

23 Absorpce

Hlavní cíle kapitoly: Vyložit výpočet výměníku hmoty se spojitým kontaktem fází na příkladu absorpce. Uplatnit rovnice prostupu hmoty, výšky převodové jednotky a počtu převodových jednotek, zjednodušení pro konstantní rovnovážný poměr. Ukázat vliv chemické reakce a zpětného promíchávání na činnost výměníku hmoty.

Požadované znalosti: Bilancování, Henryův zákon, prostup hmoty, faktor výměny hmoty, účinek výměníku.

Začíná se kvalitativním popisem absorpce a jejího uplatnění v průmyslu. Kvantitativní popis je zaměřen na výklad výpočtu výměníků hmoty se spojitým kontaktem fází. Plyn se považuje za směs rozpustné a nerozpustné složky v použitém kapalném rozpouštědle.

S hlediska výkladu absorpce je výhodné popsat zvlášť směsi s malou koncentrací a směsi s velkou koncentrací rozpustné složky v absorbéru. Probírají se rovnice materiálové a entalpické bilance a vyjádření fázové rovnováhy při absorpci, vykládá se výpočet výšky či délky absorbéru a určení minimální spotřeby rozpouštědla. V závěru kapitoly se zkoumá vliv chemické reakce a axiálního míchání na činnost absorbéru.

23.1 Úvod

Absorpce (pohlcování) plynů a par v kapalinách (viz lit. [24], [9] a [74]) je metoda dělení směsí plynů a par^{*)} a slouží

- a) k výrobě roztoků (např. produkce minerálních kyselin nebo nápojů);
- b) k výrobě čistých plynů (např. výroba H_2 či CO_2);
- c) k zachycování složek plynné směsi, které mají malou koncentraci [např. odstraňování SO_2 , CS_2 nebo par rozpouštědel z plynných emisí (z ekologických důvodů)].

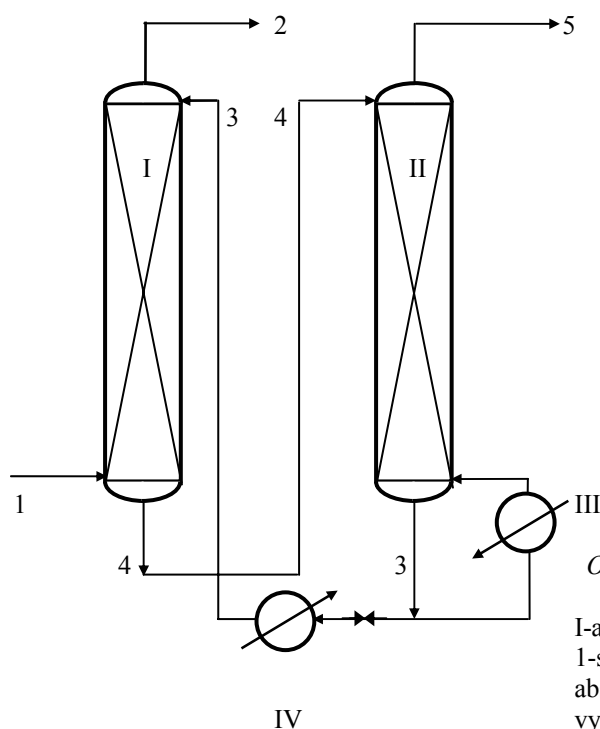
Při navrhování absorpce je třeba určit

- 1) vhodné rozpouštědlo;
- 2) vhodný typ absorbéru;
- 3) teploty proudů a spotřebu chladicího média;
- 4) tlak, při němž absorbér bude pracovat;
- 5) optimální hodnotu toku rozpouštědla;
- 6) vhodnou rychlost proudění plynu absorbérem (tím je určen jeho průměr);
- 7) výšku (délku) absorbéru;
- 8) mechanické příslušenství absorbéru, jako např. rozdělovač kapaliny pro věž s výplní.

Rozpouštědlo se obvykle regeneruje (jako při extrakci), proto bývá absorbér propojen s desorbérem (viz obr. 23.1). V něm se složky pohlcené v absorpčním činidle z roztoku

^{*)} Jiné metody dělení plynných směsí jsou např. parciální kondenzace (viz kap.21), membránová separace (viz kap.27) nebo difuze s unášením přidanou složkou (sweep diffusion). Poslední uvedená metoda se realizuje tak, že kolmo ke směru proudění směsi v kanálu s obdélníkovým průřezem vstupuje porézní stěnou vodní pára, která na protilehlé stěně kondenzuje. Vodní pára ve svém směru proudění strhuje složky směsi a vytváří v tomto směru gradient koncentrace, který nutí složky difundovat v opačném směru. Složka binární směsi, která má větší difuzní koeficient, se pak hromadí u porézní desky a druhá složka u desky s kondzátem a je možné je odděleně odvádět. Tak se dá např. získávat vodík ze směsi s methanem.

uvolňují (desorpce je opakem absorpce). Děje se to kontaktem s plynem neobsahujícím pohlcené složky. Z vodných roztoků se obvykle pohlcený plyn odstraňuje destilací roztoku.



Obr. 23.1. Absorpce s regenerací absorpčního činidla

I-absorbér; II-desorbér; III-vařák; IV-chladič
1-surový plyn; 2- plyn po absorpci; 3-regenerované
absorpční činidlo; 4-roztok pohlceného plynu; 5- plyn
vypuzený z roztoku

Obecně je pro absorpci výhodný zvýšený tlak a snížená teplota a opak platí pro desorpci. Kapacita rozpouštědla se zvětší, nastává-li chemická reakce s absorbovaným plynem. Absorpce a desorpce se provozují buď při stejných tlacích, pak je teplota desorpce vyšší, nebo při stejných teplotách a tlak v desorbéru je menší než při absorpci. Výpočet se provádí pro několik variant a porovnávají se jejich náklady.

Požadavky na absorpční činidlo jsou podobné jako ty, které byly uvedeny pro extrakční činidlo. Má dobře a selektivně rozpouštět požadovanou plynnou složku, má být co nejméně těkavé, levné, nekorodující, stabilní, s malou viskozitou, nepělivé a nehořlavé. Protože je plyn odcházející z absorbéru běžně nasycen párou kapalného absorpčního činidla, jsou ztráty činidla s odcházejícím plynem významné. Je tedy často ekonomicky výhodnější dát přednost levnějšímu činidlu před dražším, lépe rozpouštějícím absorbovanou část plynné směsi.

Absorbéry pracují se spojitým nebo stupňovým kontaktem fází. Výkladem výpočtu aparátů se stupňovým kontaktem fází jsme se zabývali v předešlých kapitolách, zde na příkladu absorbérů vyložíme výpočet výměníků hmoty se spojitým kontaktem fází a předpokládáme, že znalosti získané v kapitolách o extrakci či destilaci poskytují základ umožňující řešení absorpce se stupňovým kontaktem fází (viz též kap.15 v *Příkladech*).

V absorbérech se spojitým kontaktem fází může kapalina stékat v tenké vrstvě (filmu) po povrchu výplně obsažené ve věžovém aparátu (absorbéry s výplní, viz např. obr. 29.7 či obr. 29.9,10), nebo po svislém povrchu desek či trubek (absorbéry se zkrápěnou stěnou, viz obr. 29.14). Velkého mezifázového povrchu se dosáhne rozptýlením kapaliny do kapek ve spojitěm plynném prostředí (sprchové absorbéry, viz obr. 29.5,16) nebo rozptýlením plynu v kapalině (probublávané absorbéry, patrové absorbéry, absorbéry s míchadly, viz obr. 29.2 a obr. 29.18). Popis některých aparátů obsahuje kap. 29.

Velikost absorbéru charakterizuje jeho výška či délka a průřez, který bývá konstantní. Při protiproudu plynu a kapaliny mohou rychlosti obou fází růst pouze do mezní hodnoty dané zahlcením absorbéru. Tento děj byl probírán v kap.8 [viz též rovn.(29.3-3)].

23.1.1 Fázová rovnováha

Při popisu spojitého kontaktu fází má významnou roli vyjádření rovnováhy mezi fázemi

$$y_k = \psi_k x_k \quad (23.1-1)$$

potřebné k určení hybné síly procesu. Při absorpci páry se rovnovážný poměr vyjadřuje jako při destilaci

$$\psi_k = \frac{\gamma_k \phi_{kV}^o p_k^o F}{\phi_{kV} p} \quad (21.2-6)$$

Když je kapalina ideální směs a tlak je blízký atmosférickému tlaku, platí Raoultův zákon

$$\psi_k = \frac{p_k^o}{p} \quad (19.2-9)$$

Při absorpci plynu se počítá rovnovážný poměr z Henryova zákona

$$\psi_k = \frac{\gamma_k^\infty H_k}{\phi_{kg} p} \quad (19.2-14)$$

V rovnici je Henryův koeficient H_k . Čím je jeho hodnota větší, tím je plyn méně rozpustný v kapalině. Aktivitní koeficient γ_k^∞ se vztahuje k referenčnímu stavu při nekonečném zředění, tj. při hodnotě $x_k \rightarrow 0$, kdy má hodnotu rovnou jedné. Jeho hodnota je nevýznamná u málo rozpustných plynů.

Při destilaci se může obecně pohybovat hodnota molárního zlomku složky v rozmezí od nuly do jedné (s výjimkou vzniku druhé kapalně fáze). Rovnovážná hodnota molárního zlomku absorbovaného plynu v kapalině však je vždy významně menší než jedna, a to i když se rozpouští čistý plyn. Rozpustnost plynu v kapalině je tedy vždy menší než rozpustnost páry.

Při malých tlacích blízkých atmosférickému tlaku p_a a při $x_k \rightarrow 0$ se rovnice (19.2-14) zjednoduší na tvar

$$\psi_k = \frac{H_k}{p} \quad [p \cong p_a, x_k \rightarrow 0] \quad (23.1-2)$$

Henryův koeficient tedy charakterizuje rozpustnost plynu, když se jeho koncentrace v kapalině blíží nule. V literatuře se uvádí též Henryův koeficient vztahovaný k molaritě, který označíme H_{kc} a platí

$$p_k = H_{kc} c_k \quad [p \cong p_a, c_k \rightarrow 0] \quad (23.1-2a)$$

Čím je kritická teplota plynu vzdálenější od teploty absorpce, tím méně je plyn rozpustný v kapalině. Rovnice (23.1-2) připomíná Raoultův zákon. Hodnota Henryova koeficientu však závisí nejen na absorbované složce k , ale též na vlastnostech kapalného rozpouštědla.

Při výpočtu absorbéru se obecně uplatňují současně rovnice (19.2-14) i (21.2-6), protože plynná směs může obsahovat složky s kritickou teplotou menší i větší než je teplota absorpce, jako třeba při absorpci směsi uhlovodíků v oleji.

23.1.2 Bilanční rovnice absorpce při protiproudu

Následující výklad se bude týkat absorpce v ustáleném stavu a bez chemické reakce. Na rozdíl od předešlé kapitoly se nebude označovat koncentrace zprůměrněná podle průřezu lomenou závorkou, protože se bude pracovat pouze se zprůměrněnými koncentracemi a nemůže dojít k omylu.

