



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava



ZÁKLADY PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

učební text

Kamil Wichterle, Marek Večeř

Ostrava 2012

Recenze: prof. Ing. Lucie Obalová Ph.D.
Doc. RNDr. Jana Kapounová, CSc.

Název: Základy procesního inženýrství
Autor: Kamil Wichterle
Vydání: první, 2012
Počet stran: 148
Náklad: 20

Studijní materiály pro obory Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
Jazyková korektura: nebyla provedena.

Určeno pro projekt:

Operační program Vzděláváním pro konkurenceschopnost

Číslo: CZ.1.07/2.2.00/07.0339

Realizace: VŠB – Technická univerzita Ostrava

Projekt je spolufinancován z prostředků ESF a státního rozpočtu ČR

© Kamil Wichterle

© VŠB – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-2580-9

OBSAH

1. PŘEDMĚT PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ.....	7
2. BILANCE	11
2.1. Bilanční schéma	11
Bilanční schéma	11
2.2. Látkové bilance	13
Látkové bilance	13
Směsi	15
Reaktory, vznik a zánik bilancované veličiny, fiktivní bilanční proudy	15
Formální pravidla bilance.....	16
Simulace procesů.....	17
Bilance hmotnosti ve směsích s použitím hmotnostních zlomků.....	17
Bilance energie.....	18
3. HYDROMECHANICKÉ OPERACE.....	22
3.1. Mechanika tekutin	22
Mechanika tekutin	22
Spojité prostředí	22
Hydrostatika	23
Bilance hmoty pro tekutinu v pohybu	24
Bilance energie. Bernoulliho rovnice	24
3.2. Proudění tekutin	30
Proudová trubice, charakterizovaná jediným rozměrem. Rozměrová analýza.....	30
Laminární a turbulentní proudění.....	32
Proudová trubice, charakterizovaná dvěma rozměry	32
Turbulentní proudění v drsné trubce	34
Potrubní sítě.....	36
3.3. Čerpání tekutin	39
Čerpadla objemová.....	39
Čerpadla hydrostatická.....	41
Čerpadla dynamická (hydrodynamická).....	41
Čerpání plynů, kompresory	44
Hydrodynamické motory.....	45
Skladování mechanické energie	45
3.4. Usazování	48
Usazování částic v tekutině	48
Rovnovážný stav	48
Dynamika usazování	49
Kontinuální usazování.....	49
Teorie usazovací rychlosti.....	50
Odpor při ustáleném pohybu koule v tekutině	50
Odpor nekulových těles.....	51
Rychlost usazování vlivem tíže.....	52
Disperzní soustavy, koalescence, inverze	54
Usazování v odstředivém poli	54
Vírové odlučovače – cyklóny.....	55
Jiné hnací síly	55
Příklady	56
3.5. Oddělování směsí specificky propustnou přepážkou	58
Úvod.....	58
Třídění na sítích	58

Filtrace.....	59
Filtrace v odstředivce	64
Membránové dělení.....	64
3.6. Uvádění pevných látek do styku s tekutinou	69
Suspendace	70
Míchadla.....	72
Fluidace	73
3.7. Dělení směsí působením povrchových jevů	74
Zachycování složek tekutiny na povrchu pevného materiálu.....	74
Adsorpce.....	75
Adsorpční zařízení.....	77
Hloubková filtrace.....	78
Využití povrchově aktivních látek	79
4. SDÍLENÍ TEPLA.....	79
4.1. Teplo a mechanismus jeho přenosu	79
Formy energie	79
Teplo a teplota, tepelná kapacita, měrná tepelná kapacita	80
Tepelné výpočty, bilance tepla.....	82
Sdílení tepla mezi dvěma látkami při dlouhém kontaktu v izolovaném systému.....	86
Výpočty sledující rychlost sdílení tepla	86
Vedení tepla.....	86
Přestup tepla	87
Přestup tepla prouděním - nucená konvekce	87
Volná (přirozená) konvekce	89
Součinitel prostupu tepla.....	90
Odhad rychlosti sdílení tepla.....	92
Vedení tepla při rychlých změnách teploty	92
Přestup tepla prouděním při povlnných změnách teploty	94
4.2. Teplosměnná zařízení.....	95
Tepelný výměník.....	96
Řetězení tepelných zařízení.....	101
Příklady	102
4.3. Přestup tepla se změnou fáze.....	103
Var.....	103
Režim varu	103
Kondenzace	106
Ohřev tuhého materiálu, rozpouštění, tavení, sublimace.....	108
Krystalizace	108
Kalcinace	109
5. SDÍLENÍ HMOTY MEZI FÁZEMI.....	112
5.1. Uvádění nemísitelných tekutin do vzájemného styku	112
Bilanční prvky zařízení pro výměnu hmoty	112
Soustavy kapalina- plyn (pára).....	115
Přestup hmoty mezi tekutými fázemi.....	118
5.2. Dvoufázové soustavy kapalina – pára. Destilace	120
Fyzikálně chemický základ: rovnováha kapalina – pára.....	120
Dělení směsi destilací.....	123
Kontinuální rektifikace.....	126
Destilační kolona jako zařízení	128
Výpočty destilace a destilačních kolon	129
5.3. Dvoufázové soustavy kapalina – plyn.....	133
Využití rovnováhy kapalina - plyn.....	133

