

29 Základní typy výměníků hmoty

Hlavní cíle kapitoly: Ukázat schéma konstrukce a vyložit principy činnosti některých častěji používaných výměníků hmoty.

Požadované znalosti: Popis proudění clonou, proudění vrstvou zrnitého materiálu, principy popisu výměny hmoty.

Obsahem této kapitoly jsou základní informace o konkrétních typech výměníků hmoty, jejich konstrukci, činnosti a volbě pro danou úlohu. Jedná se především o věže (kolony) patrové či s výplní. Jsou uvedeny publikované přednosti a nedostatky aparátů a jejich vhodnost pro daný účel. Kapitola neobsahuje údaje o měření a regulaci a má informativní charakter. Podrobnější pojednání obsahuje firemní a odborná literatura (viz např. lit. [8] a [71]).

29.1 Úvod

Účelem výměníku hmoty je transport hmoty mezi navzájem se dotýkajícími fázemi. Je tím účinnější, čím více hmoty přejde z jedné fáze do druhé v jednotkovém čase a objemu aparátu. Záleží na velikosti mezifázové plochy, na hybné síle a na odporu proti transportu hmoty. S konstrukcí aparátu souvisí velikost plochy vzájemného kontaktu fází a odpor proti transportu hmoty, který závisí na rychlosti proudění fází a na jejich fyzikálně chemických vlastnostech.

Pro směsi obsahující kapalnou a plynnou fázi (v souvislosti s výkladem v této kapitole není třeba rozlišovat plyn od páry, proto text týkající se plynu automaticky platí i pro páru) se velká mezifázová plocha vytváří

1. rozptýlením plynné fáze v kapalně:

- a) bubliny,
- b) pěna,

2. rozptýlením kapalně fáze v plynně:

- a) kapky,
- b) tenká vrstva (film).

Nejčastěji používaný aparát, v němž se v kapalině rozptyluje plyn, je patrová věž. Používají se však i věže bez pater naplněné kapalinou, kterou probublává plyn [např. bioreaktory (fermentory)]. Nejběžnější aparát, v němž se v plynu rozptyluje kapalina, je věž s výplní, ve které po povrchu výplně stéká kapalný film. Ve sprchových věžích je kapalná fáze v plynné rozptylována v kapkách. Obecně vzato v každém z těchto výměníků hmoty existují všechny čtyři způsoby rozptýlení fází. Ten, který je uveden při popisu činnosti výměníku, však výrazně převládá.

29.2 Patrová věž

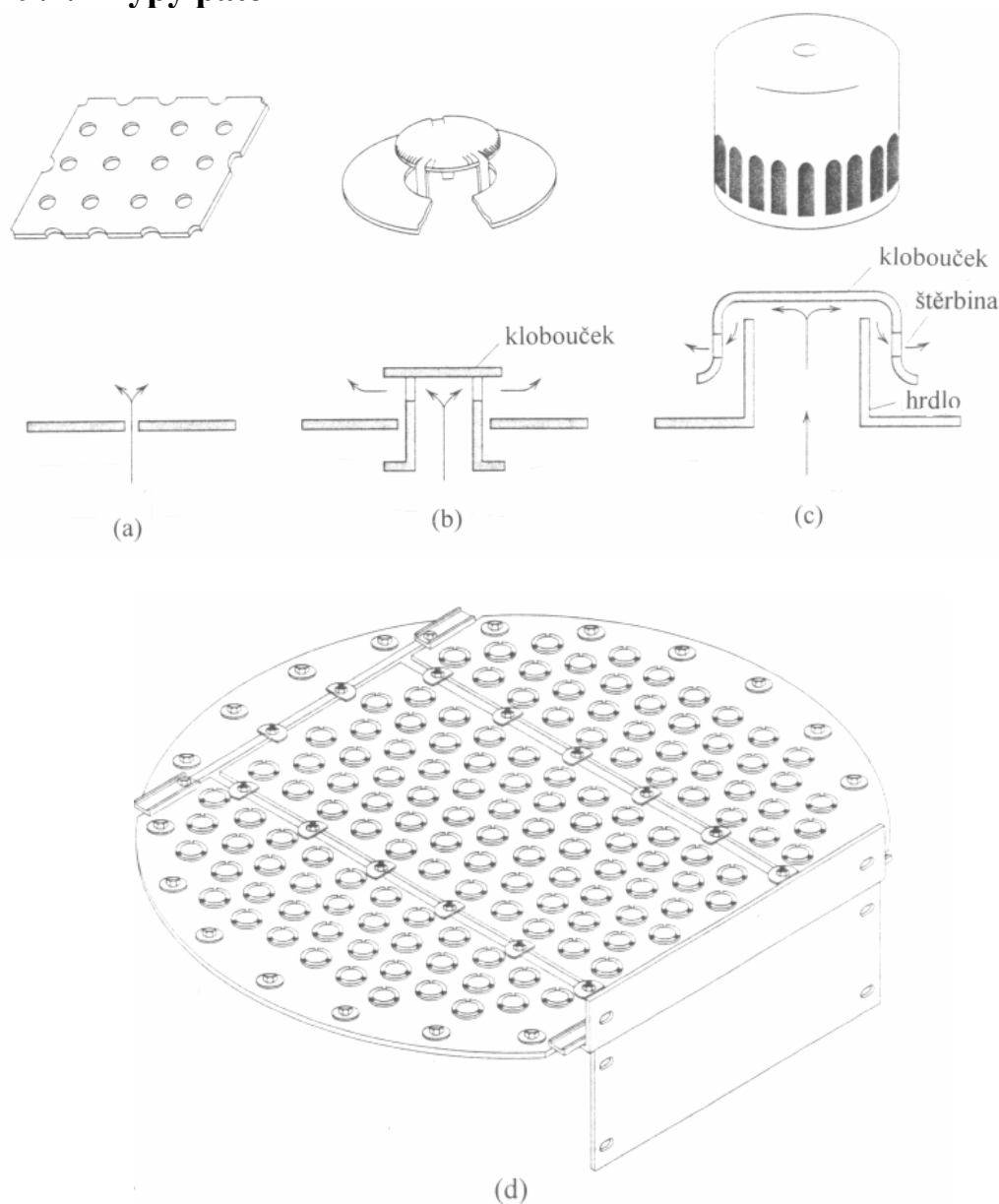
V tomto oddílu se probírá konstrukce a uplatnění patrové věže, typy pater, vliv hodnoty toku fází a konstrukce pater na pokles tlaku při průchodu patrem a na účinnost patra a mezní podmínky činnosti pater.

Patrová věž je kompaktní uspořádání soustavy stupňů v jediném aparátu, ve kterém se vyměňuje hmota mezi dvěma tekutými fázemi při protiproudu (viz obr.29.2). Používá se především k rektifikaci a absorpci. Je to svislá, obvykle válcová konstrukce obsahující uvnitř

vodorovné přepážky - patra. Na patře se stýká kapalná fáze přitékající z horního patra s plynnou fází přicházející ze spodního patra. Po určité době kontaktu, která závisí na konstrukci patra a na hodnotách toku fází, se fáze od sebe oddělí a pokračují ve svém pohybu, a to fáze s menší hustotou směrem vzhůru a fáze s větší hustotou směrem dolů.

Patro má za účel umožnit vzájemný kontakt obou fází a poté jejich vzájemné oddělení (působením síly tíže na fáze s odlišnou hustotou). Konstrukce patra ovlivňuje hydrodynamické podmínky na patře a na nich závisí jednak velikost mezifázové plochy, jednak odpor proti transportu hmoty mezi fázemi.

29.2.1 Typy pater



Obr. 29.1 Některé typy pater

- a) element síťového patra
- b) element ventilového patra
- c) element kloboučkového patra
- d) ventilové patro

K nejstarším typům pater patří *kloboučkové patro*. Schéma jednoho kloboučku je znázorněno na *obr. 29.1c*, ze kterého je patrná i jeho funkce. Plynná fáze ze spodního patra prochází hrdlem kloboučku, které vytváří kapalinový uzávěr, a je nucena probublávat kapalinou. Aby se dosáhlo co největší mezifázové plochy, jsou kloboučky opatřeny průřezy, kterými se plynná fáze rozptýluje na drobné bublinky. Díky kapalinovému uzávěru pracují patra i při velmi malých tocích kapaliny. Kloboučková patra pracují s největším rozsahem toků fází (tzv. prosazení), jsou však nejnákladnější. Je jich mnoho druhů a na jednom patře mohou být desítky až stovky kloboučků. Používá se jich při rektifikaci, absorpci a desorpci.

Podstatně jednodušší než kloboučkové je *sítové (děrované) patro*. Je to kruhová deska se souborem kruhových otvorů (viz *obr. 29.1a*). Používané průměry otvorů jsou od 3 do 13 mm (středy nejčastěji tvoří vrcholy rovnostranných trojúhelníků). Podobné je *štěrbínové* či *roštové (mřížové) patro* (je známé pod firemním názvem Turbogrid). Má podélné štěrby o šířce 6 až 13 mm. Plocha otvorů činí 5 až 15% aktivního průřezu patra, tj. průřezu, na němž se vyměňuje hmota.

Tyto dva typy pater mohou mít přepady, podobně jako kloboučková patra, nebo pracují bez přepadů. Pak obě fáze procházejí otvory patra současně a vrstva kapaliny na patře se udržuje neustálým proudem plynné fáze. Rozsah pracovních hodnot toků obou fází je menší než pro kloboučková patra.

Hodnota rychlosti plynné fáze je taková, že z valné části kapaliny vznikne pěna (viz *obr. 19.3*). Tato pěna je dynamická, tj. existuje pouze při proudění plynné fáze a neustále se tvoří a zároveň zaniká^{*)}. Obnovující se povrch podporuje velkou hodnotu koeficientu přestupu hmoty [viz rovn. (22.4-15), ze které plyne, že hodnota koeficientu přestupu hmoty roste s klesající dobou kontaktu mezi fázemi]. Kromě toho pěna vytváří velkou mezifázovou plochu na jednotkový objem. Proto mají tato patra poměrně velkou účinnost. Sítových pater se používá při absorpci, rektifikaci, desorpci a extrakci.

Ve větším rozmezí hodnot toků fází pracují *ventilová patra* (viz *obr. 29.1d*). Mají otvory jako sítová patra, otvory jsou však opatřeny destičkami (ventily), které se mohou pohybovat ve svislém směru. S rostoucí hodnotou toku plynné fáze se ventil zdvihá a naopak. Tím se mění průtočný průřez a rychlost plynné fáze je zhruba konstantní. Únos kapek pak zůstává v rozumných mezích i při větších tocích plynné fáze. Tato samočinná regulace též brání přílišnému úniku kapaliny při menších hodnotách toku plynné fáze a napomáhá vyrovnávání režimu na patře. Ventilová patra jsou ovšem dražší než patra sítová či roštová. Používá se jich při rektifikaci, absorpci a desorpci.

O dalších typech pater se pojednává v odborné literatuře (viz např. lit. [36]). Hojně se používá především sítových a ventilových pater [36]. Průměr pater bývá v rozmezí 0,5 až 9 m a jejich vzdálenost je 0,15 až 1 m.

