zeta}{1 - \eta_Y} \quad (20.3-47)$$

Z této rovnice dostáváme vzorec pro výpočet účinku, jehož hodnota poskytuje výstupní koncentraci extrahované složky. Např. dostaneme

$$\eta_X = \frac{1 - \zeta^N}{1 - \zeta^{N+1}} \quad (20.3-48)$$

Počet rovnovážných stupňů se vypočte z rovnice (20.3-47) jejím logaritmováním, např.

$$N = (\ln \zeta)^{-1} \ln \frac{1 - \eta_X}{1 - \zeta \eta_X} \quad (20.3-49)$$

Tyto univerzální vzorce umožňují z hodnot dvou bezrozměrových veličin určit hodnotu třetí a tak vyřešit úlohu extrakce. Pomocí rovnic (20.3-9) a (20.3-46) lze libovolně zaměnit ζ , ζ' a η_X , η_Y . Zvláštní situace nastane, když $\zeta = 1$. Podle l'Hospitalova pravidla z rovn. (20.3-49) plyne

$$\eta_X = \frac{N}{N+1} \quad [\zeta=1] \quad (20.3-50)$$

a

$$N = \frac{\eta_X}{1 - \eta_X} \quad [\zeta=1] \quad (20.3-51)$$

Podobně pro počet skutečných stupňů dostáváme podle rovn. (20.3-43) a (20.3-47)

$$\varepsilon_Y^{N_s} = \frac{1 - \eta_Y}{1 - \eta_X} = \varepsilon_X^{-N_s} \quad (20.3-52)$$

$$\eta_Y = \frac{1 - \varepsilon_Y^{N_s}}{1 - \zeta' \varepsilon_Y^{N_s}} \quad (20.3-53)$$

$$N_s = (\ln \varepsilon_Y)^{-1} \ln \frac{1 - \eta_Y}{1 - \zeta' \eta_Y} \quad (20.3-54)$$

$$\eta_Y = \left[1 + (E_Y N_s)^{-1} \right]^{-1} ; \quad N_s = \left[E_Y (\eta_Y^{-1} - 1) \right]^{-1} \quad [\zeta = 1] \quad (20.3-55)$$

případně další varianty.

Uvedená soustava vztahů poskytuje nejjednodušší popis stupňového aparátu při protiproudu. Je možné z nich určit hodnotu libovolné z veličin N , η , ζ nebo N_s , η , ζ a E ze

známých hodnot zbývajících veličin. Počet stupňů a účinek aparátu se z nich dá vypočítat přímo, výpočet faktoru výměny hmoty je iterační. Grafickým znázorněním rovnic pro rovnovážné stupně je graf závislosti $(1 - \eta)$ na N , přičemž parametrem čar je ζ . Je uveden jako *obr.15-3* v kapitole Absorpce v *Příkladech*. To je ukázka shody matematického popisu rozličných procesů sdílení hmoty.

Při konstantních hodnotách rovnovážného poměru a účinnosti stupně se dá jednoduše odvodit vzorec pro výpočet celkové účinnosti z rovn.(19.2-30), jestliže se za hodnotu N dosadí z rovn.(20.3-49) a za N_s z rovn.(20.3-54)

$$E_c = \frac{N}{N_s} = \frac{\ln \varepsilon_x}{\ln \zeta} = \frac{\ln \varepsilon_y}{\ln \zeta'} \quad (20.3-56)$$

Z rovnice vyplývá

$$E_x = \frac{1 - \zeta^{E_c}}{1 - \zeta} \quad ; \quad E_y = \frac{1 - (\zeta')^{E_c}}{1 - \zeta'} \quad (20.3-56a)$$

Pro $\zeta = 1$ je podle l'Hospitalova pravidla

$$E_c = E_x = E_y \quad [\zeta_{uv}=1] \quad (20.3-57)$$

Tyto rovnice se používají k přibližným výpočtům i tehdy, když nelze zanedbat změnu hodnoty φ_A s koncentrací. Do vzorce se pak dosazuje střední hodnota (např. aritmetický či geometrický střed hodnot pro oba konce extraktoru). Chyba této aproximace roste s odchylkou rovnovážného vztahu od linearity.

Na principu využití faktoru výměny hmoty k výpočtu se zakládají některé z globálních metod řešení úloh se směsmi více než dvou složek (viz např. přílohu B2).

V tomto oddílu byl vyložen popis extrakce směsí se zanedbatelnou vzájemnou rozpustností původního a extrakčního rozpouštědla. Byly probrány rovnice jednostupňového extraktoru, jež si lze představit jako aparát se souproudem fází, rovnice opakované extrakce představující křížové uspořádání a konečně rovnice extrakce při protiproudu, jež je z nich nejúčinnější.