Vztah mezi množstvím a složením proudů vstupujících a vystupujících z absorbéru udává bilance složky k ($k=1,2,\dots,K$), obvykle ve formě bilance látkového množství. V rovnicích jsou vstupující proudy označeny indexem "i", vystupující indexem "e". Při protiproudu v ustáleném stavu je bilance látkového množství složky k

$$\dot{n}_{gi}y_{ki} + \dot{n}_{li}x_{ki} = \dot{n}_{ge}y_{ke} + \dot{n}_{le}x_{ke} \quad (23.1-3)$$

Pro směsi je tato bilance

$$\dot{n}_{gi} + \dot{n}_{li} = \dot{n}_{ge} + \dot{n}_{le} \quad (23.1-4)$$

Při absorpci se obecně mění teplota směsí, proto je k popisu nutná bilance entalpie

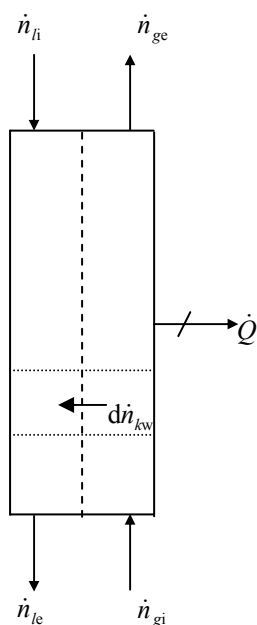
$$\dot{n}_{gi}h_{gi} + \dot{n}_{li}h_{li} = \dot{n}_{ge}h_{ge} + \dot{n}_{le}h_{le} + \dot{Q} \quad (23.1-5)$$

kde je $\dot{Q}$ výsledný tepelný výkon absorbéru.

V elementárním úseku absorbéru je diferenciální tok látkového množství složky k fázovým rozhraním z bilance podle rovn.(19.3-4)

$$d\dot{n}_{kw} = -d\dot{n}_{kl} = -d(\dot{n}_l x_k) = -d\dot{n}_{kg} = -d(\dot{n}_g y_k) \quad (23.1-6)$$

Obr.23.2. Schéma absorpce při protiproudu



Při souproudu jsou rovnice obdobné. V dalším výkladu budou probrány jednodušší formy těchto rovnic za předpokladu, že jsou konstantní buď toky fází nebo tok jedné ze složek v každé fázi.

Výklad absorpce je nejjednodušší pro směs se dvěma složkami. V plynu budou označeny symboly A a B, přičemž A je rozpustná a B nerozpustná složka. V kapalině budou složky A a C, kde C je kapalně rozpouštědlo, jehož parciální tlak rovnovážné páry je považován za nevýznamný.

Je-li koncentrace rozpustné složky v obou fázích malá, neovlivní absorpce významně tok plynu ani kapaliny. Toky obou fází se tedy považují za konstantní a rovn.(23.1-6) se zjednoduší na

$$d\dot{n}_{Aw} = -\dot{n}_l dx_A = -\dot{n}_g dy_A \quad [\dot{n}_l = \text{konst}, \dot{n}_g = \text{konst}] \quad (23.1-7)$$

Ve směsi s větší koncentrací složky A se toky plynu a kapaliny mění podél absorbéru, ale toky složek B a C zůstávají za uvedených podmínek konstantní. To je situace, jaká byla již při popisu extrakce s nemísitelnými rozpouštědly. Analogicky se vztahuje koncentrace složky A na tyto složky, zavádějí se relativní zlomky, a to podle rovn.(20.3-1) relativní molární zlomek složky A v kapalině X_A

$$n_{Al} = \frac{n_{Al}}{n_C} n_C \equiv X_A n_C = x_A n_l = x_A (n_{Al} + n_C) = x_A n_C (X_A + 1) \quad (23.1-8)$$

a podle rovn.(20.3-2) relativní molární zlomek v plynu Y_A

$$n_{Ag} = \frac{n_{Ag}}{n_B} n_C \equiv Y_A n_B = y_A n_g = y_A (n_{Ag} + n_B) = y_A n_B (Y_A + 1) \quad (23.1-9)$$

Diferenciální tok složky A fázovým rozhraním pak je

$$d\dot{n}_{Aw} = -\dot{n}_C dX_A = -\dot{n}_B dY_A \quad [\dot{n}_B = \text{konst}, \dot{n}_C = \text{konst}] \quad (23.1-10)$$

23.1.3 Kinetika absorpce

Převážná část této kapitoly je věnována výpočtu výšky absorbéru (a obecně výměníku hmoty) se spojitým kontaktem fází. Popis sdílení hmoty při spojitém kontaktu fází je pro plynné směsi obsahující více než dvě složky obtížný. Již v předešlé kapitole bylo řečeno, že difuzní koeficienty v takovýchto směsích jsou závislé na složení směsi, totéž samozřejmě platí i pro koeficienty přestupu hmoty. Výpočet se dá také provést postupem vyloženým pro výpočet extrakce či destilace pro stupňový kontakt a zjištěný počet rovnovážných stupňů se podle rovn.(19.3-1) převede na výšku absorbéru se spojitým kontaktem fází pomocí empirické výšky ekvivalentní rovnovážnému patru h_e .

V kap.19 byl odvozen vzorec pro výpočet aktivního objemu aparátu se spojitým kontaktem fází (19.3-12)

$$V = \int_0^{\dot{n}_{kw}} \frac{d\dot{n}_{kw}}{\phi_{kw} a_w} \quad (19.3-12)$$

kde ϕ_{kw} je intenzita toku látkového množství složky k fázovým rozhraním, a_w je hustota plochy fázového rozhraní v aktivním objemu absorbéru a $d\dot{n}_{kw}$ diferenciál toku složky fázovým rozhraním. Jeho rozepsání pomocí koncentrace bylo probíráno v předešlém oddílu. Rychlost absorpce se vyjádří součinem objemového koeficientu přestupu hmoty a rozdílu koncentrací představujícího hybnou sílu absorpce podle rovn.(22.4-6), zapsané zde pro látkové množství

$$\phi_{kw} a_w = \pm k_z a_w (z_k - z_{kw}) \quad (22.4-6a)$$

kde k_z je koeficient přestupu hmoty pro hybnou sílu vyjádřenou v obecných molárních koncentracích z_k . Vztah mezi z_k a z_{kw} se obdrží z materiálové bilance, z rovnice rovnováhy a z obdoby rovn.(22.5-7). Integrace se provádí numericky, v jednoduchých případech existuje

analytické řešení. Výška aktivního prostoru aparátu s konstantním průřezem se určí dělením aktivního objemu jeho průřezem.

Průřez absorberu se počítá z objemového toku vstupujícího plynu a jeho rychlosti zprůměrněné podle průřezu (mimovrstvová rychlost) při podmínkách v absorberu v místě přívodu plynu podle vzorce [viz rovn.(3-7)]

$$S = \frac{\dot{V}_{gi}}{\langle v_{gi} \rangle} \quad (23.1-11)$$

Při návrhovém výpočtu je objemový tok plynu znám a rychlost plynu vyplývá z ekonomických propočetů. Má hodnotu menší než při zahlcení absorberu. Pro rychlosti fází při zahlcení existují empirické vztahy jako je např. rovn. (29.3-3).

Hydrodynamika fází ovlivňuje kinetiku transportu hmoty tak, že s rostoucí rychlostí fází roste intenzita turbulentních fluktuací unášejících složku směsi směrem k fázovému rozhraní či naopak. Tím se zintenzívňuje transport hmoty mezi fázemi a rozměry zařízení (a tedy investiční náklady) mohou být menší. S rostoucí hodnotou toku plynu však narůstá tlaková ztráta v absorberu, rostou tedy náklady na dopravu plynu, proudící plyn v absorberu s výplní nebo se zkrápěnými stěnami nebo patrovou věží může strhovat kapky kapaliny, a tak narušit protiproud fází, takže v blízkosti podmínek zahlcení se může zhoršit dělicí schopnost absorberu. Proto používané rychlosti fází činí běžně jen 50 až 70 % rychlosti při zahlcení (obvykle používané rychlosti zprůměrněné podle průřezu absorberu bývají řádově pro kapalinu 10^{-2} m s^{-1} a pro plyn při atmosférickém tlaku 10^{-1} m s^{-1}).

V úvodu tohoto oddílu je kvalitativní výklad absorpce a informace o rozličných typech absorberů. Převážná část oddílu obsahuje výchozí rovnice pro výpočet absorberu se spojitým kontaktem fází, tj. vyjádření fázové rovnováhy, materiálovou a entalpickou bilanci a rovnici rychlosti absorpce.

23.2 Izotermní absorpce plynu s malou koncentrací absorbentu

Jestliže změna toků fází způsobená změnou koncentrace rozpustné složky plyné směsi v obou fázích nepřesahuje významně chybu jejich měření, je možné toky fází při průchodu absorberem považovat za konstantní. To je běžné při malých koncentracích rozpustné složky (např. $< 1 \%$ v obou fázích). V tomto oddílu se vykládají rovnice absorpce při protiproudu se spojitým kontaktem fází, je-li koncentrace rozpustné složky plynu malá. Pak je malé i množství plynu pohlceného v kapalině a tedy i změna entalpie při absorpci. Absorpce plynu s malou koncentrací absorbované složky se tedy považuje za izotermní proces (podobně jako extrakce) a není nutná bilance entalpie.

Z materiálové bilance a z rovnovážného vztahu se dá určit minimální spotřeba absorpčního činidla. Ze spojení materiálové bilance s rovnicí přestupu či prostupu hmoty, tj. s rovnicí rychlosti absorpce, se odvozuje vyjádření počtu převodových jednotek. Ten obvykle slouží k určení velikosti absorberu. Pokud má absorbovaná složka konstantní hodnotu rovnovážného poměru, je při malé koncentraci této složky konstantní hodnota faktoru výměny hmoty a činnost absorberu se dá popsat jediným vzorcem podobně jako při extrakci.

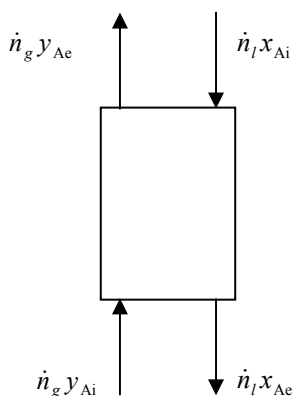
23.2.1 Minimální hodnota toku rozpouštědla

Zde se zabýváme plynou směsí dvou složek, z nichž pouze jedna je rozpustná v kapalném rozpouštědle. Bilance látkového množství (23.1-3) pro ustálenou absorpci při protiproudu, zapsaná pro složku A, se při konstantních tocích fází zjednoduší na rovnici (viz obr. 23.2a):

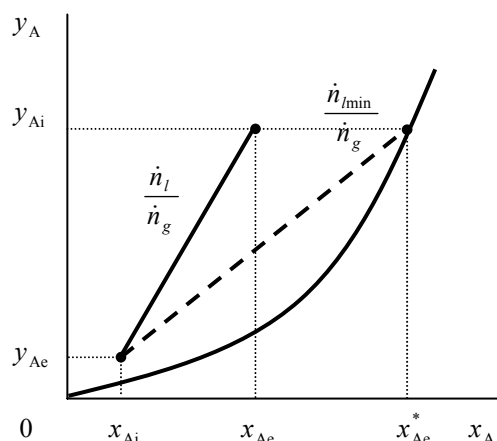
$$\dot{n}_l x_{Ai} + \dot{n}_g y_{Ai} = \dot{n}_l x_{Ae} + \dot{n}_g y_{Ae} \quad [\dot{n}_g = \text{konst}, \dot{n}_l = \text{konst}] \quad (23.2-1)$$

Rovnice poskytuje vztah mezi koncovými koncentracemi a toky fází.

Pokud je třeba navrhnout absorbér, bude zadána hodnota toku, složení, teploty a tlaku zpracovávané plyné směsi a podíl složky, který se má absorbovat; volí se vhodné kapalně absorpční činidlo. Hodnota jeho toku absorbérům závisí na výsledku ekonomické analýzy procesu. S rostoucí hodnotou toku tekutin roste rychlost absorpce, klesá koncentrace absorbované složky v odtékajícím roztoku a rostou náklady na dopravu tekutin.



Obr. 23.2a. Bilanční schéma absorbérů při protiproudu



Obr. 23.3. Minimální spotřeba rozpouštědla

K již vyjmenovaným požadavkům na absorpční činidlo patří též možnost toho, že se dá opakovaně používat. Po regeneraci rozpouštědla v něm zůstane malé množství pohlcované složky a tomu odpovídající hodnotu x_{Ai} považujeme za známou. Obvykle je zadán stupeň odstranění absorbované složky z plynu^{*)}, tedy hodnota y_{Ae} , a proto zůstávají neurčené proměnné x_{Ae} a $\dot{n}_l$. Z nich jednu volíme a druhá se vypočte z bilance.