29.2.2 Proudění fází patry

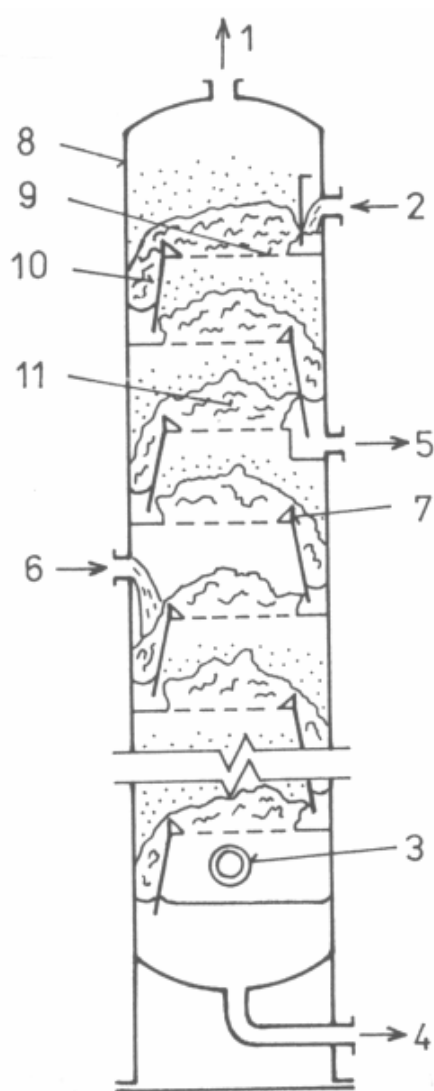
Na *obr. 29.2* je schéma věže se sítovými patry (viz též *obr. 19.3* a *obr. 20.4*). Kapalina se přivádí na nejvyšší patro přívodem 2 v místě odděleném přepážkou, která zrovnoměrňuje proudění kapaliny. Proudí napříč patrem a otvory v patře se přivádí plynná fáze, která kapalinou probublává. Přitom vzniká pěna (11), která spolu s kapalinou přetéká přes jez (7) do přepadu (10). Jez je tvořen horním koncem desky přepadu. Její dolní konec zasahuje pod hladinu kapaliny na dolním patře. Přepad je navržen tak, aby doba prodlení pěny, která je obsažena v přepadu, stačila na oddělení plynu od kapaliny (doba koalescence). Kapalina pak přichází na

^{*)} Pěna vzniklá vlivem povrchově aktivního činidla je stabilní a s hlediska transportu hmoty málo účinná (povrch se neobnovuje). Kromě toho může stabilní pěna způsobit zahlcení věže. Je-li toto nebezpečí, potlačuje se vznik pěny přidáním vhodného činidla.

nižší patro, kde se celý proces opakuje. Postupně kapalina steče na nejnižší patro a z něj do spodní části věže. Odtud odchází výstupem (4) a sifonovým uzávěrem nebo automatickým ventilem spojeným s hladinoměrem (viz obr. 29.15) se odvádí do zásobníku a pak k případnému dalšímu zpracování.

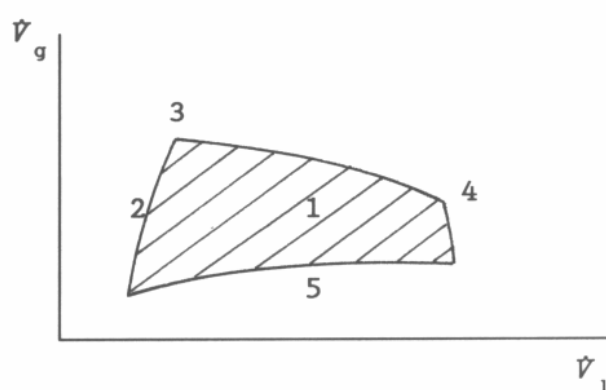
Plynná fáze vstupuje do věže přívodní trubicou (3) a přichází pod nejnižší patro. Po průchodu všemi patry se odvádí výstupním potrubím (1). V horní části věže se obvykle instaluje lapač kapek zachycující kapky stržené odcházející plynnou fází. Na obrázku je naznačena možnost odebírání (5) či přivádění (6) kapaliny (obecně jedné z fází) v některém dalším místě věže.

Patra nakreslená na obrázku pracují tak, že kapalina přetéká přes jez do přepadu. Jez udržuje na patře určitou výšku vrstvy kapaliny. Jednodušší jsou bezpřepadová patra, kde otvory v patře prochází současně plynná a opačným směrem kapalná fáze. Tato patra jsou levnější, ale režim jejich činnosti je méně stabilní než režim pater s přepadem. Vrstva kapaliny se na nich udržuje vlivem proudění plynné fáze otvory.



Obr. 29.2. Schéma věže se síťovými patry

1-odvod plynu, 2-přívod kapaliny, 3-přívod plynu, 4-odvod kapaliny, 5-boční odvod kapaliny, 6-boční přívod kapaliny, 7-jez, 8-plášť věže, 9-síťové patro, 10-přepad, 11-pěna



Obr. 29.3. Pracovní oblast síťového patra

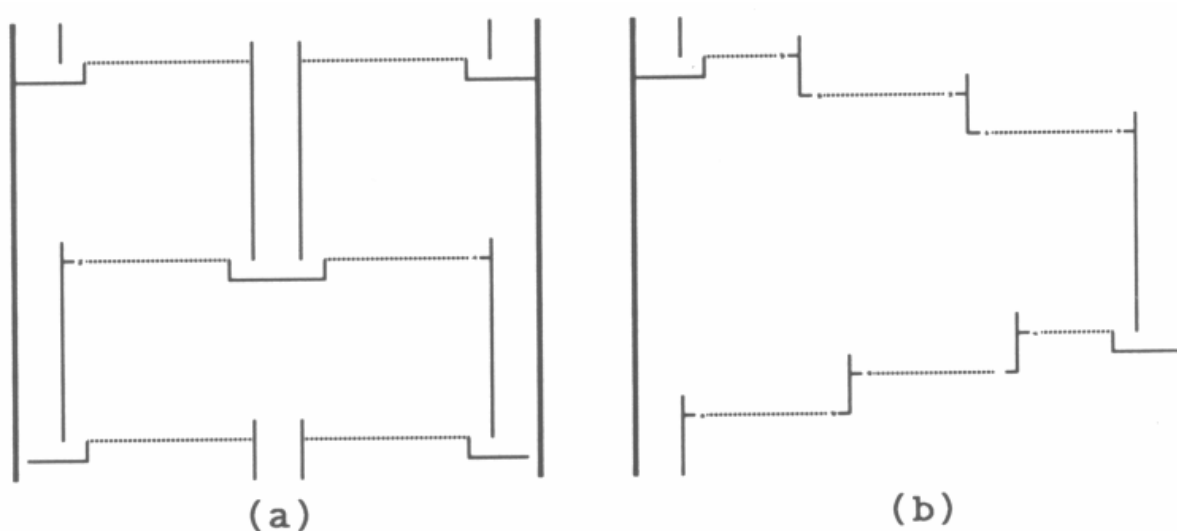
- 1-stabilní činnost
- 2-strhování kapek
- 3-zahlcení vlivem únosu kapek
- 4-zahlcení vlivem toku kapaliny
- 5-prokap

Při průchodu plynu kapalinou na patře se nad kapalinou vytváří pěna s velkou hustotou mezifázového povrchu. Při zanikání pěny vznikají drobné kapičky, které proudící plyn udržuje v prostoru nad vrstvou pěny. S rostoucí hodnotou toku plynu se výška pěny a tvorba kapek zvětšuje a část kapek se strhuje na vyšší patro. To je nežádoucí jev, neboť se narušuje protiproud toku fází, a tím účinnost aparátu (viz oddíl B4.3 v příloze).

S rostoucí hodnotou toku plynu se zvětšuje hodnota poklesu tlaku na patře a roste výška hladiny kapaliny v přepadu. Kdyby vystoupila až k úrovni jezu, přestala by odtékat kapalina z horního patra a věž by se postupně zaplnila kapalinou. Tento stav se nazývá *mez zahlcení* (viz též kap.8). Rychlost plynu při zahlcení je pro daný typ patra a daný tok kapaliny možné odhadnout z empirických vztahů (viz např. lit.[61]). Hodnota toku plynné fáze patrovou věží při zadané hodnotě toku kapaliny má tedy svou horní mez. Existuje též dolní

mez, protože příliš malá hodnota toku plynné fáze snižuje účinnost patra. Pak se zmenší pod únosnou míru jak velikost mezifázového povrchu, tak hodnoty koeficientů přestupu hmoty. Podobně existují meze hodnot toku kapaliny.

Grafické znázornění podmínek činnosti bezpřepadového síťového patra je na *obr. 29.3*. Při malých hodnotách toku plynu odtéká z patra zvýšené množství kapaliny otvory v patře. Naopak při velkých hodnotách toku plynu se strhují kapky na vyšší patro, a tím se narušuje protiproud fází. Může se dospět až k mezi zahlcení. U bezpřepadových pater je však již při menších rychlostech plynu strhování kapek neúnosné, takže se až k mezi zahlcení nedojde.



Obr. 29.4. Zkrácení dráhy kapaliny na patře

- a) patra s přidavným přepadem
- b) patra s kaskádou

Na patrech bez přepadů se ke kontaktu mezi fázemi využije větší část průřezu věže nežli na patrech s přepady, kde je aktivní plocha jen asi 70 až 80 % celkového průřezu. Přesto se však přepadových pater používá častěji, protože pracují spolehlivěji. Plyn na patře s přepady proudí kolmo ke směru proudění kapaliny (křížové proudění). Hladina kapaliny klesá ve směru k jezu a pokud je průměr patra velký, je značný i pokles hladiny. Výšce hladiny je úměrný odpor proti průchodu plynné fáze, která pak prochází přednostně oblastí s menší výškou hladiny kapaliny. Oblast u přívodu kapaliny je tedy málo účinná. Tomu se brání zkrácením dráhy kapaliny. Na patrech velkých průměrů se proto konstruují další přepady uvnitř patra. Příklad takovýchto úprav je na *obr. 29.4*.

Pokles tlaku (tlaková ztráta) plynu při průchodu patrem závisí na konstrukci patra, na vlastnostech a na tocích fází a jeho hodnota se pohybuje zhruba v mezích 0,5 až 1 kPa. S hlediska výpočtu se dělí na dvě části (viz např. lit. [36], [54], [31], [26]). Jedna se týká průchodu suchým patrem a druhá souvisí s přítomností kapaliny na patře. Pokles tlaku plynu při průchodu suchým patrem se popisuje rovnicí clony (viz kap.5). Druhá část poklesu tlaku závisí na vypočtené výšce vrstvy čiré kapaliny na patře a na empirickém aeračním faktoru souvisejícím s existencí pěny na patře. Ten bývá udáván graficky v závislosti na tzv. *intenzitním faktoru* F pro plyn

$$F_g \equiv v_g \sqrt{\rho_g} \quad (29.2-1)$$

kde v_g je rychlost plynu zprůměrněná vzhledem k průřezu, jímž prochází plynná fáze nad kapalinou, a ρ_g je hustota plynu při podmínkách na patře (viz např. lit. [54], [36], [26]). Vlivem poklesu tlaku je v přepadech hladina kapaliny vyšší než na patře.