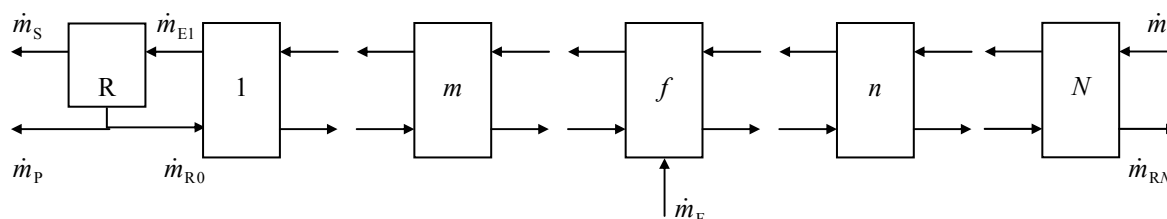
Pro každý způsob extrakce popis obsahoval hmotnostní bilanci extrahované složky, rovnovážný vztah a reálné stupně charakterizovala jejich účinnost. Zavedením relativních zlomků se v bilancích přešlo od proměnných toků fází ke konstantním tokům rozpouštědel, a tím se bilance linearizovaly.

Rovnice umožňují určit neznámý počet rovnovážných a skutečných stupňů, nebo neznámé koncentrace produktů, nebo neznámou spotřebu extrakčního činidla. Byly odvozeny vzorce pro výpočet od stupně ke stupni, byl ukázán grafický výpočet v soustavě s nemísitelnými rozpouštědly (pro omezeně mísitelná rozpouštědla je vyložen v příloze B1.1). Za předpokladu konstantní hodnoty rovnovážného poměru a účinnosti stupně byly odvozeny vzorce pro globální výpočet extraktoru, tj. popis vícestupňového zařízení jedinou rovnicí.

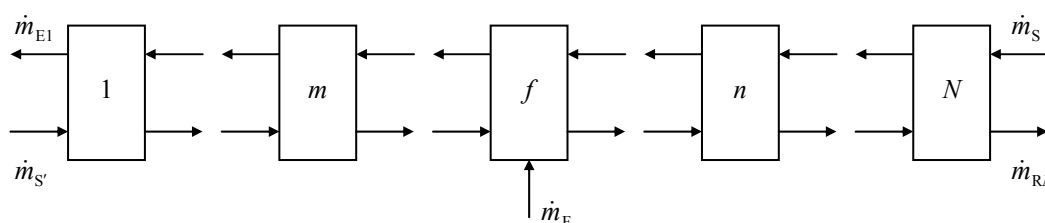
20.3.3.2 Další varianty extrakce při protiproudu

Při protiproudu odpovídá maximální možná koncentrace extrahované složky ve výsledném extraktu rovnovážné hodnotě s přiváděnou surovinou. V trojúhelníkovém diagramu na *obr.B1.2* pak konoda z bodu E_1 v prodloužení prochází bodem F. Tato rovnovážná koncentrace může být malá, je-li koncentrace extrahované složky v surovině malá. Získání požadované

látky z extraktu je pak nákladnější.



Obr.20.17. Stupňová extrakce při protiproudu se zpětným tokem



Obr.20.18. Stupňová extrakce při protiproudu se dvěma extrakčními činidly

Zvětšení hodnoty koncentrace extrahované látky v extraktu umožňuje *extrakce se zpětným tokem* (viz např. lit. [46], [6] nebo [58]). Z bilančního schématu na obr. 20.17 plyne princip metody. K původnímu extraktoru se přidávají další stupně ve směru transportu extraktu, tedy před stupeň f , do kterého se přivádí surovina. Aby zařízení fungovalo, musí se extrakt v přidané části stýkat s rafinátem bohatším na extrahovanou složku než je surovina. Toho se dosáhne napojením na rektifikační věž R, kde se od extraktu oddělí většina extrakčního rozpouštědla S a zbylá směs, bohatá na extrahovanou složku, se rozdělí na produkt P a na obohacený rafinát, tzv. *zpětný tok* R_0 vracený do extraktoru. Činnost zařízení významně ovlivňuje poměr toků vracené kapaliny $\dot{m}_{R0}$ a produktu $\dot{m}_P$. Opět je konstantní rozdíl toků rafinátu a extraktu v průřezu mezi stupni, ale má jinou hodnotu pro část extraktoru od stupně 1 do stupně f a jinou pro část od stupně f do stupně N . Podrobněji se takové uspořádání bude probírat v příští kapitole.