Vlhký vzduch	134
Procesy, využívající rovnováhy voda – vzduch	137
Sušení	138
Destilace s vodní parou	141
Úprava vzduchu, klimatizace	141
Chlazení vody odparem do vzduchu	141
Rozpustnost plynů v kapalině, absorpce	147

Při studiu každé kapitoly doporučujeme následující postup:



Čas ke studiu: xx hodin

Na úvod kapitoly je uveden **čas** potřebný k prostudování látky. Čas je orientační a může vám sloužit jako hrubé vodítko pro rozvržení studia celého předmětu či kapitoly. Někomu se čas může zdát příliš dlouhý, někomu naopak. Jsou studenti, kteří se s touto problematikou ještě nikdy nesetkali a naopak takoví, kteří již v tomto oboru mají bohaté zkušenosti.



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat ...
- definovat ...
- vyřešit ...

Ihned potom jsou uvedeny cíle, kterých máte dosáhnout po prostudování této kapitoly – konkrétní dovednosti, znalosti.



VÝKLAD

Následuje vlastní výklad studované látky, zavedení nových pojmů, jejich vysvětlení, vše doprovázeno obrázky, tabulkami, řešenými příklady, odkazy na animace.



Shrnutí pojmů 1.1.

Na závěr kapitoly jsou zopakovány hlavní pojmy, které si v ní máte osvojit. Pokud některému z nich ještě nerozumíte, vraťte se k nim ještě jednou.



Otázky 1.1.

Pro ověření, že jste dobře a úplně látku kapitoly zvládli, máte k dispozici několik teoretických otázek.



Úlohy k řešení 1.2.

Protože většina teoretických pojmů tohoto předmětu má bezprostřední význam a využití v databázové praxi, jsou Vám nakonec předkládány i praktické úlohy k řešení. V nich je hlavní význam předmětu a schopnost aplikovat čerstvě nabyté znalosti při řešení reálných situací hlavním cílem předmětu.



KLÍČ K ŘEŠENÍ

Výsledky zadaných příkladů i teoretických otázek výše jsou uvedeny v závěru učebnice v Klíči k řešení. Používejte je až po vlastním vyřešení úloh, jen tak si samokontrolou ověříte, že jste obsah kapitoly skutečně úplně zvládli. Úspěšné a příjemné studium s touto učebnicí Vám přeje autor výukového materiálu – Kamil Wichterle

1. PŘEDMĚT PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat, čím je procesní inženýrství zajímavé
- vysvětlit, čím se procesní inženýrství zabývá

Úkoly procesního inženýrství

Co je proces je nejlépe definováno pomocí nároků patentních úřadů:

Patentovatelný **proces** je postup se zadaným cílem, vyznačený tím, co je na něm nového. A novost musí být založena v tom:

- čím se působí,
- na co se působí,
- jak se působí.

Patentovatelné **zařízení** pak má zadaný úkol, a je vyznačeno tím, co je na něm nového. A novost musí být založena v tom:

- z čeho zařízení sestává.