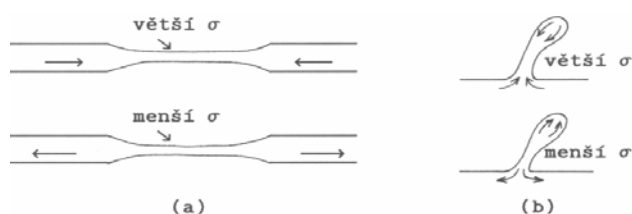
Jestliže stoupá hodnota toku plynu, může nastat tzv. *inverze fází*, tj. vzájemná záměna spojitě a rozptýlené fáze. Při tzv. *pěnovém režimu* je převážná část prostoru na patře vyplněna pěnou, plyn je rozptýlen v kapalině. Po inverzi fází vznikne z pěny oblak kapek rozptýlených v plynné fázi, patro pracuje v tzv. *kapkovém režimu*. Zejména v kapkovém režimu je nebezpečí zvýšeného únosu kapek na horní patro (podmínky pro tento jev existují při absorpci za malých tlaků a při vakuové rektifikaci)*). Kvantitativně se podíl kapaliny strhované na horní patro vyjadřuje veličinou

$$\varphi \equiv \frac{\dot{n}_{lu}}{\dot{n}_l + \dot{n}_{lu}} \quad (29.2-2)$$

kde $\dot{n}_{lu}$ je tok kapaliny unášené plynem na horní patro. Uvádí se grafická závislost veličiny φ na podílu F_l / F_g (viz obr. B6.4), kde je F_l intenzitní faktor pro kapalinu definovaný analogicky k rovn. (29.2-1).

Při průchodu složky fázovým rozhraním nastává obecně změna povrchového napětí. Při rektifikaci je pěna na patře stabilnější, když má těkavější složka menší povrchové napětí než méně těkavá složka. Takový systém se nazývá *pozitivní*. Jev se vysvětluje tím, že v místě ztenčení kapalného filmu v pění se kapalina obohatí méně těkavou složkou (je větší mezifázový povrch na jednotkový objem, tudíž z kapaliny unikne větší podíl těkavější složky). Pak má film v místě ztenčení větší hodnotu povrchového napětí, které přitáhne kapalinu z okolí a tloušťka filmu se vyrovná (viz horní část obr. 29.5a). Je-li naopak hodnota povrchového napětí těkavější složky větší než hodnota pro méně těkavou složku, zmenší se hodnota povrchového napětí v místě ztenčení filmu, který se vlivem toho roztrhne. Takové systémy se nazývají *negativní* a jsou nestabilní.

Obdobná situace se vyskytuje při absorpci, kde záleží na tom, jak absorbovaný plyn ovlivňuje povrchové napětí kapaliny. Např. absorpcí organických látek ve vodných roztocích se povrchové napětí zmenšuje, jedná se tedy o negativní systémy. Jevy související se změnou povrchového napětí vlivem změny koncentrace se nazývají *Marangoniův efekt*.



Obr. 29.5. Vliv změny povrchového napětí na
a) stabilitu filmu
b) tvorbu kapek

Vlivem větší stability pěny je mezifázový povrch větší než při probublávání plynné fáze vrstvou kapaliny. Naproti tomu však se pěna obnovuje pomaleji, a tím se zmenšuje rychlost procesu. Kromě toho větší výška vrstvy pěny omezuje výkonnost aparátu, neboť je větší nebezpečí zahlcení patra. Pozitivní systémy jsou proto citlivé na únos a mez zahlcení.

Povrchové napětí též ovlivňuje tvorbu kapek. Kapka opouští hlavní část kapaliny poté, co se vytvořil podlouhlý útvar znázorněný na obr.29.5b. Zúžená oblast se chová podobně jako ztenčený film a odtržení kapky se podporuje zmenšením povrchového napětí v místě zúžení, ke kterému dochází v negativních systémech. Pokud má patro pracovat v kapkovém režimu, jsou tyto systémy výhodnější.

*) Oblak kapek existuje i nad vrstvou pěny v pěnovém režimu, ovšem v menší míře.

29.2.3 Účinnost pater

Účinnost patra závisí

- a) na složení a vlastnostech fází,
- b) na hodnotách toků fází,
- c) na konstrukci a rozměrech patra.

Celková účinnost je poměr počtu rovnovážných a skutečných pater splňujících dané dělení [viz rovn. (19.2-30)] a naměřené hodnoty se vyjadřují empirickým vzorcem nebo graficky. Údaje platí pro určitý typ patra a pro určitou soustavu látek. Z naměřených hodnot účinnosti absorbérů s kloboučkovými patry pro systémy obsahující uhlovodíky v závislosti na výrazu obsahujícím rozpustnost plynné fáze a kinematickou viskozitu kapaliny byla regresí získána rovnice (upravený vztah z lit.[30]):

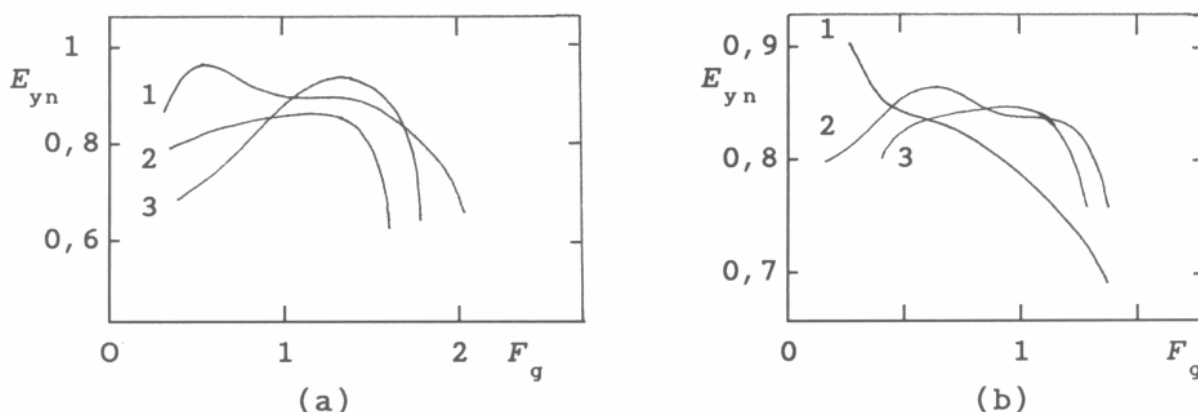
$$E_c = 0,268 + 7,12 \cdot 10^{-2} \ln(\psi_k M_l \nu_l) + 4,68 \cdot 10^{-3} [\ln(\psi_k M_l \nu_l)]^2 \quad (29.2-3)$$

kde ψ_k je rovnovážný poměr absorbující se složky (obvykle $\psi_k = H_k / p$, kde H_k je Henryův koeficient složky k a střední tlak v absorbérů je p), M_l je molární hmotnost a ν_l kinematická viskozita kapaliny. Vlastnosti se dosazují při střední teplotě a tlaku v absorbérů.

Obdobný soubor dat existuje pro rektifikační věž a jejich zpracováním byl získán vztah (upravený z lit.[30]):

$$E_c = -0,35 - 0,128 \ln(\alpha_{kl} \eta_F) \quad (29.2-4)$$

kde je α_{kl} relativní těkavost klíčových složek k a l (viz odd.21.3.1), η_F je dynamická viskozita kapalného nástřiku a vlastnosti se dosazují při střední teplotě a tlaku ve věži.



Obr. 29.6. Závislost Murphreeovy účinnosti patra na intenzitním faktoru pro plynnou fázi binární směsi:

- a) cyklohexan - *n*-heptan
- b) ethanol - voda
- 1-ventilové patro, 2-kloboučkové patro, 3-sítové patro

Na obr. 29.6 je načrt průběhu závislosti Murphreeovy účinnosti [viz rovn. (20.2-29), (20.2-30), (21.3-36) a (21.3-37)] na intenzitním faktoru F_g pro tři typy pater a dvě dvousložkové směsi kapaliny a páry. Průběh čar naznačuje, jaké problémy je třeba překonat při hledání modelu umožňujícího teoretický výpočet hodnoty účinnosti patra. Jsou známy hodnoty účinnosti pater pro rozličné binární směsi. Ve směsích s více než dvěma složkami však tyto údaje obecně neplatí. Obvykle mají méně těkavé složky menší hodnoty účinnosti. Když jde o přibližně ideální směsi nebo je-li odpor proti transportu hmoty převážně v kapalině, jsou hodnoty účinnosti

zhruba stejné, nezávisle na počtu složek. Při rektifikaci však běžně převládá odpor v parní fázi a pak hodnoty účinností mohou být od binárních tak odlišné, že je třeba určit je pokusně.

V definici Murphreeovy účinnosti se vyskytují koncentrace složky na vstupu a na výstupu z patra. Z obrázku patra s přepady (např. *obr. 29.2*) je zřejmé, že složení obou fází na patře není všude stejné. Kapalina odtékající z patra obsahuje při rektifikaci menší podíl těkavější složky, při absorpci větší podíl rozpustné plynné složky a při extrakci větší podíl extrahované složky než v místě přítoku z horního patra.

I kdyby fáze s menší hustotou přicházející z nižšího patra byla před vstupem na patro dokonale promíchána, bude na výstupu složení obecně záviset na místě podél dráhy kapaliny. Koncentrace rovnovážná s odtékající kapalinou pak může teoreticky existovat jen v místě odvodu kapaliny, jinde bude odpovídat místnímu složení kapaliny. Tím se dá vysvětlit fakt, že při rektifikaci mají patra s velkým průměrem někdy hodnotu Murphreeovy účinnosti větší než jedna. Účinnost pater je totiž při rektifikaci poměrně velká^{*)} (viz *obr. 29.6*) a změna koncentrace kapaliny na patře s velkým průměrem je rovněž poměrně velká. I když pára není rovnovážná, střední hodnota koncentrace těkavější složky v odcházející páře může být větší než rovnovážná hodnota v místě odtoku kapaliny^{**)}.

Proudění fází na patře je komplikované. Kapalina obsahuje bubliny plynné fáze, s níž vytváří pěnu, a ta se rozpadá na spojitou plynnou fázi a kapky kapaliny. Část plynné fáze ve formě bublin se dostává spolu s kapalinou do přepadu, který musí mít dostatečně velký průřez, aby bylo dost času na únik bublin z kapaliny. Plynná fáze odcházející z patra unáší jemné kapky na vyšší patro a tento únos nesmí přesáhnout přípustnou míru. Kapalina neproudí přímočaře od vstupu k výstupu z patra, ale zejména v oblastech u stěn věže nastává zpětné proudění. Výpočet účinnosti patra by měl všechny tyto okolnosti brát v úvahu. Vedle toho je třeba popsat vlastní difuzi, fázovou rovnováhu a kinetiku případné chemické reakce.

V tomto oddílu je podrobnější popis patrových věží jak s hlediska konstrukce, tak co se týče procesů, které v nich probíhají. Patrové věže jsou významným typem výměníků hmoty.

29.3 Věž s výplní

Oddíl obsahuje popis věže s výplní, rozličných typů výplně, včetně strukturované výplně, a rozdělovačů kapaliny. Diskutuje se vliv proudění na pokles tlaku při průchodu vrstvou a mezní podmínky proudění fází vrstvou výplně.