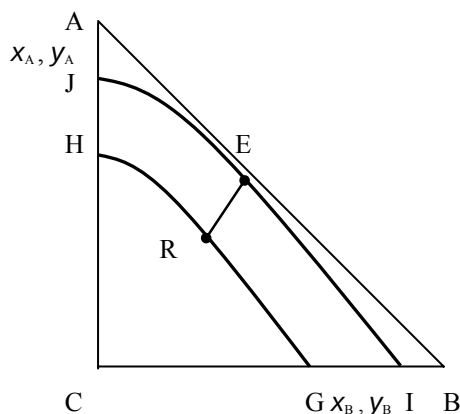
Jiný způsob zlepšení činnosti extraktoru s protiproudem fází je extrakce se dvěma navzájem omezeně mísitelnými extrakčními rozpouštědly (viz obr. 20.18 a lit. [46] a [31]). Jedno rozpouštědlo dobře rozpouští složky, které chceme extrahovat, druhé dobře rozpouští původní rozpouštědlo. Tak se dosáhne lepší selektivity (schopnosti oddělit vybranou složku) extrakce.

Extrakce v aparátech se spojitým kontaktem fází se provádí v zařízení, jehož rozměr charakterizuje jeho délka či výška. Ty jsou úměrné aktivnímu objemu zařízení, na němž závisí doba kontaktu obou fází (viz odd. 19.3). S rostoucí dobou kontaktu roste změna koncentrace extrahované složky v daném extraktoru. Výška extraktoru se dá vypočítat z rychlosti extrakce podle obdoby rovn. (19.3-12) nebo jako součin výšky převodové jednotky a počtu převodových jednotek (v obdobe k výpočtu výměníku tepla). To se bude probírat po výkladu kinetiky difuze. Odhad výšky extraktoru se též zjišťuje tak, že se počet rovnovážných stupňů, jaký by byl třeba pro požadovanou změnu koncentrace ve stupňovém extraktoru a vypočtený některým z již známých způsobů, vynásobí pokusně zjištěnou výškou ekvivalentní rovnovážnému stupni h_e pro daný typ extraktoru, definovanou rovnicí (19.3-1)

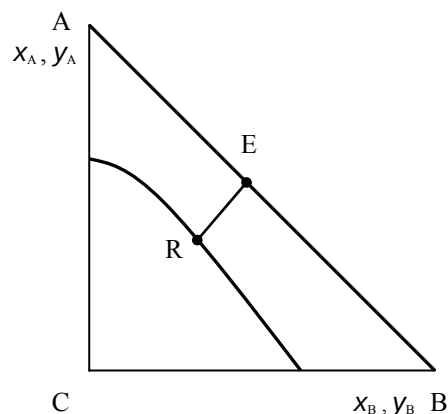
$$h = N h_e \quad (20.3-58)$$

20.4 Vyluhování

Popis vyluhování se shoduje s popisem kapalinové extrakce. Je však třeba vzít v úvahu, že rafinát je heterogenní směs. Je to suspenze, tj. směs kapaliny a pevné fáze. Kapalina je v mezerách mezi částicemi a v jejich pórech a obě fáze nelze úplně od sebe oddělit.



Obr.20.19. Grafické znázornění vyluhování v trojúhelníkovém diagramu



Obr.20.20. Trojúhelníkový diagram pro složku C nerozpustnou v kapalině

Bude se opět vycházet z nejjednodušší situace, kdy systém obsahuje pouze tři složky. Označí se symbolem A vyluhovaná složka, symbolem B loužicí rozpouštědlo a symbolem C pevná fáze.

Pokud je složka C částečně rozpustná, řeší se vyluhování obdobně jako extrakce systému s omezeně mísitelnými rozpouštědly. Vyluhování v jednom rovnovážném stupni popisuje pak rovnovážný vztah (20.2-1), balance složky $k = A, B, C$ a proudů, rovn. (20.2-4) a (20.2-5).

Vyluhování se dá znázornit v trojúhelníkovém diagramu, který připomíná obr.20.7b. Čáry však nekončí na straně $\overline{AB}$, ale na straně $\overline{AC}$ (viz obr.20.19). Čára $\overline{IJ}$ znázorňuje rovnovážné složení extraktu, čára $\overline{HG}$ znázorňuje rovnovážné složení rafinátu a mezi nimi je oblast existence dvou fází. Konoda $\overline{RE}$ spojuje bod R představující složení rafinátu a bod E představující složení extraktu, který je s ním v rovnováze. Je-li pevná složka C nerozpustná v kapalině ($y_C = 0$), je kapalina směs dvou složek (A+B). Čára $\overline{IJ}$, na které leží body představující extrakt, pak splývá se stranou trojúhelníku $\overline{AB}$ (viz obr.20.20, strany trojúhelníku zobrazují binární směsi). Čáru $\overline{HG}$ tvoří body zobrazující rafinát, který se skládá z pevné fáze a na ní zachycené kapaliny, rafinát je tedy tříložková směs.