Při protiproudu fází existuje podobně jako při rektifikaci či extrakci dolní mez toku rozpouštědla, při které lze ještě alespoň teoreticky dosáhnout požadované výstupní koncentrace absorbované složky. Nazývá se *minimální hodnota toku absorpčního činidla*. Nastane, když se dosáhne rovnováhy mezi koncentracemi absorbované složky v obou fázích

^{*)} V Příkladech se obvykle v zadání úloh používá relativního pohlceného množství θ , tj. podílu přiváděné rozpustné složky, který přechází do kapaliny

$$\theta = (\dot{n}_{Agi} - \dot{n}_{Age}) / \dot{n}_{Agi}$$

kde $\dot{n}_{Agi}$ je přítok a $\dot{n}_{Age}$ je odtok látkového množství složky A v plyné směsi. Pro konstantní toky fází z toho plyne

$$\theta = 1 - (y_{Ae} / y_{Ai})$$

Tato rovnice umožňuje spočítat molární zlomek absorbované složky v odcházejícím plynu.

v určitém průřezu absorbéru, např. na jeho konci. Dá se vypočítat a přípustná hodnota toku rozpouštědla musí být větší než minimální.

Graficky jsou podmínky při existenci minimální hodnoty toku absorpčního činidla znázorněny na *obr. 23.3* obsahujícím rovnovážnou čáru a bilanční úsečku spojující body (x_{Ai}, y_{Ae}) a (x_{Ae}, y_{Ai}) . Tato úsečka je grafické vyjádření bilance látkového množství rozpustné složky A. Bilance (23.2-1) se dá upravit na tvar směrnice přímky procházející body (x_{Ai}, y_{Ae}) a (x_{Ae}, y_{Ai}) :

$$\frac{y_{Ai} - y_{Ae}}{x_{Ae} - x_{Ai}} = \frac{\dot{n}_l}{\dot{n}_g} \quad (23.2-2)$$

Směrnice přímky je tedy poměr toků fází $\dot{n}_l / \dot{n}_g$.

Jestliže měníme hodnotu toku rozpouštědla, měníme hodnotu směrnice přímky, protože ostatní podmínky, tj. hodnota toku plynu, vstupní koncentrace absorbované složky a její výstupní koncentrace v plynu, jsou zadány. Podle *obr.23.3* bude pro každou hodnotu toku kapaliny vycházet pracovní přímka z bodu (x_{Ai}, y_{Ae}) a končit na souřadnici y_{Ai} . Pro tvar rovnovážné čáry na obrázku se při zmenšování toku kapaliny může dosáhnout rovnováhy, tj. kontaktu bilanční úsečky a rovnovážné čáry, na dolním konci absorbéru, kudy vstupuje plyn a odtéká roztok. Pak je $\dot{n}_l = \dot{n}_{lmin}$ a v rovn.(23.2-2) se místo x_{Ae} dosadí x_{Ae}^* .

Pokud však tvar rovnovážné čáry nebude konkávní, jako na obrázku, ale konvexní, může se pracovní přímka při zmenšování směrnice stát její tečnou, a pak dojde k rovnováze někde uvnitř absorbéru (viz *obr.23.7*). Při rovnováze mezi fázemi v daném průřezu je požadované dělení teoreticky možné pouze v aparátu nekonečně vysokém (viz analogické situace při rektifikaci či extrakci). Se zmenšováním hodnoty toku kapaliny tedy rostou náklady na konstrukci absorbéru, ale koncentrace absorbované složky se v produkovaném roztoku zvyšuje, lépe se tedy využívá kapacita rozpouštědla a snižují se náklady na jeho regeneraci.

Při souproudu není omezena spotřeba rozpouštědla směrem k nižším hodnotám a horní mez je určena přípustným poklesem tlaku. Ovšem změna koncentrace odpovídá jednostupňovému aparátu.

23.2.2 Výška absorbéru

Nyní se budou vyloženy způsoby výpočtu výšky absorbéru se spojitým kontaktem fází. Potřebná výška závisí na kinetice transportu hmoty. Tu popisuje rovnice přestupu hmoty probíraná v předešlé kapitole. Vztah mezi koncentracemi poskytuje bilance absorbované složky a vyjádření fázové rovnováhy. Bude se předpokládat konstantní průřez absorbéru.

Výška aktivního objemu absorbéru při absorpci plynné složky A je podle rovn.(19.3-12)

$$h = \frac{V}{S} = \frac{1}{S} \int_{\dot{n}_w} \frac{d\dot{n}_{Aw}}{\phi_{Aw} a_{Aw}} \quad (23.2-3)$$

Na *obr. 23.4* je schéma diferenciálního úseku absorbéru se spojitým kontaktem fází, který pracuje při protiproudu. Pro tok složky A fázovým rozhraním bude podle rovn.(23.1-7) platit

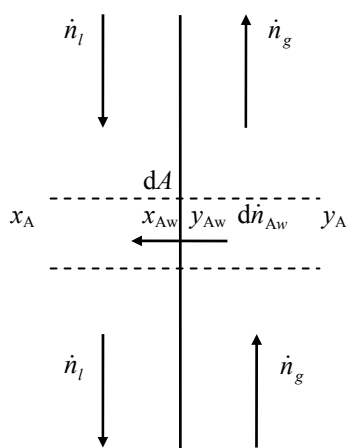
$$d\dot{n}_{Aw} = -\dot{n}_l dx_A = -\dot{n}_g dy_A \quad [\dot{n}_l = \text{konst} , \dot{n}_g = \text{konst}] \quad (23.1-7)$$

Rychlost absorpce z rovn.(22.4-6) a podle *obr.23.4* je

$$\phi_{Aw} a_w = k_x a_w (x_{Aw} - x_A) = k_y a_w (y_A - y_{Aw}) \quad (23.2-4)$$

Dosazením do vztahu (23.2-3) plyne pro výšku absorberu

$$h = \int_0^{\dot{n}_{Aw}} \frac{d\dot{n}_{Aw}}{\phi_{Aw} a_w S} = \int_{x_{Ai}}^{x_{Ae}} \frac{\dot{n}_l dx_A}{k_x a_w S (x_{Aw} - x_A)} = \int_{y_{Ae}}^{y_{Ai}} \frac{\dot{n}_g dy_A}{k_y a_w S (y_A - y_{Aw})} \quad (23.2-5)$$



Obr.23.4. Schéma diferenciálního úseku absorberu

Integrál se řeší některou z numerických metod. Zlomek, který má v čitateli tok látkového množství fáze a ve jmenovateli součin koeficientu přestupu hmoty, hustoty mezifázového povrchu a_w a průřezu absorberu S , má rozměr délky a nazývá se *výška převodové jednotky přestupu hmoty*

$$h_x \equiv \frac{\dot{n}_l}{k_x a_w S}, \quad h_y \equiv \frac{\dot{n}_g}{k_y a_w S} \quad (23.2-6)$$

Integrál tedy lze zapsat ve tvaru

$$h = \int_{x_{Ai}}^{x_{Ae}} h_x \frac{dx_A}{x_{Aw} - x_A} = \int_{y_{Ae}}^{y_{Ai}} h_y \frac{dy_A}{y_A - y_{Aw}} \quad (23.2-7)$$

K řešení je třeba znát vztah mezi integrační proměnnou a ostatními veličinami v integrandu. Při malé koncentraci rozpustné složky jsou veličiny obsažené v definici výšky převodové jednotky konstantní. Proto výška převodové jednotky nezávisí na velikosti hodnoty integrační proměnné. Výška aktivního objemu absorberu pak je

$$h = h_x \int_{x_{Ai}}^{x_{Ae}} \frac{dx_A}{x_{Aw} - x_A} = h_y \int_{y_{Ae}}^{y_{Ai}} \frac{dy_A}{y_A - y_{Aw}} \quad (23.2-8)$$

V rovnici je integrál, jenž obsahuje koncentrace v určitém průřezu absorberu (viz obr. 23.4) a ty se mění v rozsahu integračních mezí.

Vztah mezi zprůměrněnou koncentrací a koncentrací na fázovém rozhraní udává rovn.(23.2-4)

$$\frac{y_A - y_{Aw}}{x_A - x_{Aw}} = -\frac{k_x}{k_y} \quad (23.2-9)$$

což je obdoba rovn.(22.5-7). Rovnice obsahuje čtyři proměnné koncentrace. K dané hodnotě integrační proměnné je třeba najít hodnoty ostatních tří koncentračních veličin. Vedle rovn.(23.2-9) jsou tedy třeba ještě další dvě rovnice. Vztah mezi x_A a y_A poskytuje bilance látkového množství. V úseku mezi libovolným průřezem a jedním z konců absorberu je integrál rovn.(23.1-7)

$$y_A = \frac{\dot{n}_l}{\dot{n}_g}(x_A - x_{Ae}) + y_{Ai} \quad (23.2-10)$$

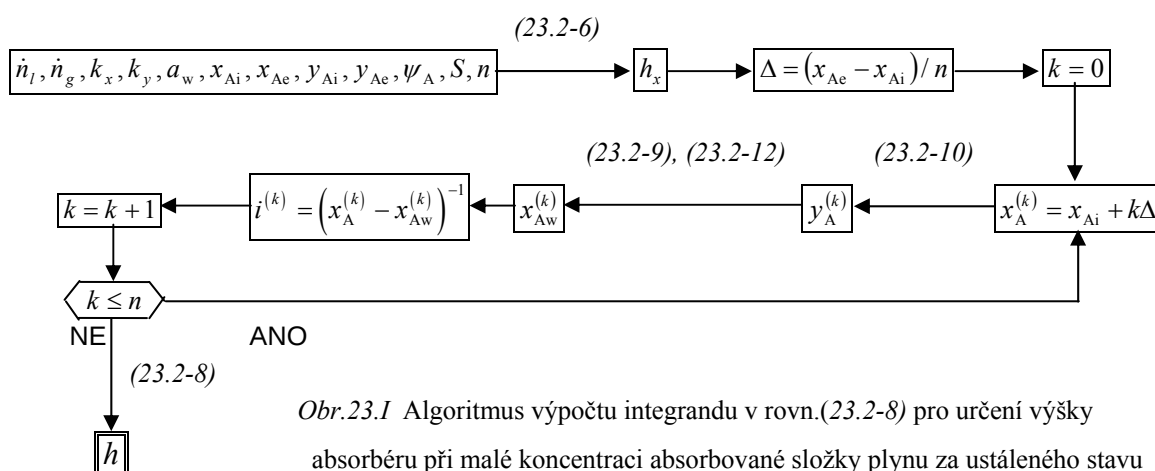
nebo

$$y_A = \frac{\dot{n}_l}{\dot{n}_g}(x_A - x_{Ai}) + y_{Ae} \quad (23.2-11)$$

Vztah mezi koncentracemi na fázovém rozhraní je rovnovážný

$$y_{Aw} = \psi_{Aw} x_{Aw} \quad (23.2-12)$$

Když se např. y_A v rovn.(23.2-9) eliminuje pomocí rovn.(23.2-10) či (23.2-11) a y_{Aw} pomocí rovn.(23.2-12), získá se vztah mezi x_{Aw} a x_A potřebný k řešení prvního integrálu v rovn.(23.2-8). Pro každou zvolenou hodnotu x_A se tak obdrží hodnota integrandu a provede se numerická integrace. Příklad řešení je P15-5 v *Příkladech*. Algoritmus výpočtu znázorňuje obr.23.I. Obdobně se po eliminaci koncentrace v kapalině vyřeší integrál s integrační proměnnou y_A .