Věž s výplní je aparát obsahující vrstvu tvořenou elementy výplně, které jsou stejného tvaru a stejně velké a vyrábějí se průmyslově (viz též *kap.8*)^{***)}. Vrstva spočívá na roštu uvnitř věže, která má obvykle kruhový, ale někdy též čtvercový nebo obdélníkový průřez. Aparát pracuje buď s jednou, nebo se dvěma tekutými fázemi. Při zpracování jedné tekutiny (plynné fáze nebo kapaliny) se jedná o adsorbéry, měniče iontů nebo reaktory (v těch výplň reaguje s tekutinou, nebo působí jako katalyzátor). Elementy výplně pak jsou obvykle tablety nebo kuličky. Proudění vrstvou takovýchto elementů výplně bylo popsáno v *kap.8*.

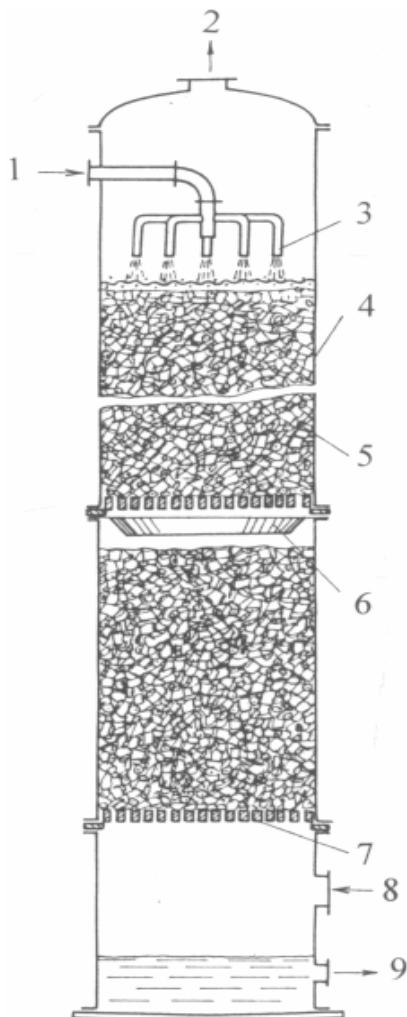
Zde se budeme zabývat aparátem se dvěma tekutinami (kapalina-plyn, kapalina-pára a kapalina-kapalina). Příklad takového výměníku hmoty je na *obr. 29.7* (viz též *obr. 29.9*). Je to absorpční věž s výplní. Plyn se přivádí (8) pod spodní rošt a po průchodu vrstvou vystupuje z horní části absorberu do odvodního potrubí (2). Před výstupem z věže prochází obvykle

^{*)} Při absorpci málo rozpustných plynů a při extrakci je však podstatně menší.

^{**)} Tento efekt je typický pro křížové proudění (viz též *kap.17*).

^{***)} Někteří autoři rozlišují názvy náplň a výplň. Pod názvem náplň míní sypané elementy vrstvy, název výplň pak značí ukládané elementy výplně, např. mříže, které zabírají celý průřez věže. Zde používáme jediného názvu výplň.

lapačem kapek, který může být tvořen krátkou vrstvou nezkrápné výplně nebo žaluziovým odlučovačem (na obrázku není nakreslen). Kapalina se přivádí (1) do horní části výplně a rovnoměrně se rozděluje (3) po jejím průřezu. Po průchodu výplní se odvádí (9) z dolní části věže, v níž se udržuje výška hladina kapaliny automatickým ventilem spojeným s hladinoměrem (viz obr. 29.15), nebo sifonovým uzávěrem, do zásobníku.



Obr. 29.7. Absorbér s výplní

1-přívod kapaliny, 2-odvod plynu, 3-rozdělovač kapaliny, 4-plášť věže, 5-sypaná výplň, 6-přerozdělovač kapaliny, 7-rošt, 8-přívod plynu, 9-odvod kapaliny

29.3.1 Typy výplní

Účelem výplně je dosáhnout co největšího mezifázového povrchu a turbulence v obou fázích, přičemž pokles tlaku plynné fáze připadající na jednotkovou výšku vrstvy má být co nejmenší. Proto mají elementy výplně složitější tvar ve srovnání s výplní aparátů s jednou tekutou fází. Výrobci výplní nabízejí mnoho typů elementů výplně, z nichž některé jsou na obr. 29.8. Nejjednodušší jsou trubičky, které mají výšku rovnou vnějšímu průměru (1). Nazývají se *Raschigovy kroužky* a vyrábějí se již od r. 1914. Novější a velmi rozšířené jsou *kroužky Pall* (2), které jsou zdokonalením Raschigových kroužků, neboť vytvářejí větší mezifázový povrch a mají menší pokles tlaku než Raschigovy kroužky. Jejich cena je však vyšší. Názvy ostatních nakreslených typů jsou v legendě k obr. 29.8.

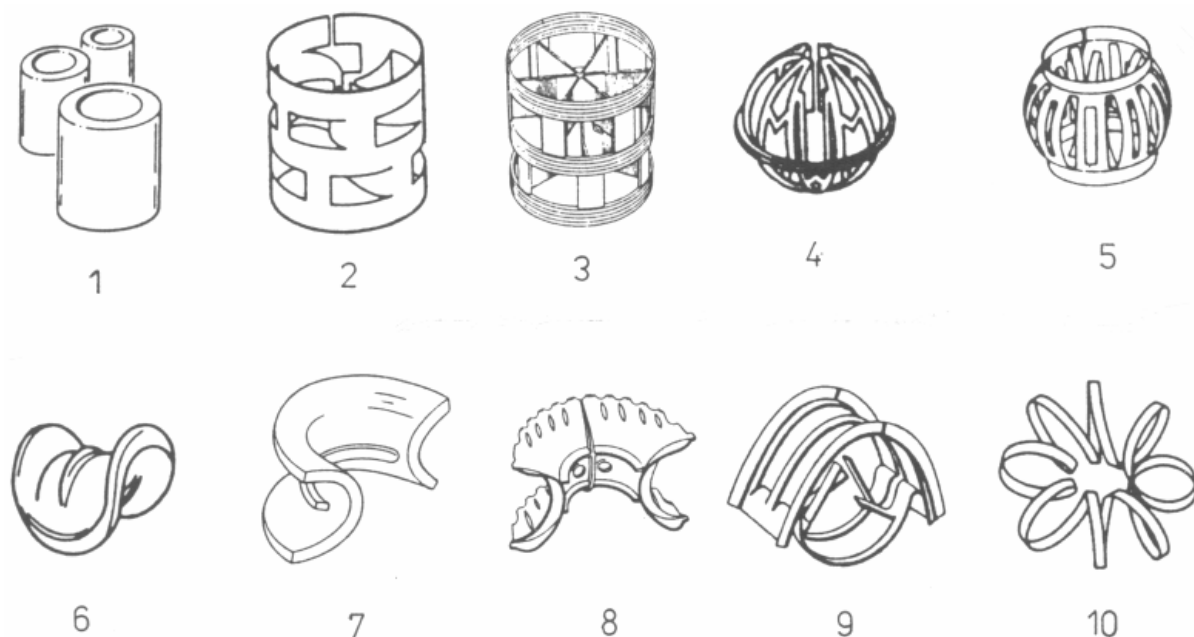
Výrobci charakterizují určitý typ výplně rozměry elementů, jejich počtem v jednotkovém objemu vrstvy, hmotností jednotkového objemu vrstvy (sypaná hustota), hustotou povrchu vrstvy a mezerovitostí vrstvy. Tabulky charakteristik výplně jsou v *Příkladech*. Výplně jsou kovové, z plastů a keramické.

Kovové výplně se používají nejčastěji. Jsou pevné a tloušťka plechu může být malá. Proto jejich mezerovitost je větší než u ostatních materiálů. Jejich smáčivost je dobrá. Používají se pro nekorodující látky a tehdy, když teploty přesahují zhruba 100 °C. Ve srovnání s keramickou a plastovou výplní dovolují větší hodnoty toku fází, jsou nerozbitné, pracují dobře v širokém rozsahu hodnot toku fází a jsou poměrně levné. Při rektifikaci za velmi malých tlaků se používá téměř výhradně kovových výplní.

V současné době existují četné nové tvary elementů výplně zhotovené z poměrně tenkého plechu, které umožňují dosáhnout intenzivního transportu hmoty a většího prosazení než starší typy. Nejběžnějším materiálem je relativně nejlevnější uhlíková ocel, ale používá se též nerezové oceli, hliníku, mědi, niklu, technického titanu, zirkonu, tantalu a rozličných speciálních slitin, takže cena materiálu se může lišit až o tři řády.

Výplň z plastů je odolná proti korozi, má poměrně malou hustotu, a proto nejsou náklady na vybudování základů věže tak velké jako pro ostatní materiály výplní. Její malou smáčivost vodnými roztoky lze zvětšit chemickou úpravou povrchu, tzv. hydrofilizací (cena výplně tím však vzroste). Hydrofobnost výplní z plastů roste v řadě: polysulfon, PVC, polypropylen, polyvinylidenfluorid a další. Výplně se nejčastěji vyrábějí z polypropylenu. Hodí se především pro

elementy výplní menších rozměrů, protože mohou mít tenčí stěny a kladou menší odpor proti protékající plynné fázi než keramické výplně. Jejich použití je omezeno hodnotou teploty, při níž se nevratně deformují (u polypropylenu je to 125 °C). Je však možné materiál výplně kombinovat a použít pro oblast s větší teplotou keramickou či kovovou výplň.



Obr. 29.8. Typy elementů výplně

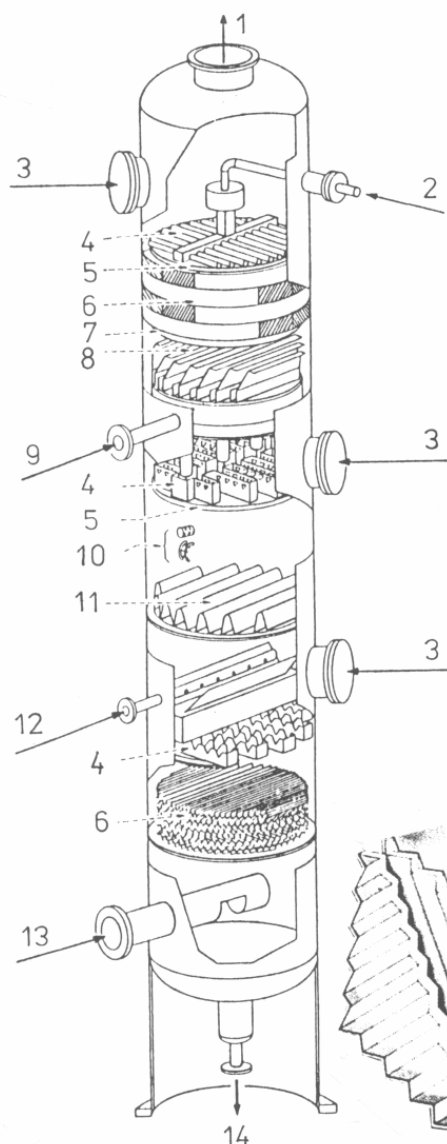
1-Raschigovy kroužky, 2-kroužky Pall kovové, 3-kroužky Pall plastové, 4-výplň Tripak plastová, 5-výplň Tripak kovová, 6-Berlova sedla, 7-sedla Intalox keramická, 8-sedla Intalox plastová, 9-sedla Intalox kovová, 10-výplň Tellerette

Při absorpci kyselých plynů se používá alkalických roztoků, které na polypropylenové výplni pěň. Tomu lze předejít předběžným promytím výplně roztokem hydroxidu sodného nebo použitím plastového materiálu, který nepodporuje vznik pěny. Některé plasty snášejí i vyšší teploty a dá se jich použít v korozivním prostředí. Věž je možné bez nebezpečí poškození výplně snadno a rychle plnit a vyprazdňovat pneumatickou dopravou.