V dalším výkladu se bude předpokládat, že složka C je nerozpustná. Pak obsahuje kapalina pouze složky A a B. S výhodou se použije popisu uvedeného v Příkladech (kap. 17). Koncentrace složek A a B v extraktu a v rafinátu se vztáhne na jejich směs, tj. pouze na kapalnou fázi:

$$\begin{aligned} X_k &\equiv m_{kR} / (m_{AR} + m_{BR}) = x_k / (x_A + x_B) \\ Y_k &\equiv m_{kE} / (m_{AE} + m_{BE}) = m_{kE} / m_E = y_k \end{aligned} \quad (20.4-1)$$

Podle této rovnice se relativním hmotnostním zlomkem složky C vyjadřuje poměr hmotností pevné a kapalně fáze v rafinátu. Jeho převrácenou hodnotu označíme symbolem u a nazveme

ji únos kapaliny

$$u \equiv (m_{AR} + m_{BR})/m_{CR} = 1 / X_C \quad (20.4-2)$$

Vyjadřuje se jím množství rafinátové kapaliny při zápisu bilancí. Tento poměr se určuje experimentálně v závislosti na složení kapaliny $u = u(y_A)$.

Pro celkové množství rafinátu plyne

$$m_R/m_{CR} = (m_{AR} + m_{BR} + m_{CR})/m_{CR} = u + 1 = 1 / X_C \quad (20.4-2a)$$

Z rovnic (20.4-1) a (20.4-2) plyne vztah mezi relativním a obyčejným zlomkem složky k v rafinátu

$$X_k = \frac{m_{kR}}{m_{AR} + m_{BR} + m_{CR}} = \frac{1}{\frac{m_{AR} + m_{BR}}{m_{kR}} + \frac{m_{CR}}{m_{AR} + m_{BR}} \frac{m_{AR} + m_{BR}}{m_{kR}}} = \frac{1}{\frac{1}{X_k} + \frac{1}{uX_k}} = \frac{X_k}{1 + u^{-1}} \quad (20.4-3)$$

V období k popisu kapalinové extrakce vyjádříme hmotnost složky k v rafinátu pomocí konstantní hmotnosti pevné fáze podle rovnic (20.4-1) a (20.4-2)

$$m_{kR} = (m_{AR} + m_{BR}) X_k = m_{CR} u X_k \quad (20.4-4)$$

Nejprve popíšeme *jednostupňové vyluhování*. Stupeň budeme považovat za rovnovážný, když se vyrovnají hodnoty koncentrace složky v extraktové a rafinátové kapalině:

$$Y_k = X_k = y_k \quad (20.4-5)$$

tj. $\varphi_k = 1$. Bilanci složky k

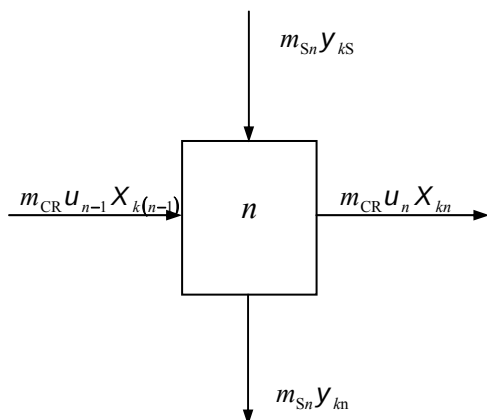
$$m_{CR} u_F X_{kF} + m_S Y_{kS} = m_{CR} u X_k + m_E Y_k \quad (20.4-6)$$

lze podle rovn. (20.4-1) také psát ve tvaru

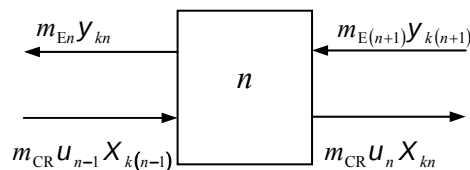
$$m_{CR} u_F X_{kF} + m_S y_{kS} = m_{CR} u X_k + m_E y_k \quad (20.4-7)$$

Bilance kapalných proudů bude

$$m_{CR} u_F + m_S = m_{CR} u + m_E \quad (20.4-8)$$



Obr.20.21. Bilanční schéma stupně n při opakovaném vyluhování



Obr.20.22. Bilanční schéma stupně n při vyluhování za protiproudu

Při opakovaném vyluhování (viz obr.20.21) platí pro rovnovážný stupeň n

$$y_{kn} = X_{kn} \quad (20.4-9)$$

balance složky k

$$m_{CR} u_{n-1} X_{k(n-1)} + m_{Sn} y_{kS} = m_{CR} u_n X_{kn} + m_{En} y_{kn} \quad (20.4-10)$$

a balance proudů

$$m_{CR} u_{n-1} + m_{Sn} = m_{CR} u_n + m_{En} \quad (20.4-11)$$

Když je zadána závislost únosu na koncentraci, umožňují rovnice určit potřebný počet rovnovážných stupňů pro dané dělení nebo výstupní koncentrace a množství proudů pro známý počet rovnovážných stupňů.