5.2.2.1 Konstantní hodnota rovnovážného poměru

Výpočet výšky absorberu se zjednoduší, když se dá předpokládat konstantní hodnota rovnovážného poměru. Při malých koncentracích rozpustné složky lze očekávat, že hodnota aktivitního koeficientu v rovn.(19.2-14) se blíží jedné a při tlacích blízkých tlaku atmosférickému se fugacitní koeficient složky rovněž blíží jedné, takže platí rovn.(23.1-2). Henryův koeficient závisí na teplotě, ovšem předpokládá se izotermní absorpce (předpoklad je pro malé koncentrace oprávněn), takže $H_A = \text{konst.}$ Pokles tlaku při průchodu plynu absorberem je obvykle malá veličina vzhledem k hodnotě celkového tlaku, takže i hodnotu tlaku lze považovat za konstantní. Z toho plyne $\psi_A = \text{konst.}$

Pokud je hodnota rovnovážného poměru konstantní, je výhodné k výpočtu absorberu použít koeficienty prostupu hmoty. Hybná síla prostupu hmoty neobsahuje koncentrace na fázovém rozhraní a vyžaduje pouze zprůměrněné koncentrace v obou fázích. Intenzita toku látkového množství je podle rovn.(22.5-2)

$$\phi_{Aw} = K_x (x_A^* - x_A) = K_y (y_A - y_A^*) \quad (23.2-13)$$

analogicky k rovn. (23.2-4). Podobně rovnici (23.2-5) odpovídá rovnice prostupu hmoty pro výšku absorbérů

$$h = \int_{x_{Ai}}^{x_{Ae}} \frac{\dot{n}_l dx_A}{K_x a_w S (x_A^* - x_A)} = \int_{y_{Ae}}^{y_{Ai}} \frac{\dot{n}_g dy_A}{K_y a_w S (y_A - y_A^*)} \quad (23.2-14)$$

kde se rovnovážné koncentrace počítají ze zprůměrněné koncentrace složky v druhé fázi

$$x_A^* = y_A / \psi_A, \quad y_A^* = \psi_A x_A \quad (23.2-15)$$

Obdobu výšky převodové jednotky přestupu hmoty je *výška převodové jednotky prostupu hmoty*, kterou definují vztahy

$$H_x \equiv \frac{\dot{n}_l}{K_x a_w S}, \quad H_y \equiv \frac{\dot{n}_g}{K_y a_w S} \quad (23.2-16)$$

Hodnoty výšky převodové jednotky se dají spočítat z hodnot koeficientů přestupu či prostupu hmoty nebo se stanovují experimentálně. Při malých koncentracích složky A jsou konstantní. Protože hodnoty koeficientů prostupu hmoty nejsou podle rovn.(22.5-4) navzájem nezávislé, nejsou nezávislé ani hodnoty výšek převodové jednotky a platí

$$\frac{H_x}{H_y} = \frac{\dot{n}_l}{\dot{n}_g} \frac{K_y}{K_x} = \frac{\dot{n}_l}{\dot{n}_g \psi_A} \equiv \zeta = (\zeta')^{-1} \quad (23.2-17)$$

Touto rovnicí byl zaveden *faktor výměny hmoty* při absorpci.

Ze stejných důvodů jako při přestupu hmoty budou hodnoty výšky převodové jednotky prostupu hmoty konstantní a vyjádření výšky absorbérů bude

$$h = H_x \int_{x_{Ai}}^{x_{Ae}} \frac{dx_A}{x_A^* - x_A} = H_y \int_{y_{Ae}}^{y_{Ai}} \frac{dy_A}{y_A - y_A^*} \equiv H_x N_x = H_y N_y \quad (23.2-18a)$$

Veličiny N_x a N_y označují *počet převodových jednotek prostupu hmoty*. Explicitní vyjádření je podle rovn.(23.2-18) a (23.2-16)

$$N_x = \frac{h}{H_x} = \int_{x_{Ai}}^{x_{Ae}} \frac{dx_A}{x_A^* - x_A} = \frac{K_x a_w S h}{\dot{n}_l}, \quad N_y = \frac{h}{H_y} = \int_{y_{Ae}}^{y_{Ai}} \frac{dy_A}{y_A - y_A^*} = \frac{K_y a_w S h}{\dot{n}_g} \quad (23.2-18b)$$

Vyjádření připomíná St_D z rovn.(22.4-11). Vztah mezi N_x a N_y plyne z rovn. (23.2-17)

$$N_y = \zeta N_x = (\zeta')^{-1} N_x \quad (23.2-19)$$

Rovnice (23.2-18a) umožňuje jednoduchý způsob výpočtu výšky absorberu ze součinu výšky a počtu převodových jednotek. Počet převodových jednotek se určí řešením příslušného integrálu. Vztah mezi veličinami v integrandu poskytuje bilance látkového množství (23.2-10) nebo (23.2-11) a rovnovážný vztah (23.2-15).

Když je konstantní hodnota rovnovážného poměru, existuje analytické řešení integrálu. Z rovn.(23.2-18b) plyne diferenciací [s přihlédnutím k rovn.(23.2-3) a (23.1-7)]

$$\frac{dx_A}{x_A^* - x_A} = -dN_x \quad (23.2-20)$$

a

$$\frac{dy_A}{y_A - y_A^*} = -dN_y \quad (23.2-21)$$

Tato rovnice se upraví rozšířením konstantní hodnotou rovnovážného poměru

$$\frac{d(y_A / \psi_A)}{(y_A / \psi_A) - (y_A^* / \psi_A)} = \frac{dx_A^*}{x_A^* - x_A} = -dN_y \quad (23.2-22)$$

Odečte se rovn.(23.2-20) a využije se vztahu (23.2-19)

$$\frac{dx_A^*}{x_A^* - x_A} - \frac{dx_A}{x_A^* - x_A} = \frac{d(x_A^* - x_A)}{x_A^* - x_A} = d \ln(x_A^* - x_A) = -dN_y + dN_x = (1 - \zeta)dN_x \quad (23.2-23)$$

Hodnoty faktoru výměny hmoty i výšky převodové jednotky jsou konstantní, proto je integrál rovnice

$$N_x = \frac{h}{H_x} = \frac{1}{1 - \zeta} \ln \frac{x_{Ae}^* - x_{Ae}}{x_{Ai}^* - x_{Ai}} \quad (23.2-24a)$$

Do vzorce jsme podle rovn. (23.2-18) zavedli výšku absorberu h . Obdobně se odvodí vyjádření koncentracemi plynné složky

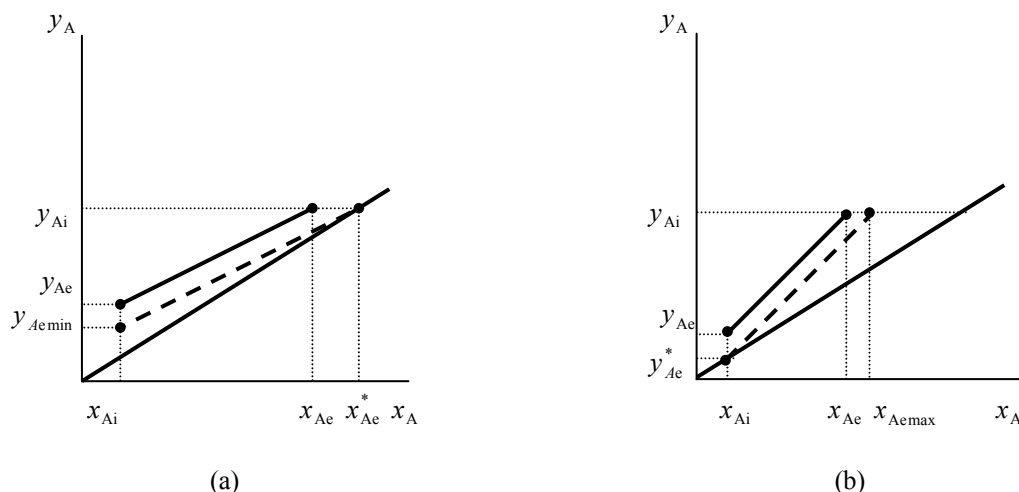
$$N_y = \frac{h}{H_y} = \frac{1}{1 - \zeta} \ln \frac{y_{Ai} - y_{Ai}^*}{y_{Ae} - y_{Ae}^*} \quad (23.2-24b)$$

Podobně jako při popisu extrakce s nemísitelnými rozpouštědly se dají vzorce převést do bezrozměrového tvaru neobsahujícího koncentrace. Zavádí se *účinek absorberu* vyjadřující poměr změny koncentrace rozpustné složky ve zvolené fázi a maximálně teoreticky možné změny koncentrace v této fázi (v aparátu, který má plochu mezifázového rozhraní blízkou nekonečnu). Maximální změna koncentrace nastane, když je koncentrace rozpustné složky ve vystupujícím proudu v rovnováze s koncentrací ve vstupujícím proudu v témž průřezu (viz obr.23.5)

$$\eta_x \equiv \frac{x_{Ae} - x_{Ai}}{x_{Ae}^* - x_{Ai}} \quad , \quad \eta_y \equiv \frac{y_{Ai} - y_{Ae}}{y_{Ai} - y_{Ae}^*} \quad (23.2-25)$$

Hodnota účinku charakterizuje dělicí schopnost výměníku hmoty a pohybuje se v mezích nula a jedna. Čím je tato hodnota blíže jedné, tím větší podíl absorbované složky přejde do kapaliny. Stejně jako při výkladu extrakce platí mezi η_x a η_y vztah

$$\eta_y = \zeta \eta_x \quad (23.2-25a)$$



Obr. 23.23. Grafické znázornění účinku výměníku hmoty

a) $\zeta < 1$; b) $\zeta' < 1$

Eliminací koncentrací pomocí účinku plyne např. z rovn.(23.2-24a)

$$N_x = (1 - \zeta)^{-1} \ln \frac{1 - \eta_x}{1 - \zeta \eta_x} \quad (23.2-26)$$

$$N_x = \frac{\eta_x}{1 - \eta_x} = N_y = \frac{\eta_y}{1 - \eta_y} \quad [\zeta = 1] (23.2-26a)$$

Vzorec pro $\zeta = 1$ plyne z l'Hospitalova pravidla. Dále např. pro η_x dostáváme

$$\eta_x = \frac{1 - \exp[-(1 - \zeta)N_x]}{1 - \zeta \exp[-(1 - \zeta)N_x]} \quad (23.2-27)$$

$$\eta_x = \frac{N_x}{1 - N_x} \quad [\zeta = 1] (23.2-27a)$$

Z trojice bezrozměrových veličin lze určit kteroukoli z nich, jsou-li známy zbývající dvě. Je-li neznámá hodnota ζ , určí se iteračně. Odvození rovnic je podobné jako pro analogické vzorce popisující stupňovou extrakci s nemísitelnými rozpouštědly. I když jsou vzorce podobné, nejsou stejné.

Uvedené rovnice popisují činnost absorbéru, neboť obsahují všechny veličiny, které na ni mají vliv, tj. toky a složení proudů, rovnovážný poměr a počet převodových jednotek zahrnující kinetiku děje a rozměry aparátu. Grafické znázornění těchto vzorců poskytující

možnost rychlého řešení úloh obsahuje kapitola 15 v *Příkladech*, kde je z grafu 15-5 možné určit např. neznámou hodnotu faktoru výměny hmoty bez iterace.

Výšku ekvivalentní rovnovážnému patru h_e definovanou rovn.(19.3-1) získáme např. z rovnice (23.2-26) a obdoby rovn.(20.3-49)

$$h_e = \frac{h}{N} = H_x \frac{N_x}{N} = \frac{H_x \ln \zeta}{1 - \zeta} \quad (23.2-28)$$

Vztahy platné pro konstantní hodnotu faktoru výměny hmoty poskytují rychle výsledek a proto se užívají i když se hodnoty rovnovážného poměru a toků fází v absorbéru mění. Do rovnic se dosazuje jejich střední hodnota (geometrický či aritmetický střed hodnot na obou koncích absorbéru). Hodí se pro orientační výpočty, při opakovaných výpočtech a pro ověření výsledku z počítače.