Keramická výplň je poměrně levná a odolná proti korozi. Obvykle se dobře smáčí. Je však křehká a zejména ve spodních vrstvách vzniká drť, která zmenšuje mezerovitost vrstvy, a vlivem toho se může snáze zahltit. Je rovněž citlivá na rychlé změny teploty. Má ve srovnání s ostatními materiály nejmenší mezerovitost, protože je křehká a tloušťka stěn musí být větší. Proto je v ní pokles tlaku na jednotkovou výšku vrstvy největší (viz kap.8). Předností keramické výplně je nízká cena, odolnost proti korozi a dobrá smáčivost povrchu. Její nevýhodou je křehkost a poměrně velká sypná hustota. Věž s výplní potřebuje mohutné základy, a to zvyšuje investiční náklady. Používá se zejména pro korozivní prostředí, např. v technologii výroby minerálních kyselin. Podíl keramických výplní klesl ze zhruba 40 % v šedesátých letech na přibližně 15 % o dvacet let později a narůstá využívání výplní z plastů. Orientační hodnota ceny jednotkového objemu keramické výplně je asi 50 % a výplně z plastů 90 % ceny kovové výplně.

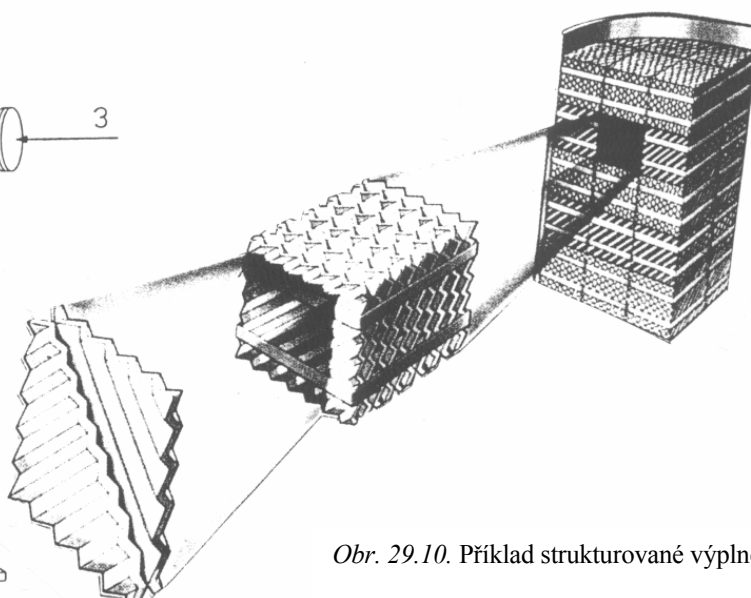
V novějších věžích s výplní se stále častěji používá *strukturované výplně*. Její začátky pocházejí z doby, kdy bylo nutné v jaderném průmyslu získávat těžkou vodu rektifikací. Původně se použilo Raschigových kroužků vyrobených z jemné kovové sítě (tzv. Dixonovy kroužky), které umožnily zmenšit hodnotu výšky ekvivalentní rovnovážnému patru na zhruba 20 mm (což

je řádově menší než hodnoty pro keramické kroužky). Věž odpovídající přibližně 400 rovnovážným patřům pak mohla mít rozumnou výšku, ovšem potíže s rozdělováním kapaliny nedovolily větší průměr věže než 50 mm. Bylo tedy nutné mít soubor velkého počtu paralelně pracujících věží. To bylo nákladné a bylo obtížné soubor ovládat. Začátkem šedesátých let nabídla švýcarská firma Sulzer výplň z kovové tkaniny tvořenou soustavou vlnitých desek skládaných na sebe tak, aby se směr drážek střídal. Tato výplň má nejen malou výšku ekvivalentní rovnovážnému patru (je však větší než hodnota pro Dixonovy kroužky), ale též malou tlakovou ztrátu na jednotkovou výšku věže.



Obr. 29.9. Možná vnitřní vybavení rektifikační věže s výplní

1-výstup parního produktu do kondenzátoru, 2-přívod zpětného toku, 3-průlez, 4-rozdělovač kapaliny, 5-rošt, 6-strukturovaná výplň, 7-podpůrný rošt, 8-sběrač kapaliny, 9-kapalný nástřík, 10-sypaná výplň, 11-podpůrný rošt s rozdělovačem páry, 12-parní nástřík, 13-přívod páry z vařáku, 14-kapalina do vařáku



Obr. 29.10. Příklad strukturované výplně

Koncem sedmdesátých let nabídla firma nový typ strukturované výplně z plechu místo z tkaniny. Tenký plech je děrovaný a lisováním získává vlnitý tvar. Výplň je tvořena soubory na sebe naskládaných vlnitých plechů (viz obr.29.10 a obr. 29.9). Podobnou výplň nabízejí i další výrobci (např. Glitsch či Norton). Odhaduje se, že 40 % světových firem produkujících styren využívá této výplně k dělení styrenu od ethylbenzenu. Výplň se uplatňuje při dělení, které vyžaduje až 100 rovnovážných pater.

Věž se strukturovanou a sypanou výplní může být při rektifikaci výhodnější než patrová věž. Je menší pokles tlaku, a tím menší rozdíl mezi teplotou ve vařáku a v kondenzátoru

a vzhledem k velké účinnosti výplně postačí menší hodnota poměru zpětného toku, proto je menší spotřeba energie. Také strukturovaná výplň vyžaduje rovnoměrné rozdělení kapaliny po průřezu, ale situace není tak kritická jako pro sypanou výplň, neboť tvar elementů strukturované výplně napomáhá dobrému rozdělování kapaliny. Dokonce se tvrdí, že lze horní část výplně použít jako rozdělovače kapaliny. Ve srovnání se sypanou výplní se snáze přenášejí výsledky měření na větší zařízení.

Strukturovaná výplň není vhodná pro velkou intenzitu toku kapaliny (mimovrstvová rychlost má být menší než zhruba 25 m h^{-1} , při větších rychlostech se doporučují ventilová patra). Stejně jako sypanou kovovou výplň ji ohrožuje koroze. Nehodí se pro plynnou či kapalnou fázi obsahující pevné částice. Existuje i strukturovaná výplň z plastů [61].

Pro věže s menším průměrem se strukturovaná výplň dodává jako disky o průměru odpovídajícím vnitřnímu průměru věže, pro větší průměry se vyrábějí díly, které projdou průřezy ve stěně věže a z nichž se výplň sestaví uvnitř věže (viz obr. 29.10).

29.3.2 Proudění fází ve výplni

Intenzita transportu hmoty závisí na hodnotě toku obou fází a roste s přibližováním pracovních podmínek k mezi zahlcení vrstvy (viz kap.8). Při kontinuálním provozu kolísají hodnoty toku fází kolem určité střední hodnoty. Vzhledem k existenci těchto výkyvů se doporučuje pracovat při 40 až 60 % hodnoty toku fáze při mezi zahlcení, někteří autoři navrhuji až 80 % této hodnoty.

Novější typy výplní kladou proudění plynné fáze menší odpor, takže nahradí-li se stará výplň novým typem, je pokles tlaku menší. To je výhodné s hlediska nákladů na dopravu plynné fáze, ale může se tím snížit intenzita prostupu hmoty. Pak se dá zvětšením toku plynné fáze intenzita transportu hmoty vrátit na původní hodnotu, ale zároveň se zvětší výkonnost zařízení (prosazení), a to je přínos dokonalejší výplně.

Zatímco se v patrové věži rozptyluje plyn v kapalině, ve věži s výplní je spojitým prostředím převážně plyn a velkého mezifázového povrchu se dosahuje tím, že kapalina stéká v tenké vrstvě (filmu) po povrchu elementů výplně^{*)}. Mezifázový povrch je obvykle menší než celkový povrch suché výplně. Příčinou mohou být nerovnoměrnost rozdělení přiváděné kapaliny po průřezu výplně, nerovnoměrnost mezerovitosti sypané výplně a nedokonalá smáčivost povrchu výplně.

Pro činnost věží s výplní má velký význam rovnoměrnost rozdělení kapaliny a plynu po průřezu vrstvy. Obvykle jsou menší problémy s rozdělením plynu než s rozdělením kapaliny. U kapaliny je nutno kontrolovat dva faktory, a to rovnoměrný přívod kapaliny na celý průřez vrstvy a úplnost smáčení povrchu elementů výplně.

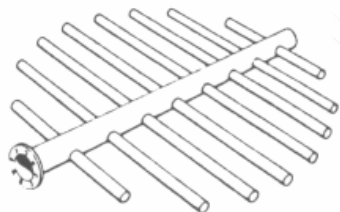
Rovnoměrnost přívodu kapaliny zajistí vhodná konstrukce rozdělovače kapaliny. Existují zhruba tři typy rozdělovačů, a to

- a) trubkové,
- b) žlabové,
- c) deskové.

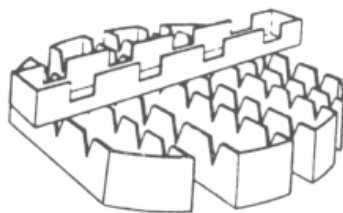
Trubkové rozdělovače (viz obr. 29.11a) se skládají z děrovaných trubek, do nichž se kapalina přivádí pod tlakem a vytéká v tenkých paprscích. Kapalina se rozděluje velmi rovnoměrně a rozsah pracovních průtoků je velký. Přitom není třeba se příliš starat o uložení rozdělovače do vodorovné roviny. Jejich nevýhodou je možnost ucpávání otvorů pevnými

^{*)}Ve skutečnosti není mezifázová plocha tvořena pouze povrchem filmu, neboť změnou povrchového napětí se složením vznikají vlivem proudění plynné fáze kapky a některé systémy mají tendenci k tvorbě pěny.

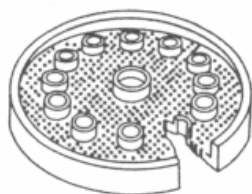
částicemi obsaženými v přiváděné kapalině. Pokud kapalina takové částice obsahuje, používá se žlabových rozdělovačů.



(a)



(b)



(c)

Obr. 29.11. Příklady rozdělovačů kapaliny

- a) trubkový
- b) žlabový
- c) deskový

Žlabový rozdělovač (viz obr. 29.11b) je soustava žlabů uspořádaných tak, aby kapalina vytékající výřezy či otvory ve žlabech zkrápěla rovnoměrně povrch vrstvy výplně. Jeho funkce se zakládá na působení gravitace, a proto je třeba dbát, aby byly jednotlivé žlaby nastaveny do vodorovné polohy. Aby se předcházelo zanášení výtokových otvorů usazeninami, nedělají se otvory ve dnu žlabů, nýbrž v postranních stěnách.

Deskový rozdělovač (viz obr. 29.11c) je deska s průměrem přibližně rovným průměru vrstvy, s otvory pro vytékající kapalinu a s trubicemi pro odváděný plyn (jsou situovány tak, aby plyn nestrhoval kapky kapaliny). Střední velikost průměru otvoru pro kapalinu je asi 8 mm (u menších průměrů je nebezpečí ucpání) a doporučuje se minimálně 65 otvorů na 1 m².