Je-li hodnota únosu, hmotnost extrakčního činidla přidávaného do každého stupně a jeho složení konstantní, bude hodnota faktoru výměny hmoty definovaného vztahem

$$\zeta'_n \equiv m_{En} / m_{Rln} = m_{En} / (u_n m_{CR}) = \zeta_n^{-1} \quad (20.4-12)$$

také konstantní. Pro $\zeta = \text{konst}$ platí obdoba vztahu (20.3-21) odvozeného pro kapalinovou extrakci

$$(X_{kF} - y_{kS}) / (X_{kN} - y_{kS}) = (1 + \zeta')^N \quad (20.4-13)$$

Rovnice se dá použít i když hodnota faktoru výměny hmoty není konstantní, dosadí-li se do ní jeho střední hodnota, pokud tím zavedená chyba zůstává v mezích přípustné chyby výpočtu.

Při protiproudu (viz obr. 20.22) platí pro rovnovážný stupeň n rovn. (20.4-9), balance složky k je

$$m_{CR} u_{n-1} X_{k(n-1)} + m_{E(n+1)} y_{k(n+1)} = m_{CR} u_n X_{kn} + m_{En} y_{kn} \quad (20.4-14)$$

a balance kapalných proudů stupně n

$$m_{CR} u_{n-1} + m_{E(n+1)} = m_{CR} u_n + m_{En} \quad (20.4-15)$$

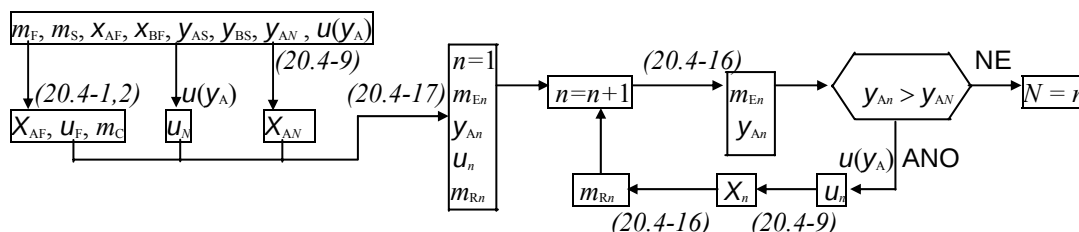
Při výpočtu se rovnice uplatňují postupně na každý stupeň. Kombinací rovnic (20.4-14), (20.4-15) a (20.4-9) dostáváme po úpravě rovnice

$$\begin{aligned} m_{E(n+1)} &= m_{CR} (u_n - u_{n-1}) + m_{En} \\ y_{k(n+1)} &= [m_{CR}(u_n X_{kn} - u_{(n-1)} X_{k(n-1)}) + m_{En} y_{kn}] / m_{E(n+1)} \\ u_{n+1} &= u(y_{A(n+1)}) \\ m_{R(n+1)} &= m_{CR} (u_{n+1} + 1) \end{aligned} \quad (20.4-16)$$

K výpočtu údajů o stupni $(n+1)$ je třeba znát údaje o stupních n a $(n-1)$. Proto lze rovnic použít až při výpočtu stupně 2. Indexem 0 je označena surovina a pro stupeň 1 plynou údaje z bilance pro celé zařízení

$$\begin{aligned} m_{CR} u_0 + m_S &= m_{CR} u_N + m_{E1} \\ m_{CR} u_0 X_{k0} + m_S y_{kS} &= m_{CR} u_N X_{kN} + m_{E1} y_{k1} \\ u_1 &= u(y_{A1}) \\ m_{R1} &= m_{CR} (u_1 + 1) \end{aligned} \quad (20.4-17)$$

Nechť je na příklad zadáno $m_F, m_S, X_{AF}, X_{BF}, y_{AS}, y_{BS}, y_{AN}, u(y_A)$ a má se určit počet rovnovážných stupňů. Ze známých hodnot X_{AF} a X_{BF} se spočtou z definice X (20.4-1) hodnoty X_{AF} a u_F a z definice u (20.4-2) hodnota m_{CR} . Hodnota y_{AN} poskytuje podle rovn.(20.4-5) hodnotu X_{AN} a z naměřené závislosti $u(y_A)$ hodnotu u_N . Z těchto údajů a z rovn.(20.4-17) lze určit m_{E1}, y_{A1}, u_1 a m_{R1} . Další postup řešení je opakování výpočtu podle rovn.(20.4-16) dokud se nedosáhne hodnoty y_{AN} . Tento postup znázorňuje obr.20.IV.