V tomto oddílu byla popsána absorpce složky z plynné směsi, jejíž převážná část je v kapalině nerozpustná, a toky obou fází při průchodu absorbérem zůstávají přibližně konstantní. Popis se týkal spojitého kontaktu fází při konstantní teplotě a byl vyjádřen bilancí rozpustné složky, rovnicí fázové rovnováhy a rovnicí prostupu hmoty. V období k výpočtu výměníku tepla bylo využito pojmu převodové jednotky, který zjednodušuje určení výšky výměníku hmoty na součin výšky a počtu převodových jednotek. Konstantnost faktoru výměny hmoty (absorpčního faktoru) umožnila popsat činnost absorbéru jediným vzorcem vyjadřujícím vztah mezi absorpčním faktorem, počtem převodových jednotek a účinkem.

23.3 Absorpce plynu s velkou koncentrací absorbentu

Když je koncentrace rozpustné složky v plynu velká, klesá při průchodu absorbérem významně hodnota toku plynu a roste hodnota toku kapaliny. Bilance absorbované složky pak obsahuje proměnné toky fází, stane se nelineární rovnicí. Za předpokladu, že mezi fázemi přechází pouze absorbovaná složka, lze rovnici linearizovat, podobně jako při extrakci směsí s nemísitelnými rozpouštědly, zavedením relativních zlomků.

23.3.1 Materiálová bilance

Jestliže se toky plynné a kapalně směsi při průchodu absorbérem výrazně mění, je při protiproudu ustálená bilance absorbované složky rovn.(23.1-3) (viz obr. 23.2a)

$$\dot{n}_{li} x_{Ai} + \dot{n}_{gi} y_{Ai} = \dot{n}_{le} x_{Ae} + \dot{n}_{ge} y_{Ae} \quad (23.3-1)$$

a bilance směsí rovn.(23.1-4)

$$\dot{n}_{li} + \dot{n}_{gi} = \dot{n}_{le} + \dot{n}_{ge} \quad (23.3-2)$$

Předpokládáme, že je rozpustnost plynné složky B nevýznamná, a že rovnovážný tlak rozpouštědla je tak malý, že se dá zanedbat jeho koncentrace v plynu a ztráty odpařováním při průchodu absorbérem. Za těchto podmínek můžeme považovat toky složek B a C absorbérem za konstantní a vypočteme je z rovnic

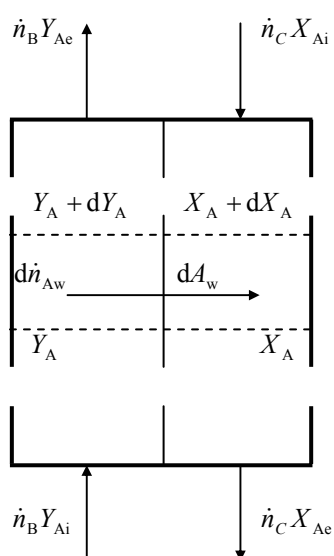
$$\dot{n}_B = \dot{n}_{gi}(1 - y_{Ai}) = \dot{n}_{ge}(1 - y_{Ae}) \quad (23.3-3)$$

a

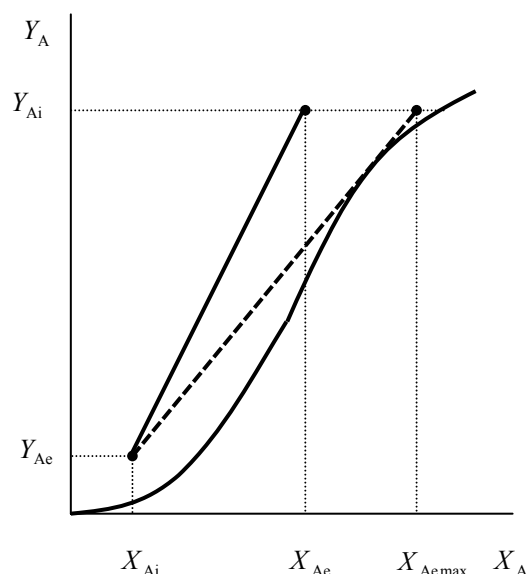
$$\dot{n}_C = \dot{n}_{fi}(1 - x_{Ai}) = \dot{n}_{fe}(1 - x_{Ae}) \quad (23.3-4)$$

Zvolíme je za referenční složky v relativních molárních zlomcích $X_A = x_A / x_C$ a $Y_A = y_A / y_B$ [viz rovn.(23.1-8) a (23.1-9)]. Podobně jako v kap.20 obdržíme po dosažení do rovnovážného vztahu (23.1-1)

$$Y_A = \frac{\psi_A}{1 - (\psi_A - 1)X_A} X_A = [\psi_A + (\psi_A - 1)Y_A] X_A = \varphi_A X_A \quad (23.3-5)$$



Obr.23.6. Bilanční schéma absorberu



Obr. 23.7.Minimální tok absorpčního činidla

Hodnota rovnovážného poměru φ_A pro relativní molární zlomky se blíží hodnotě ψ_A pro obyčejné molární zlomky, když $\psi_A \rightarrow 1$ a samozřejmě při malé koncentraci složky A.

Bilanci látkového množství rozpustné složky obdržíme integrací rovn. (23.1-10) pro celý absorber (viz obr. 23.6)

$$\dot{n}_C (X_{Ae} - X_{Ai}) = \dot{n}_B (Y_{Ai} - Y_{Ae}) \quad (23.3-6)$$

Graficky je tato rovnice znázorněna úsečkou, která představuje změnu koncentrace v daném aparátu. Je-li zadán pohlcený podíl plynu θ (viz poznámku pod čarou na str.130), vypočte se hodnota Y_{Ae} z hodnoty Y_{Ai} podle vzorce

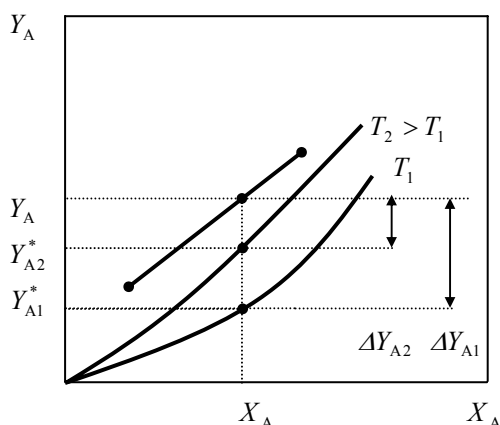
$$Y_{Ae} = (1 - \theta) Y_{Ai} \quad (23.3-7)$$

Jsou-li zadány hodnoty Y_{Ai} , Y_{Ae} a $\dot{n}_B$, je levá strana rovnice (23.3-6) konstantní a při zadané hodnotě X_{Ai} závisí hodnota X_{Ae} na hodnotě toku rozpouštědla $\dot{n}_C$.

Minimální tok rozpouštědla^{*)} (tj. fázová rovnováha v některém průřezu absorberu) je znázorněn graficky dotykem pracovní přímky s rovnovážnou čarou, která může mít tvar znázorněný na *obr. 23.3*, nebo na *obr. 23.7*. V tomto druhém případě nastává rovnováha mezi plynem a kapalinou uvnitř absorberu. V roztoku odváděném z absorberu pak není koncentrace absorbované složky rovnovážná, ale její hodnota je maximální teoreticky možná. Proto obecný vztah pro výpočet minimálního toku rozpouštědla je:

$$\frac{\dot{n}_{Cmin}}{\dot{n}_B} = \frac{Y_{Ai} - Y_{Ae}}{X_{Ae max} - X_{Ai}} \quad (23.3-8)$$

Pro zadaný tok plynu je maximální hodnota toku kapaliny určena podmínkami zahlcení, při kterých je tedy potřebný průřez absorberu nejmenší. Při protiproudu jsou toky fází největší v místě přívodu plynu (na dolním konci absorberu), proto se podmínky zahlcení počítají právě pro tento průřez. Skutečná hodnota toku kapaliny musí být menší než při zahlcení a měla by příslušet minimálním celkovým nákladům, tj. ekonomickému optimu. To samozřejmě také závisí na případné regeneraci absorpčního činidla.



Obr. 23.8. Vliv teploty na absorpci

23.3.2 Bilance entalpie

Při větších koncentracích rozpustné složky v plyné směsi může změna entalpie při rozpouštění plynu způsobit významnou změnu teploty kapaliny protékající absorberem, a tím i změnu teploty plynu^{**)}. Tento efekt je způsoben přechodem absorbované složky z plyného do kapalného skupenství, případnou chemickou reakcí a neidealitou roztoku, dále vlivem odpařování či kondenzace páry absorpčního činidla, sdílením tepla mezi kapalinou a plynem nebo mezi oběma tekutinami a okolím.

Zvýšení teploty zvyšuje hodnotu rovnovážného poměru a tedy zmenšuje rozpustnost plynu (kromě teplot blízkých kritické teplotě absorpčního činidla).

Na *obr. 23.8* je zakreslena bilanční úsečka spolu se dvěma izotermami vyjadřujícími fázovou rovnováhu. Hybná síla prostupu hmoty při absorpci bez chemické reakce s rostoucí teplotou klesá a na obrázku to znázorňují velikosti hybných sil $\Delta Y_A = Y_A - Y_A^*$ při koncentraci X_A v kapalině pro dvě teploty. Proto je při absorpci par obvyklé kapalinu chladit. V patrových absorberech je možné instalovat na jednotlivá patra trubky, jimiž protéká chladivo. V absor-

^{*)}Vedle termodynamického existuje hydrodynamické omezení toku kapaliny vlivem povrchového napětí jako např. v aparátech se stékajícím filmem kapaliny. Pod dolní mezí hodnoty toku se tenká vrstva kapaliny rozpadne na úzké praménky a zmenší se velmi podstatně hustota mezifázového povrchu.

^{**) Silně neizotermní je např. absorpce NH_3 , HCl či acetonu ve vodě, absorpce vodní páry či SO_3 v H_2SO_4 nebo absorpce uhlovodíkových plynů a par v organických rozpouštědlech. Při absorpci s chemickou reakcí má zvýšení teploty negativní vliv na rozpustnost ale pozitivní vliv na rychlost chemické reakce (např. absorpce CO_2 v alkalických roztocích).}

bérech s výplní se vrstva rozdělí na sekce a kapalina vytékající z dané sekce se vyvede z absorberu do výměníku tepla a po ochlazení se přivede do další sekce.

Entalpie plynu je

$$H_g = n_{Ag}(h_{Ag} - h_{A0}) + n_B(h_B - h_{B0}) \quad (23.3-9)$$

kde značí h_k molární entalpii čisté složky $k = A, B$ při podmínkách směsi (plyn je ideální směs) a h_{k0} je molární entalpie této složky ve zvoleném referenčním stavu. Entalpie kapaliny, která je obecně neideální směsí, se vyjádří molárními entalpiemi složek h_k , $k = A, C$ a molární směšovací entalpií ΔH_s

$$H_l = n_{Al}(h_{Al} - h_{A0}) + n_C(h_C - h_{C0}) + \Delta H_s \quad (23.3-10)$$

Relativní molární entalpie jsou $I_g = H_g/n_B$, $I_l = H_l/n_C$ a $\Delta I_s = \Delta H_s/n_C$, tj.

$$I_g = Y_A(h_{Ag} - h_{A0}) + h_B - h_{B0} \quad (23.3-11)$$

$$I_l = X_A(h_{Al} - h_{A0}) + h_C - h_{C0} + \Delta I_s \quad (23.3-12)$$

To dosadíme do entalpické bilance, která je v rozdílovém tvaru

$$\dot{n}_B(I_{gi} - I_{ge}) = \dot{n}_C(I_{le} - I_{li}) + \dot{Q}_e \quad (23.3-13)$$

Výsledný odtok energie teplosměnnou plochou má symbol $\dot{Q}_e$.