Je žádoucí, aby rozdělovač kapaliny měl jednoduchou konstrukci, aby manipulace při nastavování polohy byla jednoduchá a aby pracoval v dostatečně širokém rozmezí hodnot toku kapaliny. Protože rozdělovač kapaliny významně ovlivňuje sdílení hmoty ve výplni, objevují se stále nové návrhy na jeho konstrukci.

Volně sypaná výplň má v oblasti u stěny větší mezerovitost, proto má kapalina snahu stékat směrem ke stěnám. Tento efekt je tím větší, čím je poměr charakteristického délkového rozměru částice výplně k průměru vrstvy větší. Doporučuje se rozměr částice menší než patnáctina průměru vrstvy [71]. Aby se udržela rovnoměrnost rozdělení kapaliny po průřezu vrstvy, skládá se výplň z několika sekcí s přerозdělovači mezi sekcemi, které vedou kapalinu směrem od stěny [viz (6) na obr. 29.7]. Doporučuje se, aby výška vrstvy Raschigových kroužků byla nejvýše trojnásobkem a pro kroužky Pall nejvýše osmi až desetinásobkem průměru vrstvy.

Smáčení povrchu elementů výplně souvisí s hodnotou mimovrstvové rychlosti kapaliny^{*)}, s povrchovým napětím kapaliny a s charakterem povrchu elementů výplně^{**)}. Pro poměr hustoty povrchu výplně smočené, a_w , a suché, a_c , tj. a_w / a_c , pro stupeň smáčení povrchu výplně, byly publikovány empirické vzorce, jako např. (viz lit. [51]):

$$\frac{a_w}{a_c} = 1 - \exp \left[-1,45 \left(\frac{\sigma_m}{\sigma} \right)^{0,75} Re_l^{0,1} Fr_l^{-0,05} We_l^{0,2} \right] \quad (29.3-1)$$

Veličina σ je povrchové napětí kapaliny a hodnoty maximálního povrchového napětí σ_m , při kterém ještě není narušena souvislá vrstva kapaliny stékající po povrchu výplně, jsou uvedeny

^{*)}Orientační udávaná hodnota [48] je $\langle v_{\min} \rangle = 8 \cdot 10^{-2} a_c \text{ m h}^{-1}$, podle lit.[8] se doporučuje pro sypanou výplň hodnota $\langle v_{\min} \rangle$ od $0,35 \cdot 10^{-3}$ do $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ a pro strukturovanou výplň od $0,07 \cdot 10^{-3}$ do $0,14 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

^{**)} Lépe se smáčí keramická a kovová výplň, kdežto výplň z plastických hmot vyžaduje určitou dobu k dosažení dostatečné smáčivosti, pokud není předem hydrofilizována.

pro rozličné materiály výplně v tab.15-3 v *Příkladech*. Vzorec obsahuje kritérium Reynoldsovo, Weberovo a Froudovo, přičemž ($\phi_l = \dot{m}_l / S$)

$$Re_l = \frac{\phi_l}{a_c \eta_l}, \quad We_l = \frac{\phi_l^2}{\rho_l \sigma a_c}, \quad Fr_l = \frac{\phi_l^2}{\rho_l^2 a_c g} \quad (29.3-2)$$

Nedokonalé rozdělování plynné fáze má významnější vliv na činnost věží s velkým průměrem, s malou výškou vrstvy (menší než je průměr vrstvy) a je-li průměr přírodní trubky pro plynnou fázi malý. Plyn pak prochází jen určitou oblastí vrstvy a část kapaliny proteče bez kontaktu s plynnou fází. Některé typy roštů mají menší otvory pro odvod kapaliny a větší otvory vybavené nátrubky vyčnívajících nad plochou roštu (viz lit.[4]) pro přívod plynu do vrstvy, což zlepšuje rozdělování vstupujícího plynu.

Pracuje-li se při relativně velkém poklesu tlaku ($\approx 0,5 \text{ kPa m}^{-1}$) a když tlak kolísá, je třeba na horní povrch vrstvy dát desku s otvory, která brání unášení elementů výplně. Tato deska má mít volný průřez minimálně 70 % volného průřezu výplně a průměr otvorů nemá být větší, než je minimální délkový rozměr elementu výplně.

Pokles tlaku (tlakovou ztrátu) ve věži s výplní je možné odhadnout z *obr.3-6 v Příkladech*. Je zobecněním pokusně zjištěných tlakových ztrát pro některé typy výplní a rozličné tekutiny při protiproudu plynné fáze a kapaliny. Na ose pořadnic je výraz obsahující mimovrstvovou rychlost plynu, nominální délkový rozměr elementu výplně (délokový údaj, který charakterizuje velikost elementu výplně, např. vnější průměr Raschigova kroužku; je udáván výrobcem), koeficient charakterizující typ výplně, dále hustotu a viskozitu plynné fáze a kapaliny. Na ose úseček je poměr objemových toků kapalné a plynné fáze. Parametrem křivek je pokles tlaku připadající na jednotkovou výšku vrstvy výplně.

Kromě toho graf obsahuje čáru vyjadřující podmínky meze zahlcení výplně (viz též kap.8)*). Podmínky meze zahlcení výplně lze popsat empirickými vzorci, jako např.[29]:

$$\ln \left[\frac{v_g^2 a}{\varepsilon^3 g} \frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \left(\frac{\eta_l}{\eta_0} \right)^{0,16} \right] = 5,07 \cdot 10^{-2} - 4,03 \left(\frac{F_l}{F_g} \right)^{1/4} \quad (29.3-3)$$

kde je a hustota povrchu volně sypané suché výplně, ε její mezerovitost (v literatuře se též místo zlomku a/ε^3 používá pokusně určené veličiny F_p , tzv. *faktoru výplně*), ρ hustota, η dynamická viskozita, $\eta_0 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Pa s}$, v_g mimovrstvová rychlost, F intenzitní faktor, g tíhové zrychlení a indexy g plynná fáze a l kapalina. Obdobná rovnice byla navržena pro soustavu dvou kapalin.

Při *souproudu* nedochází k zahlcení. Výkonnost aparátu je podstatně větší než při protiproudu. Při velkých rychlostech fází však nastávají pulsace a kapalina může být z velké části unášena ve formě kapek. Protože při souproudu aparát pracuje nanejvýš jako jeden rovnovážný stupeň, je užitečný především při chemické reakci (kdy je toto uspořádání známo pod anglickým názvem "trickle flow").

Potřebná výška vrstvy výplně závisí na rychlosti transportu hmoty ve vrstvě. Vyjadřuje se pomocí koeficientů přestupu hmoty, výšky převodové jednotky nebo výšky ekvivalentní jednomu rovnovážnému stupni. V literatuře existují četné údaje ve tvaru empirických vzorců

*) Mez zahlcení výplně se definuje v literatuře třemi způsoby jako

- vznik vrstvy kapaliny nad vrstvou výplně,
- druhý zlom v grafickém znázornění závislosti poklesu tlaku na objemovém toku plynu (při konstantním toku kapaliny) v logaritmických souřadnicích (bod B v obr. 8.4 v kap. 8),
- bod, od kterého náhle silně vzrůstá zádrž kapaliny ve vrstvě.

(obvykle jako kritériální rovnice), grafických závislostí a tabulek. V *Příkladech* jsou v kap. 15 uvedeny některé vzorce pro výpočet koeficientu přestupu hmoty a výšky převodové jednotky pro absorpci ve vrstvě výplně.

V tomto oddílu jsme se podrobněji zabývali aparáty s vrstvou výplně, které mají obdobný význam jako patrové věže. Byly popsány s hlediska konstrukce a procesů, které v nich probíhají.

29.4 Porovnání výměníků hmoty

V oddílu se porovnávají věže (kolony) s rozmanitou vnitřní konstrukcí a k usnadnění výběru je uvedena přehledná tabulka.

Zkušenosti s rozličnými výměníky hmoty pro kontakt plynu a kapaliny shrnuje tab. 29.1 (viz lit. [10]). Do tabulky je zařazena i sprchová věž probíraná v následujícím textu.

Tabulka 29.1 Porovnání některých výměníků hmoty pro absorpci a rektifikaci

aparáty	1	2	3	4	5	6	7	8	9
cena / objem věže	+	+	-	-	++	++	--	-	-
výkonnost (plynná fáze)	0	0	-	+	-	0	++	0	0
výkonnost (kapalná fáze)	0	0	-	++	0	+	+	0	-
účinnost dělení / (objem věže)	0	0	0	0	-	--	++	+	0
pokles tlaku / (rovnovážný stupeň)	0	0	0	0	-	0	++	+	++
rozsah průtoků	0	+	++	-	-	0	+	+	0
citlivost k zanášení	0	-	0	0	+	++	-	-	-
citlivost ke korozi	0	-	0	0	0	++	--	--	-
přenos měřítka	0	0	-	+	--	--	+	+	+
výběr materiálů	0	0	0	0	0	+	+	++	0
možnost vizuální kontroly	0	0	0	-	+	++	--	-	+
dostupnost informací	++	++	+	-	-	0	+	++	-

Aparáty:

Patrová věž:

- 1 síťová patra s přepadem
- 2 ventilová patra s přepadem
- 3 kloboučková patra
- 4 patra s více přepady
- 5 bezpřepadová patra

Věž s přepážkami: 6

Věž s výplní:

- 7 strukturovaná výplň
- 8 volně sypaná či ukládaná výplň

Sprchová věž: 9

Doporučení:

++ velmi vhodné

+ vhodné

0 použitelné

- málo vhodné

-- nevhodné

Nejběžnějšími aparáty z dosud probíraných jsou věže s patry s přepady a věže s volně sypanou a ukládanou výplní. Věže s výplní se používá obvykle pro menší průměry věže (zhruba do 1 m), pro větší průměry jsou běžné patrové věže. Pro náročnější dělení zejména při malých až atmosférických tlacích je vhodná strukturovaná výplň, i když je nákladnější. Pro korozivní látky existují keramické a plastové výplně. Když není žádná z nich vhodná, lze použít bezpřepadových pater nebo věží s přepážkami. Kovová sypaná a ukládaná a strukturovaná výplň se pro korodující směsi nehodí. Kloboučková patra se používají v menší míře, výjimku tvoří absorpce při malých průtocích plynné fáze. O volbě vždy rozhoduje ekonomická analýza.

V sedmdesátých letech, v době ropné krize a zvýšené snahy o úsporu energie, se začaly rektifikační věže s patry přestavovat na věže s výplní. Náhrada pater vrstvou výplně je výhodná, když přináší užitek zmenšením tlakové ztráty. Příklady toho jsou:

1. Rektifikace termolabilní látky. V patrové věži může být jen málo pater, aby nevznikl velký rozdíl tlaků. Potřebného dělení se musí dosahovat velkou hodnotou poměru zpětného toku, proto je velká spotřeba topné páry a chladicí vody (např. dělení směsi ethylbenzen-styren).

2. Téměř každá patrová věž pracující při podmínkách blízkých zahlcení. Záměnou se zvětší výkonnost zařízení.

3. Tam, kde snížení teploty ve vařáku umožní využít levnějšího topného média. Naopak zvýšení teploty kondenzace při stejné teplotě ve vařáku může zmenšit náklady na chlazení.

Účinnost a selektivita aparátu závisí na hodnotách koeficientů přestupu hmoty, a tedy na konstrukci aparátu a na podmínkách provozu.