Obr.20.IV. Určení počtu rovnovážných stupňů při loužení za protiproud

Pokud se hodnoty u_n a m_{En} nemění, je hodnota faktoru výměny hmoty z rovn. (20.4-12) konstantní a celý aparát popisuje jedna rovnice

$$\frac{X_{AF} - y_{A1}}{X_{AN} - y_{AS}} = \zeta'^N = \zeta^{-N} \quad (20.4-18)$$

která je obdobou rovn. (20.3-42). Rovnice se dá použít i když se hodnota únosu a hmotnostního toku extraktu od stupně ke stupni mění, dosadí-li se střední hodnota faktoru výměny hmoty.

Když struktura materiálu brání rychlému vyloužení rozpustné složky pevné fáze, není stupeň rovnovážný. Jeho účinnost je třeba určit pokusně.

V této kapitole byl vyložen popis stupňového procesu na příkladu extrakce. Byl ukázán postup výpočtu jednostupňové a vícestupňové extrakce. Byl probrán způsob opakované a protiproudové extrakce v tříložkových směsích. Byly uvedeny rovnice používané pro soustavy s více než třemi složkami. Bylo ukázáno řešení úloh vyluhování.

Tab.20.2 Přehled základních rovnic v extrakci

BILANCE	ROVNOVÁŽNÝ A SOUČTOVÝ VZTAH, ÚČINNOST
Extrakce v jednostupňovém aparátu $m_F + m_S = m_R + m_E = m_M \quad (20.2-5)$ $m_F x_{kF} + m_S y_{kS} = m_R x_k + m_E y_k = m_M z_k \quad (20.2-4)$	Rovnovážný vztah $y_k^* = \psi_k x_k^* \quad [T_x = T_y = T, p_x = p_y = p, k = 1, 2, \dots, K] \quad (20.2-1)$ $\psi_k = (M_x / M_y)(\gamma_{kx} / \gamma_{ky}) \quad (20.2-2)$ Součtový vztah $\sum_{k=1}^K x_k = 1, \quad \sum_{k=1}^K y_k = 1 \quad (20.2-6)$ Účinnost $E_x \equiv \frac{x_{kF} - x_k}{x_{kF} - x_k^*} \quad E_y \equiv \frac{y_k - y_{kS}}{y_k^* - y_{kS}} \quad (20.2-9, 10)$
Opakovaná extrakce $m_{R(n-1)} + m_{Sn} = m_{Rn} + m_{En} = m_{Mn} \quad (20.2-13)$ $m_{R(n-1)} x_{k(n-1)} + m_{Sn} y_{kS} = m_{Rn} x_{kn} + m_{En} y_{kn} = m_{Mn} z_{kn} \quad (20.2-12)$	Rovnovážný vztah $y_{kn}^* = \psi_{kn} x_{kn}^* \quad [k = 1, 2, \dots, K; n = 1, 2, \dots, N] \quad (20.2-11)$ Součtový vztah $\sum_{k=1}^K x_{kn} = 1, \quad \sum_{k=1}^K y_{kn} = 1 \quad [n = 1, \dots, N] \quad (20.2-14)$ Účinnost $E_{xn} \equiv \frac{x_{k(n-1)} - x_{kn}}{x_{k(n-1)} - x_{kn}^*} \quad E_{yn} \equiv \frac{y_{kn} - y_{kS}}{y_{kn}^* - y_{kS}} \quad (20.2-15, 16)$
Extrakce při protiproudu $\dot{m}_{R(n-1)} - \dot{m}_{En} = \dot{m}_{Rn} - \dot{m}_{E(n+1)} = \dot{m}_F - \dot{m}_{E1} = \dot{m}_{RN} - \dot{m}_S \quad (20.2-21)$ $\dot{m}_{R(n-1)} x_{k(n-1)} - \dot{m}_{En} y_{kn} = \dot{m}_{Rn} x_{kn} - \dot{m}_{E(n+1)} y_{k(n+1)} = \dot{m}_F x_{kF} - \dot{m}_{E1} y_{k1} = \dot{m}_{RN} x_{kN} - \dot{m}_S y_{kS} \quad (20.2-20)$	Rovnovážný vztah $y_{kn} = \psi_{kn} x_{kn} \quad [k = 1, 2, \dots, K; n = 1, 2, \dots, N] \quad (20.2-17)$ Součtový vztah $\sum_{k=1}^K x_{kn} = 1, \quad \sum_{k=1}^K y_{kn} = 1 \quad [n = 1, \dots, N] \quad (20.2-14)$ Účinnost $E_{xn} \equiv \frac{x_{k(n-1)} - x_{kn}}{x_{k(n-1)} - x_{kn}^*} = \frac{x_{k(n-1)} - x_{kn}}{x_{k(n-1)} - y_{kn} \psi_{kn}^{-1}(y_{kn})} \quad (20.2-29)$ $E_{yn} \equiv \frac{y_{kn} - y_{k(n+1)}}{y_{kn}^* - y_{k(n+1)}} = \frac{y_{kn} - y_{k(n+1)}}{\psi_{kn}(x_{kn}) x_{kn} - y_{k(n+1)}} \quad (20.2-30)$ $x_{kn}^* \equiv \frac{y_{kn}}{\psi_{kn}(y_{kn})} \quad y_{kn}^* \equiv \psi_{kn}(x_{kn}) x_{kn} \quad (20.2-31, 32)$