Za předpokladu, že změna teploty je způsobena pouze rozpouštěním plynu, se při konstantních hodnotách toku rozpouštědla C a složky B plynu vypočte teplota kapaliny opouštějící absorber ze vzorce (viz odvození v příloze B4):

$$t_{le} = t_{li} + \left[-\Delta I_{se} + \Delta I_{si} - (X_{Ae} - X_{Ai})\Delta h_{Aa} - \dot{Q}_e / \dot{n}_C \right] / \langle C_{pl} \rangle \quad (23.3-14)$$

kde $\langle C_{pl} \rangle = X_{Ac} \langle c_{pAl} \rangle + \langle c_{pCl} \rangle$ je střední relativní molární tepelná kapacita kapalného roztoku a $\Delta h_{Aa} = h_{Ai} - h_{A0}$ je molární absorpční (rozpouštěcí) entalpie složky A (změna entalpie při přechodu 1 molu složky z plynného skupenství do kapalného roztoku při teplotě, tlaku a složení roztoku).

Rovnice se dá využít k nalezení závislosti teploty kapaliny v absorberu na koncentraci absorbované složky v kapalině, jestliže veličiny pro koncový průřez (index e) nahradíme veličinami pro libovolný průřez absorberu. Pomocí tohoto vzorce je možné vyjádřit závislost rovnovážného poměru na koncentraci absorbované složky v neizotermní kapalině protékající absorberem.

Rovn. (23.3-14) byla odvozena za předpokladu, že odpařování kapaliny je nevýznamné. Chyba tohoto předpokladu roste s teplotou kapaliny. Proto je při větších změnách teploty nutné do bilance entalpie zahrnout vypařování rozpouštědla. Pak se koncentrace v kapalině vyjadřuje obyčejnými zlomky a rozložení teploty podél absorberu může vykazovat maximum v některém průřezu uvnitř absorberu. V praxi se osvědčilo přivádět do absorberu plyn předem zbavený páry rozpouštědla, neboť odpařování kapaliny výrazně zmenší potřebu dalšího chlazení. Vlivem zvýšení teploty se přiblíží rovnovážná čára bilanční čáře, tj. zmenší se hybná síla absorpce. Zvětšení výšky absorberu má pak poměrně malý vliv na jeho dělicí schopnost.

Poklesu velikosti hybné síly absorpce lze čelit zvětšením hodnoty toku kapaliny, vhodným umístěním teplosměnné plochy, změnou tlaku a uvedenou úpravou vstupního plynu (viz též lit. [65]).

23.3.3 Kinetika absorpce

Výška aktivní části absorbéru se spočte podle rovn.(19.3-12) v období k rovn.(23.2-5)

$$h = \frac{V}{S} = \int_0^{\dot{n}_A} \frac{d\dot{n}_{Aw}}{\phi_{kw} a_w S} = \int_{x_{Ai}}^{x_{Ae}} \frac{d(\dot{n}_l x_A)}{k_x a_w S (x_{Aw} - x_A)} = \int_{y_{Ae}}^{y_{Ai}} \frac{d(\dot{n}_g y_A)}{k_y a_w S (y_A - y_{Aw})} \quad (23.2-5a)$$

a v rovnici se dosadí pomocí relativních molárních zlomků. Vztah mezi molárními a relativními molárními zlomky plyne z definic (23.1-8) a (23.1-9). Proto je

$$x_{Aw} - x_A = \frac{X_{Aw}}{X_{Aw} + 1} - \frac{X_A}{X_A + 1} = \frac{X_{Aw} - X_A}{(X_{Aw} + 1)(X_A + 1)} \quad (23.3-15)$$

a

$$y_A - y_{Aw} = \frac{Y_A}{Y_A + 1} - \frac{Y_{Aw}}{Y_{Aw} + 1} = \frac{Y_A - Y_{Aw}}{(Y_A + 1)(Y_{Aw} + 1)} \quad (23.3-16)$$

Do čitatele integrálu se dosadí podle rovn.(23.1-10), takže

$$h = \frac{\dot{n}_C}{S} \int_{x_{Ai}}^{x_{Ae}} \frac{(X_{Aw} + 1)(X_A + 1) dX_A}{k_x a_w (X_{Aw} - X_A)} = \frac{\dot{n}_B}{S} \int_{y_{Ae}}^{y_{Ai}} \frac{(Y_{Aw} + 1)(Y_A + 1) dY_A}{k_y a_w (Y_A - Y_{Aw})} \quad (23.3-17)$$

Řešení integrálů je obdoba řešení rovn.(23.2-5).

Vezme-li se v úvahu závislost koeficientu přestupu hmoty na koncentraci popsaná rovn.(22.4-15), dá se rovn.(23.3-17) upravit na tvar

$$h = \frac{\dot{n}_C}{k_x^0 a_w S} \int_{x_{Ai}}^{x_{Ae}} \frac{dX_A}{\ln \frac{1 + X_{Aw}}{1 + X_A}} = \frac{\dot{n}_B}{k_y^0 a_w S} \int_{y_{Ae}}^{y_{Ai}} \frac{dY_A}{\ln \frac{1 + Y_A}{1 + Y_{Aw}}} \quad (23.3-17a)$$

Když se do rovn.(23.2-9) dosadí z rovn.(22.4-15), pak se získá vztah

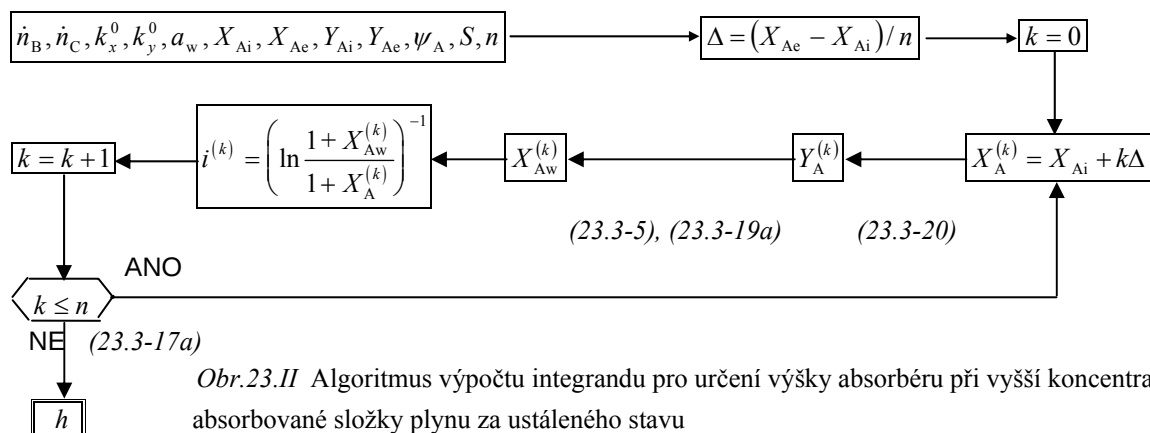
$$\frac{\ln \frac{1 - y_{Aw}}{1 - y_A}}{\ln \frac{1 - x_{Aw}}{1 - x_A}} = - \frac{k_x^0}{k_y^0}$$

jenž se dá upravit na

$$\frac{1 - y_{Aw}}{1 - y_A} = \left(\frac{1 - x_{Aw}}{1 - x_A} \right)^{-k_x^0/k_y^0} = \left(\frac{1 - x_A}{1 - x_{Aw}} \right)^{k_x^0/k_y^0} \quad (23.3-18)$$

a zapsat v relativních molárních zlomcích

$$\frac{1 + Y_A}{1 + Y_{Aw}} = \left(\frac{1 + X_{Aw}}{1 + X_A} \right)^{k_x^0/k_y^0} \quad (23.3-19)$$



Obr.23.II Algoritmus výpočtu integrandu pro určení výšky absorberu při vyšší koncentraci absorbované složky plynu za ustáleného stavu

Jestliže podíl rozdílů $(1 - y_{Aw})/(1 - y_A)$ nebo $(1 - x_A)/(1 - x_{Aw})$ leží v mezích $(1/2, 2)$, je možné nahradit exponenciální vztah rovnici

$$\frac{Y_A - Y_{Aw}}{X_A - X_{Aw}} = - \frac{k_x^0}{k_y^0} \frac{2 + Y_A + Y_{Aw}}{2 + X_A + X_{Aw}} \quad (23.3-19a)$$

Další rovnice je bilance látkového množství rozpustné složky pro úsek mezi libovolným průřezem absorberu a jeho koncem v období k rovn.(23.2-10) či (23.2-11)

$$Y_A = \frac{\dot{n}_C}{\dot{n}_B} (X_A - X_{Ae}) + Y_{Ai} = \frac{\dot{n}_C}{\dot{n}_B} (X_A - X_{Ai}) + Y_{Ae} \quad (23.3-20)$$

a rovnovážný vztah (23.3-5) mezi koncentracemi na fázovém rozhraní.

Řešení integrálu je numerické. Výpočetní algoritmus znázorňuje obr.23.II. Integrály zapsané v obyčejných zlomcích jsou rovn.(15-46) a (15-47) v Příkladech.

Za předpokladu, že tlak par rozpouštědla je při teplotě absorpce zanedbatelný, je možné popis absorpce založit na konstantnosti toků rozpouštědla a nerozpustného podílu plyné směsi. Koncentrace absorbované složky se vyjádřila pomocí relativních zlomků a byl získán vztah pro výpočet výšky absorberu. Diskutují se příčiny a následky zvýšení teploty v absorberu.

23.4 Absorpce s chemickou reakcí

Při fyzikální absorpci je kapacita absorpčního činidla omezena rozpustností plynu v kapalině při teplotě a tlaku v absorberu. Kapacitu činidla je možno podstatně zvětšit přidáním složky, která s absorbovaným plynem reaguje, tj. vlastně jej z roztoku odebírá a zvětšuje hybnou sílu absorpce. Toho se samozřejmě využívá. Naproti tomu ovšem přidaná složka zmenšuje rozpustnost absorbované složky (a tedy hybnou sílu absorpce) a náklady na reagens zvyšují náklady na absorpci.

Obvykle je reakce vratná a reagens se regeneruje a dodávané množství nahrazuje jeho ztráty vznikající během provozu (např. absorpce H_2S a CO_2 ve vodných roztocích alkanolaminů). V některých výroбах je sloučenina vzniklá při absorpci s chemickou reakcí požadovaným produktem (hydrogenace, halogenace, oxidace, výroba minerálních kyselin).

Rychlost absorpce s chemickou reakcí je ovlivňována současně rychlostí fyzikální difuze a rychlostí reakce. Poměr hodnot rychlosti reakce a rychlosti difuze charakterizuje hodnota Hattova kritéria

$$Ha = \frac{\sqrt{(rD_A / c_A)}}{k_c^o} \quad (22.4-12)$$

kde r je rychlost reakce definovaná např. rovnicí (28.4-4) a k_c^o je koeficient přestupu hmoty bez chemické reakce vztažený k molaritě. Absorbované množství závisí na hodnotě velikosti plochy mezifázového rozhraní a na objemu tekutiny (viz přílohu B4.2).

Když je rychlost reakce značně menší než rychlost difuze (hodnoty Hattova kritéria řádu 10^{-2} a menší), pronikne absorbovaná složka během průchodu absorbérem do celého objemu kapaliny, ale její doba prodlení v absorbéru nestačí k tomu, aby významný podíl složky zreagoval.

Při středně velké hodnotě rychlosti reakce a dostatečné rychlosti fyzikální difuze (hodnoty Hattova kritéria řádu 10^{-1} až 10^0) opět složka pronikne do celého objemu kapaliny, ale přitom z valné části zreaguje. Rychlost absorpce je pak úměrná velikosti zádrže kapaliny v absorbéru.

Je-li hodnota rychlosti reakce vysoká (řád hodnot Hattova kritéria 10^0 a větší), přemění se veškerá absorbovaná složka již v blízkosti fázového rozhraní na produkt chemické reakce. Rychlost absorpce je pak úměrná velikosti plochy fázového rozhraní.