Zádrž kapaliny na patrech a ve výplni je užitečná především pro uskutečňování chemické reakce. Je-li reakce nežádoucí (např. tepelný rozklad), měla by být zádrž co nejmenší. Pak je vhodná věž s výplní, neboť má zádrž kapaliny zhruba 5 až 15 % objemu vrstvy na rozdíl od patrové věže s 15 až 30 % aktivního objemu věže. Se zádrží souvisí dynamické chování aparátu. Např. fluktuace toku suroviny mohou účinnost zařízení s malou zádrží ovlivnit nepříznivě. Naproti tomu uvedení do ustáleného stavu je pro aparát s výplní mnohem kratší než pro patrovou věž.

Pro strukturovanou výplň je pokles tlaku (tlaková ztráta) připadající na jeden rovnovážný stupeň ≈ 25 až 50 % hodnoty pro patra. Proto je strukturovaná výplň vhodná zejména pro vakuovou rektifikaci. Tam přináší možnost zvětšení výroby destilátu a zmenšení poměru zpětného toku, a tím i spotřeby topné páry a chladicí vody.

Výrobci výplní nabízejí nové tvary elementů výplně. Některé mají zhruba kulový tvar, a tím umožňují rovnoměrnější rozdělení fází. Zdá se však, že pro volbu je podstatná velikost elementů výplně. Větší elementy kladou menší odpor proudění plynné fáze a zařízení má větší výkonnost při stejném průřezu vrstvy v porovnání s výplní menších rozměrů. Množství transportované složky mezi fázemi při stejném toku fází je však menší (mají menší hustotu povrchu). Opak platí pro malé elementy výplně. Ty jsou kromě toho citlivější na rovnoměrnost rozdělení kapaliny po průřezu vrstvy a cena objemové jednotky výplně je větší. Vhodná velikost částic výplně se určí z analýzy nákladů.

V tomto oddílu je uvedeno porovnání rozličných výměníků hmoty tak, jak se uvádí v literatuře. Slouží k první orientaci, po ní musí následovat propočet rozličných variant.

29.5 Další typy výměníků hmoty

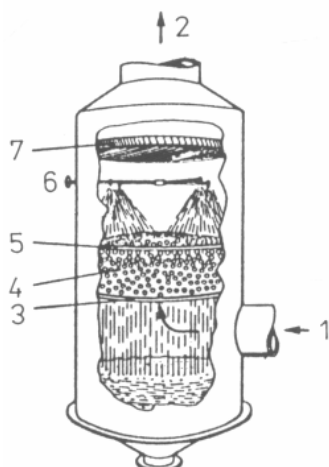
Oddíl obsahuje popis aparátů s fluidní vrstvou, se skrápěnou stěnou, s míchadlem a s využitím odstředivé síly. Používá se jich k absorpci a k extrakci

29.5.1 Aparáty s fluidní vrstvou

Zařízení příbuzné věži s výplní je aparát s fluidní vrstvou. Pokud jím prochází jen jedna tekutá fáze, nastává výměna hmoty mezi tekutinou a elementy výplně, např. při sušení zrnitého materiálu, při adsorpci a výměně iontů, v reaktorech, v nichž se pevná fáze účastní reakce či katalyzuje reakci v tekutině. Popis fluidní vrstvy obsahující jednu tekutou fázi je probírán v kap. 11. Jako výměníky hmoty se uplatňují též fluidační aparáty se dvěma tekutými fázemi a vrstvou koulí (obvykle z plastů). Na *obr. 29.13* je schéma takového aparátu. Koule jsou v prostoru vymezeném dvěma sítý, z nichž dolní rovnoměrně rozděluje přiváděnou plynnou fázi po průřezu a horní brání unášení koulí proudící plynnou fází ven z aparátu. Tento typ výměníku hmoty se používá především k absorpci, ale též k rektifikaci, k fermentaci a jako lapač prachu. Při absorpci je výhodný k pohlcování plynné fáze v kapalných suspenzích či ke zpracování plynných směsí obsahujících velký podíl pevných částic (např. při využívání k ekologickým účelům).

Vedle uvedených předností mají tyto aparáty své nedostatky, jako je eroze částic výplně, pulsace vrstvy, kanálování kapalně i plynné fáze a zpětné promíchávání kapalně fáze. Vliv posledních dvou faktorů se zmenší provedením absorpce v několika za sebou zařazených vrstvách nebo aparátech. K návrhu takového aparátu je kromě znalosti koeficientů přestupu

hmoty třeba mít údaje o poklesu tlaku zařízením, o expanzi vrstvy, o zádrži plynné a kapalné fáze a o prahu fluidace vrstvy.



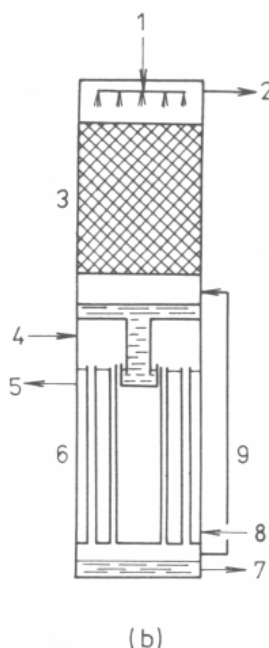
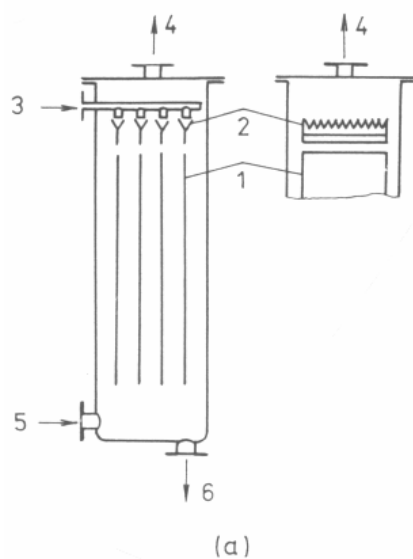
Obr. 29.13. Absorbér s fluidní vrstvou

1-přívod plynu, 2-odvod plynu, 3-dolní rošt, 4-fluidní vrstva, 5-horní rošt, 6-přívod kapaliny, 7-lapač kapek, 8-odvod kapaliny

29.5.2 Aparáty se zkrápěnou stěnou

Podobně jako ve vrstvě výplně stéká i v aparátech se zkrápěnou stěnou kapalina v tenké vrstvě a podél ní proudí plyn nebo pára (viz obr. 29.14). Tyto výměníky hmoty mají uplatnění zejména pro silně neizotermní procesy, jako je absorpce HCl ve vodě při výrobě kyseliny chlorovodíkové nebo absorpce amoniaku ve vodě apod.

Tenká vrstva kapaliny má relativně velký povrch na jednotkový objem kapaliny, a proto je možné intenzivní chlazení, jak je znázorněno na obr. 29.14b. Tam znázorněný aparát je vlastně svislý svazkový výměník tepla. Po vnitřní stěně jeho trubek stéká film kapaliny, do které se rozpustná část plynné fáze absorbuje, mezitrubkovým prostorem proudí chladivo.



Obr. 29.14. Aparáty se zkrápěnou stěnou

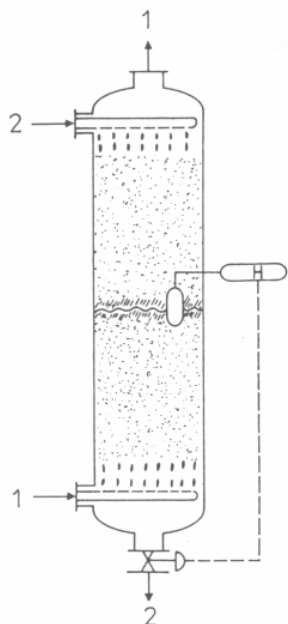
a) deskový absorbér: 1-desky, 2-rozdělovač kapaliny, 3-přívod kapaliny, 4-odvod plynu, 5-přívod plynu, 6-odvod kapaliny

b) absorbér HCl: 1-přívod vody, 2-odvod plynu zbaveného HCl, 3-vrstva výplně, 4-přívod plynu, 5-odvod chladicí vody, 6-trubkový absorbér, 7-odvod kyseliny, 8-přívod chladicí vody, 9-zředěný plyn z trubkového absorbéru

Pro aparáty se zkrápěnou stěnou je typický velmi malý pokles tlaku při průchodu plynu. Jejich nevýhodou je menší plocha mezifázového povrchu připadající na jednotkový objem aparátu a menší rychlost prostupu hmoty ve srovnání s vrstvou výplně (což obojí je pro dobře rozpustné plyny nevýznamné). Problémy může činit dosažení rovnoměrného smáčení celého povrchu stěny. Zvětšit hodnotu koeficientů přestupu hmoty je možné zdrsněním povrchu, po němž stéká kapalný film. Používá se též plechových pásů, do nichž jsou vysekány štěrby, ze kterých protažením pásu vzniknou větší otvory. Tyto pásy mají český název tahokov. Je to obdoba plechů používaných ve strukturované výplni. Obvyklý je protiproud toku fází. Zvýšení

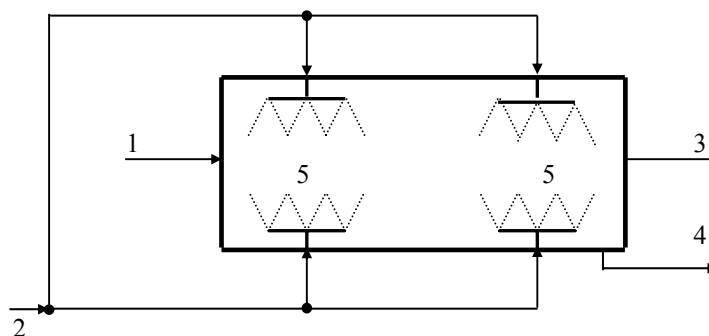
výkonnosti se dosáhne při souproudu, při velkých výkonnostech však silně vzroste tlaková ztráta (viz např. lit. [55]).