NEMÍSITELNÁ ROZPOUŠTĚDLA

BILANCE	ROVNOVÁŽNÝ VZTAH, ÚČINNOST
Extrakce v jednostupňovém aparátu $m_C X_{AF} + m_B Y_{AS} = m_C X_A + m_B Y_A \quad (20.3-5)$ $X_A^* = (1 + \zeta')^{-1} \left(X_{AF} + Y_{AS} \frac{m_B}{m_C} \right) \quad (20.3-10)$ $\zeta = m_C / (\varphi_A m_B) = (\zeta')^{-1} \quad (20.3-9)$	Rovnovážný vztah $Y_A^* = \varphi_A X_A^* \quad (20.3-3)$ Účinnost $E_X = E_Y = E = \frac{X_{AF} - X_A}{X_{AF} - X_A^*} = \frac{Y_A - Y_{AS}}{Y_A^* - Y_{AS}} \quad (20.3-7)$
Opakovaná extrakce $m_C X_{A(n-1)} + m_{Bn} Y_{AS} = m_C X_{An} + m_{Bn} Y_{An} \quad (20.3-12)$ $\frac{X_{A(n-1)}^* - (Y_{AS} / \varphi_{An})}{X_{An}^* - (Y_{AS} / \varphi_{An})} = \zeta'_n + 1 \quad (20.3-14)$ $\zeta_n = \frac{m_C}{\varphi_{An} m_{Bn}} = (\zeta'_n)^{-1} \quad (20.3-13)$ $(X_{AF} - X_{AN}) m_C = \sum_{n=1}^N (Y_{An} - Y_{AS}) m_{Bn} \quad (20.3-18)$ $= (\langle Y_A \rangle - Y_{AS}) \sum_{n=1}^N m_{Bn}$	Rovnovážný vztah $Y_{An}^* = \varphi_{An} X_{An}^* \quad (20.3-11)$ Účinnost $E_{Xn} = E_{Yn} = E_n = \frac{X_{A(n-1)} - X_{An}}{X_{A(n-1)} - X_{An}^*} = \frac{Y_{An} - Y_{AS}}{Y_{An}^* - Y_{AS}} \quad (20.3-15, 16)$
Extrakce při protiproudu $\dot{m}_C X_{A(n-1)} - \dot{m}_B Y_{An} = \dot{m}_C X_{An} - \dot{m}_B Y_{A(n+1)} =$ $= \dot{m}_C X_{AF} - \dot{m}_B Y_{AI} = \dot{m}_C X_{AN} - \dot{m}_B Y_{AS} \quad (20.3-25)$ $X_{A(n-1)} = \zeta'_n X_{An} + X_{AF} - \dot{m}_B Y_{AI} / \dot{m}_C \quad (20.3-27)$ $= \zeta'_n X_{An} + X_{AN} - \dot{m}_B Y_{AS} / \dot{m}_C$ $Y_{A(n+1)} = \zeta_n Y_{An} + Y_{AI} - \dot{m}_C X_{AF} / \dot{m}_B \quad (20.3-28)$ $= \zeta_n Y_{An} + Y_{AS} - \dot{m}_C X_{AN} / \dot{m}_B$	Rovnovážný vztah $Y_{An} = \varphi_{An} X_{An} \quad (20.3-23)$ Účinnost $E_{Xn} = \frac{X_{A(n-1)} - X_{An}}{X_{A(n-1)} - X_{An}^*} = \frac{X_{A(n-1)} - X_{An}}{X_{A(n-1)} - (Y_{An} / \varphi_{An})} \quad (20.3-30)$ $E_{Yn} = \frac{Y_{An} - Y_{A(n+1)}}{Y_{An}^* - Y_{A(n+1)}} = \frac{Y_{An} - Y_{A(n+1)}}{\varphi_{An} X_{An} - Y_{A(n+1)}} \quad (20.3-31)$ $X_{An}^* = Y_{An} / \varphi_{An} (Y_{An}) \quad ; \quad Y_{An}^* = \varphi_{An} (X_{An}) X_{An} \quad (20.3-32)$