Chemická reakce ovlivňuje též hybnou sílu absorpce. Hodnota x_{kw} je v rovnováze s hodnotou y_{kw} v plynu, ovlivňuje ji však přítomnost reagentu v roztoku, která rozpustnost vzhledem k fyzikální absorpci snižuje. Hodnota x_k je ve srovnání s hodnotou při fyzikální absorpci vždy menší, protože složky chemickou reakcí ubývá a při rychlé nevratné reakci může koncentrace klesnout na velmi malou hodnotu. Obvykle je tedy hybná síla absorpce s chemickou reakcí větší než při fyzikální absorpci. Podrobnější rozbor absorpce s chemickou reakcí obsahuje např. skriptum [46].

Teoretický popis absorpce s chemickou reakcí se týká fyzikální absorpce a kinetiky chemické reakce. Člen pro vliv chemické reakce je obsažen v materiálové bilanci reagující složky. Zde se bude předpokládat izotermní děj a nebude třeba entalpická bilance.

23.4.1 Absorpce v průtočném reaktoru s míchadlem

Necht' probíhá ustálená absorpce s chemickou reakcí v průtočném reaktoru s míchadlem, jímž protékají obě fáze při souproudu. Bilanční schéma tohoto procesu je na obr.23.9.

Bilance absorbované složky k vyjádřená v tocích je pro plyn

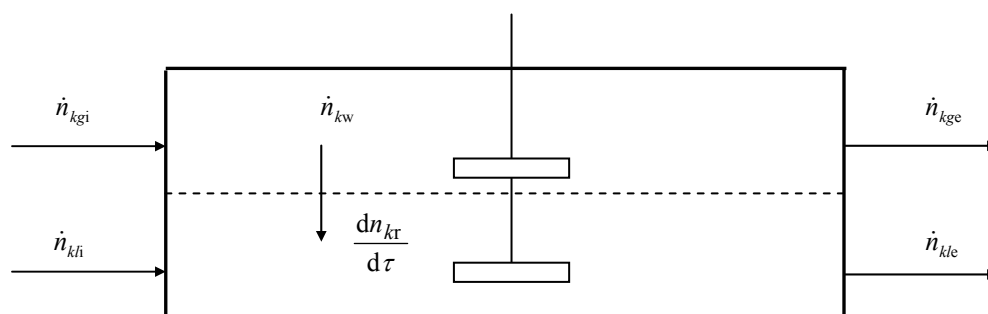
$$\dot{n}_{kgi} = \dot{n}_{kge} + \dot{n}_{kgw} \quad (23.4-1a)$$

a pro kapalnou fázi obsahující reagens

$$\dot{n}_{kli} + \dot{n}_{klw} + \frac{dn_{kr}}{d\tau} = \dot{n}_{kle} \quad (23.4-1b)$$

V koncentračním zápisu rovnic se v kapalně fázi obvykle používá molarity, takže platí $\dot{n}_{kl} = \dot{V}_l c_k$. Tok složky fázovým rozhraním popisuje rovnice přestupu hmoty v kapalině a pro dokonalé míchání platí podle rovn.(22.4-4)

$$\dot{n}_{klw} = k_c (c_{kw} - c_k) A_w = Ek_c^o a_w V (c_{kw} - c_k) \quad (23.4-2)$$



Obr. 23.9. Bilanční schéma pro absorpci s chemickou reakcí

kde symbol k_c označuje koeficient přestupu hmoty při absorpci s chemickou reakcí s hybnou silou vyjádřenou molaritami. Poměr rychlosti absorpce s chemickou reakcí k rychlosti absorpce bez chemické reakce (fyzikální absorpce) při stejné hybné síle se nazývá *reakční faktor* E . Jeho hodnotu umožňují vypočítat modely přestupu hmoty (viz přílohu B4.2, skriptum [46] a knihy [9] a [41]). Pokusně se zjišťuje v laboratorním aparátu. Obvykle se vyjadřuje poměrem hodnot koeficientů přestupu hmoty při absorpci s chemickou reakcí a koeficientu při fyzikální absorpci $E = k_c / k_c^o$. Umožňuje tedy určit koeficient k_c z hodnoty pro fyzikální absorpci k_c^o , pro kterou je obvykle možno nalézt údaje v literatuře.

Koncentrace c_{kw} se vypočte z koncentrace v plynné fázi na fázovém rozhraní pomocí vyjádření rovnovážného poměru (19.2-14) nebo (21.2-6) upraveného na výpočet molarity. Hodnotu aktivitního koeficientu obsaženého ve vyjádření rovnovážného poměru ovlivňuje přítomnost reagentu v roztoku. Plocha fázového rozhraní A_w je součin hustoty této plochy a_w a objemu absorbéru V .

Zdrojový člen se vyjádří z rovnice (28.4-4) pro dokonale míchanou kapalinu ve tvaru

$$\frac{dn_{kr}}{d\tau} = v_k r V_l = v_k r \epsilon_l V \quad (23.4-3)$$

kde v_k je stechiometrický koeficient (má pro reaktant zápornou hodnotu) a kde zádrž kapaliny ϵ_l je poměr objemu kapaliny V_l k aktivnímu objemu absorbéru V podle rovn.(8-28).

Po dosazení plyne z rovn.(23.4-1b), při $\dot{V}_l = \text{konst}$, bilanční vztah

$$\dot{V}_l c_{ki} + Ek_c^o a_w V (c_{kw} - c_{ke}) + v_k \epsilon_l V r = \dot{V}_l c_{ke} \quad (23.4-4)$$

Objem absorbéru je pak

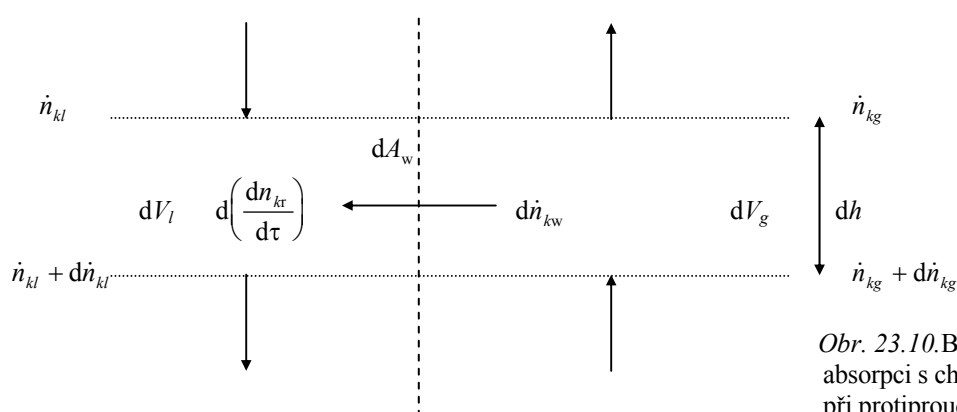
$$V = \frac{\dot{V}_l (c_{ke} - c_{ki})}{Ek_c^o a_w (c_{kw} - c_{ke}) + v_k r \epsilon_l} \quad (23.4-5)$$

Rychlost chemické reakce je funkcí koncentrace c_{ke} . Zadání c_{ke} umožní spočítat aktivní objem absorbéru. Naopak pro známý objem se dá určit výstupní koncentrace složky k .

23.4.2 Absorpce v průtočném reaktoru s výplní

Obr.23.10. se týká chemisorpce ve věži s výplní při protiproudu. Je na něm znázorněn diferenciální element objemu absorbéru vymezený dvěma průřezy kolmými na směr proudění, jejichž vzdálenost je dh . Bilance látkového množství absorbované složky k , která reaguje v objemu kapaliny dV_l vymezeném dvěma průřezy a fázovým rozhraním, je rovnice

$$\dot{n}_{kl} + d\dot{n}_{kw} + d\left(\frac{dn_{kr}}{d\tau}\right) = \dot{n}_{kl} + d\dot{n}_{kl}$$



Obr. 23.10. Bilanční schéma pro absorpci s chemickou reakcí při protiproudu

neboli

$$-d\dot{n}_{kl} + d\dot{n}_{kw} + d\left(\frac{dn_{kr}}{d\tau}\right) = 0 \quad (23.4-11)$$

Bilance složky k pro plyn v objemu dV_g je

$$\dot{n}_{kg} + d\dot{n}_{kg} = \dot{n}_{kg} + d\dot{n}_{kw}$$

neboli

$$0 = -d\dot{n}_{kg} + d\dot{n}_{kw} \quad (23.4-12)$$

Bilanci je třeba vyjádřit v koncentracích. Předpokládá se pístový profil koncentrace, tj. změna pouze ve směru proudění (viz kap.4). Platí pro $\dot{V}_l = \text{konst}$

$$d\dot{n}_{kl} = d(\dot{V}_l c_k) = \dot{V}_l dc_k \quad (23.4-13)$$

V obdobě k rovn.(23.4-2) bude tok látkového množství složky k fázovým rozhraním

$$d\dot{n}_{kw} = k_c (c_{kw} - c_k) dA_w = Ek_c^o a_w (c_{kw} - c_k) S dh \quad (23.4-14)$$

Diferenciální aktivní objem absorbéru byl rozepsán na součin jeho průřezu a diferenciální výšky. Člen pro přeměnu složky k rychlostí reakce r se vyjádří podle rovnice (28.4-4)

$$d\left(\frac{dn_{kr}}{d\tau}\right) = v_k r dV_l = v_k r \varepsilon_l dV = v_k r \varepsilon_l S dh \quad (23.4-15)$$

Kombinací rovnic (23.4-11), (23.4-14) až (23.4-15) se obdrží bilance složky k v kapalině vyjádřená koncentracemi, kdy při konstantním toku kapaliny

$$-\dot{V}_l dc_k + Ek_c^o a_w (c_{kw} - c_k) S dh + v_k \varepsilon_l r S dh = 0 \quad (23.4-16)$$

Je-li průřez absorbéru konstantní, dá se vyjádřit výška absorbéru

$$h = \frac{\dot{V}_l}{S} \int_{c_{ki}}^{c_{ke}} \frac{dc_k}{Ek_c^o a_w (c_{kw} - c_k) + \varepsilon_l v_k r} \quad (23.4-17)$$

Za rychlost reakce se dosadí její zápis v koncentracích podle kinetiky reakce.

Bilance složky k v plynné fázi je podle rovn. (23.4-12)

$$p^{-1} d(\dot{n}_g p_k) = k_p^o a_w (p_k - p_{kw}) S dh \quad (23.4-18)$$

Rovnovážný vztah na fázovém rozhraní popisuje rovn. (23.1-2a).

V tomto oddílu byl diskutován vliv chemické reakce na absorpci plynu v kapalině. Bylo ukázáno její uplatnění na absorbér s míchadlem při souproudu a pro absorbér s výplní při protiproudu fází.

23.5 Axiální míchání (disperze)

Popis výměníku hmoty se spojitým kontaktem fází při protiproudu byl založen na předpokladu, že koncentrace složek v každé fázi je podél daného průřezu konstantní, že se mění pouze ve směru proudění fáze. Jinými slovy, předpokládal se pístový profil koncentrací. Ten vychází z modelu pístového profilu rychlosti tekutiny definované jako objemový tok dělený průřezem tekutiny. Výsledky měření na průmyslových absorbérech však svědčí o tom, že mohou existovat významné odchylky od tohoto modelu.

Je-li hodnota poměru toku kapaliny a plynu v aparátu s protiproudem fází velká, může kapalina unášet část plynné směsi proti výslednému směru jejího proudění. Tato část se tedy vrací a mísí s plynnou směsí v nižší části věže. Tento jev se nazývá *podélné míchání* či *axiální disperze*. Koncentrace absorbované složky v plynu vystupujícím z absorbéru je pak větší než v absorbéru s pístovým prouděním.