29.5.3 Sprchové aparáty



Obr. 29.15. Sprchový extraktor

1- kapalina s menší hustotou,
2- kapalina s větší hustotou
H- hladinoměr



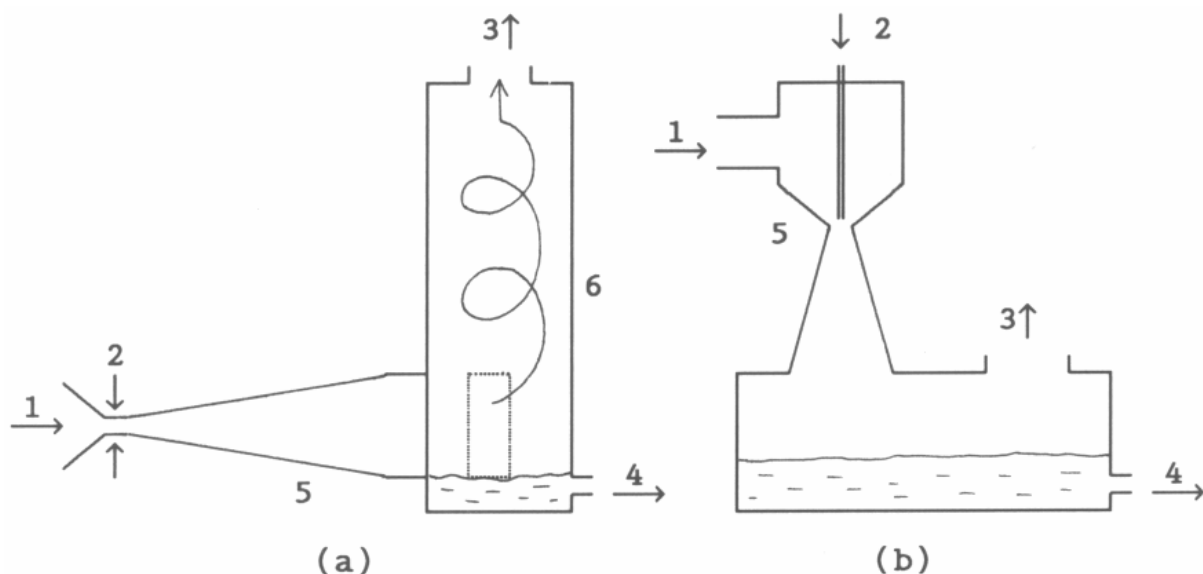
Obr. 29.16. Ležatý sprchový absorbér

1- přívod plynu 3- odvod plynu 5- sprcha
2- přívod kapaliny 4- odvod kapaliny

Velké hodnoty mezifázového povrchu se dosáhne též rozptýlením kapaliny na kapky. Toho se využívá např. ve sprchovém extraktoru znázorněném na obr. 29.15. Je to velmi jednoduchý, a proto levný aparát, ale jeho účinnost je malá vzhledem k tomu, že se jeho obsah axiálně promíchává. Kapalina se disperguje (rozptyluje) děrovanou deskou obdobnou koupelnové sprše. Pokud nehrozí inverze fází, rozptyluje se ta fáze, která má větší hodnotu toku. Poskytuje totiž větší mezifázovou plochu. Může se však dát přednost rozptylování kapaliny s větší viskozitou, protože se rychleji usazuje. Na obrázku je naznačeno udržování stálé výšky rozhraní mezi spojitými fázemi. Plovákem se kontroluje výška hladiny a z její změny pak vychází regulace toku odtékající kapaliny tak, aby se hladina vrátila do původního stavu.

Sprchové absorbéry se používají průmyslově např. k zachycování SO_2 z kouřových plynů. Jejich předností je malá tlaková ztráta a to, že nejsou citlivé na přítomnost pevných částic v přiváděné plynné fázi. Doba prodlení kapaliny je v těchto absorbérch poměrně krátká, proto se hodí především pro systémy s odporem proti absorpci soustředěným v plynné fázi, tj. pro dobře rozpustné plyny a při absorpci s rychlou nevratnou chemickou reakcí v kapalině. Obsah svislé sprchové věže se značně podélně promíchává, proto je účinnější ležatý aparát se soustavou sprch seřazených po délce aparátu a nasměrovaných kolmo ke směru proudění plynu (křížové proudění). Schematicky to je znázorněno na obr. 29.16.

Jiný způsob rozptylování kapaliny využívá hybnosti plynné fáze. Ta se urychlí při průchodu zúženým hrdlem trubice Venturi a rozptyluje kapalinu, jež se přivádí buď otvory po obvodu hrdla, nebo axiální trubicí ústící v hrdle trubice. Obě varianty jsou znázorněny na obr. 29.17, představujícím absorbér Venturi. Aparát pracuje při souproudu obou tekutin, proto představuje nejvýše jeden rovnovážný stupeň. Strhované kapky je třeba od plynu oddělit, a to se provádí v cyklónovém odlučovači nebo změnou směru proudění plynné fáze.



Obr. 29.17. Absorbér Venturi

a) aparát s přívodem kapaliny po obvodu hrdla trubky

b) aparát s centrálním přívodem kapaliny

1-přívod plynu, 2-přívod kapaliny, 3-odvod plynu, 4-odvod kapaliny, 5-trubka Venturi, 6-cyklónový odlučovač kapek

29.5.4 Aparáty využívající odstředivé síly

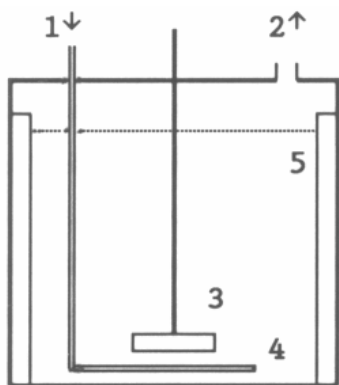
Při sdílení hmoty v soustavách kapalina-kapalina a pevná látka-kapalina jsou poměrně časté odstředivky a rotační koalescery. Hustota extraktu se příliš neliší od hustoty rafinátu, a proto je relativní pohyb dispergované vůči spojitě fázi málo intenzivní. To má nepříznivý vliv na hodnotu koeficientů přestupu hmoty a na výkonnost aparátu, neboť toky fází jsou závislé na rozdílu hustot. Jestliže se však místo gravitace využije odstředivé síly, je možné přestup hmoty podstatně urychlit. První extrakční aparát tohoto typu začala vyrábět firma Podbielniak. Je to soubor koncentrických děrovaných plechových válců uzavřený v plášti bubnu. Kapalina s větší hustotou se přivádí blízko osy a kapalina s menší hustotou blízko pláště bubnu. Odstředivá síla vzniklá rotací vytlačuje kapalinu s větší hustotou směrem k plášti bubnu a kapalina s menší hustotou putuje směrem k ose. Produkty se odvádějí z krajních poloh, tj. z prostoru mezi vnějším válcem a pláštěm bubnu a z prostoru uvnitř bubnu s nejmenším průměrem. Při velké frekvenci otáčení (řádově jednotky za sekundu) nastává intenzivní výměna hmoty a plocha mezifázového povrchu je velká. Proto je aparát velmi účinný, ovšem je poměrně nákladný. Vyniká extrémně malou zádrží připadající na jednu převodovou jednotku, a proto je vhodný tam, kde během extrakce probíhá nežádoucí chemická reakce. Používá se např. při výrobě antibiotik a při dalších farmaceutických výrobcích, v ropném průmyslu, při zpracování odpadních vod a v jaderném průmyslu.

29.5.5 Aparáty s míchadlem

Mícháním se disperguje jedna fáze ve druhé a podporuje se intenzivní proudění. Tím se vytváří velká plocha mezifázového rozhraní a urychluje se přestup hmoty v tekutinách. Aparátů s míchadly se používá v absorpci, adsorpci a zejména v extrakci. Absorbéry s míchadlem (viz

obr. 29.18) se používají k absorpci s chemickou reakcí. Kapalina může obsahovat rozptýlenou pevnou fázi. Stěnami nádoby nebo zabudovaným hadem je možné kapalinu chladit či zahřívát. Běžně se používá turbínového míchadla s rovnými lopatkami a plynná fáze se přivádí pod míchadlo trubkou, děrovanou trubkou nebo dutou hřídelí míchadla. Stěny nádoby bývají opatřeny narážkami, které brání tvorbě víru.

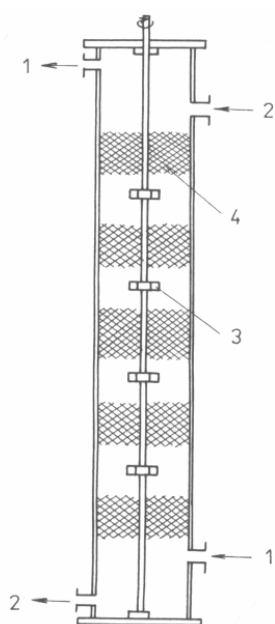
Absorbér je vhodný pro pomalé reakce, protože umožňuje dostatečně dlouhou dobu prodloužení kapaliny v absorbéru (mnohem delší než ve vrstvě výplně).



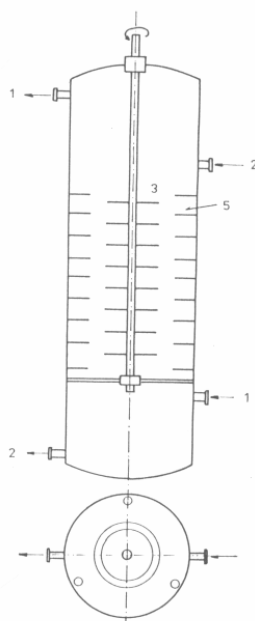
Obr. 29.18. Absorbér s míchadlem
1-přívod plynu, 2-odvod plynu,
3-turbínové míchadlo, 4-rozdělo-
vač plynu, 5-narážky

Míchání podporuje výměnu tepla s teplosměnnou plochou. Aparát pracuje nejvýše jako jeden rovnovážný stupeň, proto je někdy třeba zařadit několik aparátů za sebou. Objemový tok zpracovávaného plynu je poměrně malý, odpovídá rychlosti stoupání bublin kapalinou ($\approx 5 \cdot 10^{-2} \text{ ms}^{-1}$). Hlavním parametrem určujícím účinnost aparátu je relativní zádrž plynné fáze (tj. objem plynné fáze lomený objemem směsi plynné a kapalné fáze), která dosahuje hodnot až 0,4. Ve fermentorech se používá více míchadel na jedné hřídeli.

Obdobné zařízení se používá pro extrakci. Míchadla jsou vrtulová nebo turbínová s rovnými lopatkami, tvorbu víru se brání narážkami (viz kap.12). Při kontinuálním provozu se emulze vzniklá v míchacím zařízení vede do usazovaku, v němž se dělí na dvě kapalně fáze. Jedna z variant těchto separátorů je na obr. 20.3a.



(a)



(b)

Obr. 29.19. Extraktor s míchadly : a) turbínová míchadla; b) disková míchadla

1- kapalina s menší hustotou, 2- kapalina s větší hustotou, 3- turbínové (diskové) míchadlo, 4- drátěná síťka, 5- přepážky

Další typy extraktorů jsou věže, které obsahují obdobně jako fermentory více míchadel na jedné hřídeli a funkci usazovaku vykonává uklidňovací oblast mezi prstencovými přepážkami upevněnými na stěně (viz obr. 29.19b) nebo vrstva výplně (obvykle z kovového síta) v prostoru mezi míchadly (viz obr. 29.19a). Extraktory pak pracují jako více-
stupňové aparáty. Na obr. 29.19b je znázorněn extraktor obsahující soubor diskových míchadel na jedné hřídeli a označuje se zkratkou RDC (Rotating Disc Contactor). Uplatňuje se zejména v ropném průmyslu.

V tomto oddílu se stručně popisují některé výměníky hmoty neuvedené v předešlých oddílech této kapitoly.

Aparáty typické pro daný proces se popisují v příslušných kapitolách tohoto skriptu.

Podrobnější pojednání o aparátech chemického průmyslu obsahuje odborná literatura a katalogy výrobců zařízení. Pro modelování a navrhování aparátů existují komerční počítačové programy.

KONTROLNÍ ÚLOHY

29.1. Jaké způsoby kontaktu mezi fázemi se používají ve výměnících hmoty?

29.2. Ve kterých procesech se uplatňuje patrová věž? Jaké má přednosti a nedostatky?

29.4. Na čem závisí účinnost patra? Co víte o místní účinnosti patra?

29.5. Ve kterých procesech se uplatňuje věž s výplní? Jaké má přednosti a nedostatky?

29.6. Jaké znáte typy výplní? Z jakých materiálů se vyrábějí?

29.7. V čem se liší věže s výplní od patrových věží?