Procesní inženýrství se zabývá procesy a zařízeními, majícími za cíl přípravu čistých látek, látek nových vlastností, případně přesně definovaných materiálů. Objektem působení je nějaká látka, směs, materiál. Působí se na ně obvykle

- mechanickou energií,
- teplem,
- stykem s další látkou,
- ve zvláštních technologiích také přímo elektrickou energií, magnetizmem, různými formami záření, apod.

Při těchto procesech zpravidla probíhají tři typy operací:

- uvádění látek do styku
- samotné předávání mechanické, tepelné nebo chemické energie
- dělení vzniklé směsi.

Jednoduché operace jako ohřev, chlazení, přemísťování materiálu, dělení a spojování materiálu, a uvádění látek do styku můžeme studovat odděleně. Jakmile však jedna operace samovolně vyvolává druhou a je spojena s dalšími fyzikálními a chemickými změnami, mluvíme o procesu. Některé z těchto operací probíhají jednoduše a samovolně, jiné jsou pracné a zdlouhavé a je úkolem procesního inženýrství porozumět jim a najít racionální postupy pro jejich uskutečnění. V laboratoři používáme mnoha speciálních postupů a pro ně účelně navržených zařízení. Ukazuje se však, že můžeme použít stejných zařízení pro různé technologické procesy (např. kádinku použijeme třeba pro skladování, ohřev, odpařování, rozpouštění, směšování, atd.) a vyrábí se proto řada mnohoúčelových **jednotkových zařízení** (unit apparatus). Také určité činnosti budeme provozovat v určitém typu zařízení s rozmanitými materiály (existují určité podobné problémy např. pro odpařování vody, zkapalněného vzduchu, rtuti nebo chloridu zinečnatého) takže je možno formálně stejným způsobem hodnotit určité postupy, kterým říkáme **jednotkové procesy** (unit operations).

Do určité doby se na procesy a zařízení pohlíželo jako na jednoúčelové součásti konkrétních **technologií**. Koncem 19. století se začalo ukazovat, že je možné podobné procesy nalézt v rozmanitých technologiích a vznikla specializovaná nauka, chemické inženýrství, které vypracovávalo postupy, jak přenášet teoretické i praktické zkušenosti z jedné technologie na druhou a jak přenášet

laboratorní poznatky do velkokapacitních chemických výroby. Dnes převzalo štafetu procesní inženýrství, které zastřešuje i další dříve do jisté doby nezávisle studované procesy speciálních technologií (zpracování potravin, stavebních hmot, plastů, metalurgie, úprava surovin, energetika, technologie vody atd.).

Vědeckým základem procesního inženýrství je fyzikální chemie a některé oblasti fyziky a chemie.

Procesy jsou neodmyslitelné od zařízení, v nichž se daří je úspěšně uskutečnit, takže je účelné znát i mechanické principy a konstrukční zásady, které je třeba dodržet – tedy i něco z inženýrství strojního, materiálového, atd.

Každý proces přináší specifické nároky na investice (cenu budov, zařízení, atd.), na provozní náklady (suroviny, pomocné látky, energii, obsluhu a údržbu), liší se kvalitou (a tedy cenou) produktu, případně množstvím vedlejších produktů, emisí a odpadů. Inženýr musí tedy znát i základní ekonomické pojmy

Tři hladiny otázek procesního inženýrství

Uveďme příklad jednoduchého procesu *rozpouštění 1 kg NaNO₃ v 1 dm³ vody*. Před inženýrem stojí tři následující otázky:

□ Kolik?

Na otázku „Kolik?“ odpovídá **bilance**. Při bilancování používáme nejjednodušších principů zachování (hmoty, energie). Kolik dostaneme směsi? Jakou bude mít teplotu? Mírnou komplikací je, že musíme využívat i přepočítávacích vztahů. K tomu, abychom určili výslednou hmotnost, musíme pomocí známé hustoty (tabulky fyzikálně chemických dat) přepočítat objem vody na hmotnost – *vyjde přibližně 1 kg vody* a **bilance hmotnosti** nám dá prostým součtem *hmotnost směsi 2 kg*. *Protože v případě koncentrovaných roztoků někdy neplatí ani přibližně zachování objemu, o objemu směsi můžeme vyslovit nanejvýš odhad*. Bilance hmotnosti nám však nedá informaci jak směr bude vypadat. Teprve když budeme z odpovědí na další otázky znát **stav** směsi, budeme moci provést **energetickou bilanci** a určit např. výslednou teplotu, která se může lišit od teploty vstupních látek.