K obdobnému jevu může dojít též v kapalině. Při velmi malém poměru toků kapaliny a plynu je tok plynu velký a odtrhuje z hladiny kapky kapaliny, které unáší do vyšších částí věže. Tentokrát nastává *axiální míchání* v kapalině a koncentrace absorbované složky v kapalině vytékající z absorbéru je menší než při pístovém profilu rychlosti. V obou případech se absorbuje méně složky než při pístovém proudění. Z materiálové bilance plyne, že ve fázi, která má malý průtok, bude změna koncentrace složky velká. Kvantitativně se *axiální disperze* popisuje v příloze B4.2 a B5.4 a konkrétní problém se řeší v příkladu P15-8 v *Příkladech*.

Tab.23.1 Přehled základních rovnic v absorpci

BILANCE	ROVNOVÁHA, KINETIKA A J.
$\dot{n}_{gi} + \dot{n}_{li} = \dot{n}_{ge} + \dot{n}_{le} \quad (23.1-4)$ $\dot{n}_{gi}y_{ki} + \dot{n}_{li}x_{ki} = \dot{n}_{ge}y_{ke} + \dot{n}_{le}x_{ke} \quad (23.1-3)$ $\dot{n}_{gi}h_{gi} + \dot{n}_{li}h_{li} = \dot{n}_{ge}h_{ge} + \dot{n}_{le}h_{le} + \dot{Q} \quad (23.1-5)$ $d\dot{n}_{kw} = -d(\dot{n}_l x_k) = -d(\dot{n}_g y_k) \quad (23.1-6)$	Rovnovážný vztah $y_k = \psi_k x_k \quad (23.1-1)$ Absorpce plynu $\psi_k = \frac{\gamma_k^\infty H_k}{\phi_{kg} p} \quad (19.2-14)$ Absorpce páry $\psi_k = \frac{\gamma_k \phi_{kV}^o p_k^o F}{\phi_{kV} p} \quad (21.2-6)$ Rovnice kinetiky absorpce: Přestup hmoty $\phi_{kw} a_w = \pm k_z a_w (z_k - z_{kw}) \quad (22.4-6a)$ $V = \int_0^{\dot{n}_{kw}} \frac{d\dot{n}_{kw}}{\phi_{kw} a_w} \quad (19.3-12)$ $h = \frac{V}{S} = \frac{1}{S} \int_{\dot{n}_w}^{\dot{n}_{Aw}} \frac{d\dot{n}_{Aw}}{\phi_{Aw} a_{Aw}} \quad (23.2-3)$
Malé koncentrace absorbentu A $\dot{n}_{gi} = \dot{n}_{ge} = \dot{n}_g \quad ; \quad \dot{n}_{li} = \dot{n}_{le} = \dot{n}_l$ $\frac{y_{Ai} - y_{Ae}}{x_{Ae} - x_{Ai}} = \frac{\dot{n}_l}{\dot{n}_g} \quad (23.2-2)$ $d\dot{n}_{Aw} = -\dot{n}_l dx_A = -\dot{n}_g dy_A \quad (23.1-7)$ $y_A = \frac{\dot{n}_l}{\dot{n}_g} (x_A - x_{Ae}) + y_{Ai} \quad (23.2-10)$ $y_A = \frac{\dot{n}_l}{\dot{n}_g} (x_A - x_{Ai}) + y_{Ae} \quad (23.2-11)$	$y_{Aw} = \psi_{Aw} x_{Aw} \quad (23.2-12)$ $\phi_{Aw} a_w = k_y a_w (y_A - y_{Aw}) = k_x a_w (x_{Aw} - x_A) \quad (23.2-4)$ $h = \int_{x_{Ai}}^{x_{Ae}} \frac{\dot{n}_l dx_A}{k_x a_w S (x_{Aw} - x_A)} = \int_{y_{Ae}}^{y_{Ai}} \frac{\dot{n}_g dy_A}{k_y a_w S (y_A - y_{Aw})} \quad (23.2-5)$ $h_x \equiv \frac{\dot{n}_l}{k_x a_w S}, \quad h_y \equiv \frac{\dot{n}_g}{k_y a_w S} \quad (23.2-6)$ $n_x \equiv h / h_x \quad ; \quad n_y \equiv h / h_y$ $\frac{y_A - y_{Aw}}{x_A - x_{Aw}} = -\frac{k_x}{k_y}$ Prostup hmoty, $\psi_A = \text{konst}$ $\phi_{Aw} \equiv K_x (x_A^* - x_A) = K_y (y_A - y_A^*) \quad (23.2-13)$ $K_x^{-1} = k_x^{-1} + (\psi_k k_y)^{-1} \quad , \quad K_x = \psi_k K_y \quad (22.5-4)$ $x_A^* = y_A / \psi_A \quad , \quad y_A^* = \psi_A x_A \quad (23.2-15)$ $H_x \equiv \frac{\dot{n}_l}{K_x a_w S} \quad , \quad H_y \equiv \frac{\dot{n}_g}{K_y a_w S} \quad (23.2-16)$ $h = H_x \int_{x_{Ai}}^{x_{Ae}} \frac{dx_A}{x_A^* - x_A} = H_y \int_{y_{Ae}}^{y_{Ai}} \frac{dy_A}{y_A - y_A^*} \quad (23.2-18a)$ $\equiv H_x N_x = H_y N_y$

BILANCE	ROVNOVÁHA, KINETIKA A J.
Velké koncentrace absorbentu A, $n_{Bf} = 0$, $n_{Cg} = 0$	Rovnovážný vztah
$\dot{n}_{gi} + \dot{n}_{fi} = \dot{n}_{ge} + \dot{n}_{le}$ (23.1-4)	$y_{Aw} = \psi_{Aw} x_{Aw}$ (23.2-12)
$\dot{n}_{gi} y_{ki} + \dot{n}_{fi} x_{ki} = \dot{n}_{ge} y_{ke} + \dot{n}_{le} x_{ke}$ (23.1-3)	Rovnice kinetiky absorpce
$\dot{n}_{gi} h_{gi} + \dot{n}_{fi} h_{fi} = \dot{n}_{ge} h_{ge} + \dot{n}_{le} h_{le} + \dot{Q}$ (23.1-5)	$h = \int_{x_{Ai}}^{x_{Ac}} \frac{d(\dot{n}_l x_A)}{k_x a_w S(x_{Aw} - x_A)} = \int_{y_{Ac}}^{y_{Ai}} \frac{d(\dot{n}_g y_A)}{k_y a_w S(y_A - y_{Aw})}$ (23.2-5a)
$\dot{n}_C (X_{Ae} - X_{Ai}) = \dot{n}_B (X_{Ai} - X_{Ae})$ (23.3-6)	$\frac{1 - y_{Aw}}{1 - y_A} = \left(\frac{1 - x_{Aw}}{1 - x_A} \right)^{-k_x^0 / k_y^0}$ (23.3-18)
$Y_A = \frac{\dot{n}_C}{\dot{n}_B} (X_A - X_{Ae}) + Y_{Ai} = \frac{\dot{n}_C}{\dot{n}_B} (X_A - X_{Ai}) + Y_{Ae}$ (23.3-20)	Rovnovážný vztah
$\dot{n}_B (I_{gi} - I_{ge}) = \dot{n}_C (I_{le} - I_{fi}) + \dot{Q}_e$ (23.3-13)	$Y_A = \varphi_A X_A$
	$= \frac{\psi_A}{1 - (\psi_A - 1) X_A} X_A = [\psi_A + (\psi_A - 1) Y_A] X_A$ (23.3-5)
	Rovnice kinetiky absorpce
	$h = \frac{\dot{n}_C}{k_x^0 a_w S} \int_{x_{Ai}}^{x_{Ac}} \frac{dX_A}{\ln \frac{1 + X_{Aw}}{1 + X_A}} = \frac{\dot{n}_B}{k_y^0 a_w S} \int_{y_{Ac}}^{y_{Ai}} \frac{dY_A}{\ln \frac{1 + Y_A}{1 + Y_{Aw}}}$ (23.3-17a)
	$\frac{1 + Y_A}{1 + Y_{Aw}} = \left(\frac{1 + X_{Aw}}{1 + X_A} \right)^{k_x^0 / k_y^0}$ (23.3-19)

Vedle axiálního míchání však existuje i příčné promíchávání (radiální disperze), kterým se rychlost a tedy i koncentrace vyrovnává podél průtočného průřezu. Radiální disperze tedy narušuje nepříznivý vliv disperze axiální.

V této kapitole byla vyložena ustálená absorpce při spojitém kontaktu dvousložkových fází. Vychází se z popisu fázové rovnováhy, z materiálové a entalpické bilance a z rovnice přestupu či prostupu hmoty. Je vyloženo postup výpočtu buď při malých nebo při velkých koncentracích absorbované složky. Probírá se absorpce s chemickou reakcí a vliv axiální disperze na činnost absorbéru.

KONTROLNÍ ÚLOHY

- 23.1. Jaké znáte způsoby dělení plyných směsí a kdy je výhodná absorpce?
- 23.2. Na čem je založeno dělení směsí absorpcí?
- 23.4. Proč se popisuje rychlost absorpce rovnicí prostupu hmoty? Bylo by možné určit výšku absorbéru pouze ze znalosti hodnoty koeficientu přestupu hmoty v jedné fázi?
- 23.5. Je hustota mezifázového povrchu v absorbéru s výplní totožná s hustotou povrchu částic výplně udávanou výrobcem? Zdůvodněte svou odpověď.
- 23.6. Je možné založit koeficient přestupu či prostupu hmoty na parciálním tlaku složky plyné směsi?
- 23.8. Odvoďte vztah mezi výškou převodové jednotky prostupu hmoty a výškami převodové jednotky přestupu hmoty.
- 23.11. Jaká je podmínka pro minimální hodnotu toku rozpouštědla absorbérem při protiproudě plynu a kapaliny?

- 23.14.** Co víte o rozložení teplot v absorbéru?
- 23.15.** Jaké jsou přednosti a nedostatky absorpce s chemickou reakcí ve srovnání s fyzikální absorpcí?
- 23.16.** Napište vzorec pro účinek a počet převodových jednotek absorbéru při souproudu. Využijte k tomu obdobné rovnice pro výměník tepla v kap. 17.
- 23.17.** Načrtněte do distribučního diagramu rovnovážnou čáru a pracovní úsečky pro absorpci a desorpci málo rozpustného plynu při protiproudu.
- 23.18.** Proveďte totéž pro absorpci s axiální disperzí.
- 23.19.** Odvoďte postup výpočtu minimální hodnoty toku kapaliny při izotermní absorpci plynu, jehož rozpustnost vyhovuje Henryovu zákonu a koncentrace je vyjádřena relativními zlomky. Odvoďte totéž pro desorpci rozpuštěné složky z kapaliny.
- 23.20.** Odvoďte vzorec pro počet převodových jednotek prostupu hmoty při izotermní absorpci plynu, jehož rozpustnost vyhovuje Henryovu zákonu a koncentrace je vyjádřena relativními zlomky.
- 23.21.** Jaké znáte typy absorbérů?
- 23.22.** Jak by bylo možné zvětšit výkonnost absorbéru?
- 23.23.** Odvoďte vztah mezi koeficienty přestupu hmoty založenými na hybné síle vyjádřené jednak molárními zlomky, jednak molárními koncentracemi.
- 23.24.** Má koeficient prostupu hmoty stejnou hodnotu při desorpci jako při absorpci?
- 23.25.** Jak závisí koeficient přestupu hmoty při absorpci na hodnotě difuzního koeficientu?
- 23.26.** Závisí hodnota počtu převodových jednotek, účinku a faktoru výměny hmoty na vyjádření koncentrace transportované složky?
- 23.27.** Jaký je vztah mezi rovnovážným poměrem ψ_A pro obyčejné a φ_A pro relativní zlomky?
- 23.28.** Napište soubor rovnic popisujících rovnovážný absorpční stupeň n při protiproudu (za ustáleného stavu, bez chemické reakce a bez bočních proudů), obdobný rovnicím v příloze B2.3, a rovnice pro celý absorbér.
- 23.29.** Napište soubor rovnic popisujících stupňový absorbér při protiproudu pomocí relativních molárních zlomků a relativních molárních entalpií.