VYLUHOVÁNÍ

BILANCE	ROVNOVÁŽNÝ VZTAH, ÚNOS
Jednostupňové vyluhování $m_{CR} u_F + m_S = m_{CR} u + m_E \quad (20.4-8)$ $m_{CR} u_F X_{kF} + m_S y_{kS} = m_{CR} u X_k + m_E y_k \quad (20.4-7)$ $m_{kR} = (m_{AR} + m_{BR}) X_k = m_R X_k \quad [k = A, B, C] \quad (20.4-1)$ $m_{kE} = (m_{AE} + m_{BE}) Y_k = m_E Y_k \quad (20.4-1)$ $m_{AR} + m_{BR} = m_{CR} u = m_{CR} / X_C \quad (20.4-2)$ $m_R / m_{CR} = u + 1$	Rovnovážný vztah $X_k = Y_k = y_k \quad (20.4-5)$ Únos $u = u(y_A)$
Opakované vyluhování $m_{CR} u_{n-1} + m_{Sn} = m_{CR} u_n + m_{En} \quad (20.4-11)$ $m_{CR} u_{n-1} X_{k(n-1)} + m_{Sn} y_{kS} = m_{CR} u_n X_{kn} + m_{En} y_{kn} \quad (20.4-10)$	Rovnovážný vztah $y_{kn} = X_{kn} \quad (20.4-9)$ Únos $u_n = u(y_{An}) \quad (20.4-16)$
Vyluhování při protiproudu $m_{E1} = m_{CR} (u_F - u_N) + m_S$ $y_{k1} = [m_{CR} (u_F X_{kF} - u_N X_{kN}) + m_S y_{kS}] / m_{E1} \quad (20.4-17)$ $m_{E(n+1)} = m_{CR} (u_n - u_{n-1}) + m_{En}$ $y_{k(n+1)} = [m_{CR} (u_n X_{kn} - u_{n-1} X_{k(n-1)}) + m_{En} y_{kn}] / m_{E(n+1)} \quad (20.4-16)$ $m_{R(n+1)} = m_{CR} (u_{n+1} + 1)$	Rovnovážný vztah $y_{kn} = X_{kn} \quad (20.4-9)$ Únos $u_n = u(y_{An}) \quad (20.4-16)$

KONTROLNÍ ÚLOHY

- 20.1. Které jsou základní rovnice popisu extrakčního stupně?
- 20.3. Jaká je nutná podmínka možnosti uplatnění extrakce?
- 20.4. Jaké je průmyslové uplatnění extrakce?
- 20.5. Proč je pro termodynamický popis rovnovážného složení při extrakci potřebný aktivitní koeficient?
- 20.6. Je ovlivněna hodnota separačního faktoru tím, když se do jeho definice dosadí místo molárních zlomků složek jejich hmotnostní zlomky nebo toky látkového množství či hmotnosti?
- 20.7. Proč může extrakční činidlo obsahovat extrahovanou složku?
- 20.8. Záviseí hodnota faktoru výměny hmoty na způsobu vyjádření koncentrace?
- 20.12. Liší se od sebe účinnosti vyjádřené koncentracemi různých složek, je-li směs
a) dvousložková, b) mnohosložková?
- 20.13. Jaký je rozdíl v definici účinnosti stupně při extrakci jednostupňové, opakované či při protiproudu?
- 20.14. Jaký je rozdíl mezi pojmy účinnost a účinek? Co je celková (globální) účinnost?
- 20.17. Jak se liší extrakce při protiproudu od opakované extrakce?
- 20.18. Jakou změnou provozu extrakce je možné zvětšit dělicí schopnost extraktoru při protiproudu?
- 20.19.a) Dokažte, že mezi účinnostmi stupně n při protiproudu existuje vztah (20.3-33)

$$E_{Y_n} = \left[1 + (E_{X_n}^{-1} - 1) \zeta'_n \right]^{-1}$$

- b) Z něj a z definice (20.3-35a) veličiny ε_{X_n} odvoďte vzorec

$$\varepsilon_{X_n} \varepsilon_{Y_n} = 1$$

- 20.20. Odvoďte rovnice popisující extrakci při protiproudu se zpětným tokem.
- 20.21. Kdy je možné očekávat přibližně konstantní hodnoty faktoru výměny hmoty a účinnosti stupňů?
- 20.22. Charakterizujte rovnovážný stupeň při vyluhování.
- 20.23. V čem se liší vyluhování od extrakce?
- 20.27. Podle výkladu v kap.23 napište vztah pro výpočet výšky nepřetržitě pracujícího extraktoru se spojitým stykem fází při protiproudu pro tříložkovou směs s navzájem nemísitelnými rozpouštědly.