□ Kam až?

V daném případě nás zajímá, zda se dusičnan ve vodě vůbec rozpustí a zda se rozpustí úplně. **Fyzikální chemie** (termodynamika a nauka o fázových a chemických rovnováhách) dává podklady k tomu, jak zpracovávat experimentální poznatky tak, aby byly obecně využitelné. Data o rozpustnostech dobře rozpustných látek jsou obvykle tabelována jako množství dané látky v gramech, která se rozpustí ve 100 g vody při zadané teplotě. *Pro NaNO₃ je to 88,3 g při 20°C a 176 g při 100°C. Takže výsledná směs bude při laboratorní teplotě sestávat z 1,883 kg nasyceného roztoku a z 0,117 kg nerozpuštěné soli. Teprve při teplotách nad 35°C se může všechna sůl rozpustit.* Když budeme vědět, jaký bude kvalitativně stav systému na konci – v rovnováze, můžeme se vrátit k energetické bilanci – kolik energie se musí užitečně vynaložit na příslušnou změnu.

□ Jak rychle?

Zatím jsme se nedozvěděli nic o tom, jak rychle se k výslednému stavu bude systém ubírat. Jsou děje, které probíhají tak rychle, že jejich postup můžeme obtížně sledovat, avšak na druhé straně jsou procesy tak pomalé, že se k rovnováze v zajímavé době vůbec nepřiblížíme. Rychlost děje závisí jistě na chemické povaze zpracovávaných látek, ale také závisí na zařízení a způsobu ovlivňování procesu – *v případě rozpouštění soli však přistupuje i velikost zrna soli, způsob a intenzita míchání a ohřevu.* Část těchto otázek se dá zodpovědět na základě teoretických prostředků nauky o nerovnovážných fyzikálních dějích, zprostředkovaných pohybem molekul – o **přenosových jevech** a nauky o průběhu chemických dějů – **chemické kinetice**. Ve složitějších situacích se můžeme opřít jenom o přibližné

analogie, více či méně prověřené zkušenosti. A je to právě **procesní a chemické inženýrství**, které se znalostí jednoduchých procesů fyziky, chemie a fyzikální chemie vytváří návody, jak využít zdánlivě neporovnatelných poznatků při návrhu a provozu složitých průmyslových procesů a obráceně jak využívat provozních zkušeností při rozvíjení základních věd.



Průvodce studiem

K plnění všech úkolů procesní inženýr musí umět využívat širokého spektra informací. Student při výpočtech ve cvičeních i u zkoušky prokazuje především své znalosti a dovednosti a pro informace smí sáhnout na libovolné literární zdroje a zápisky. I když na inženýrskou komunikaci a schopnost spolupráce se musí budoucí inženýr rovněž připravovat, u zkoušky musí převést, že do řešení problému umí vložit vlastní přínos; proto při příležitosti zkoušky komunikaci s dalšími osobami (ani telefonem, ani internetem) nedovolujeme.

Pečliví studenti bývají frustrováni tím, že předmět není přesně ohraničen souborem definic, které by bylo třeba namemorovat a standardních úloh které by stačilo natrénovat.

Bezpodmínečně je nutno ovládat jen několik poměrně jednoduchých postupů, které se probírají ve cvičeních. Zkouška z procesního inženýrství toto minimum přesahuje a je asi první, která také testuje, jak je student – budoucí inženýr připraven na posouzení nového problému a nastínění jeho řešení. K dobrému výsledku je nutno využít kombinačních schopností a komplexu obecných znalostí, zahrnujících i to, co se již měl naučit v matematice, fyzice, fyzikální chemii, chemii a technických předmětech a co odpozoval v běžném životě.

Předkládaný text se snaží být co možno samonosný. Není však okleštěný na soubor jednoduchých fakt, které se snadno učí a snadno zkoušejí, takže kromě základních informací obsahuje i velké množství odboček ke speciálním problémům, které by snad mohly zaujmout zvědavé lepší studenty bakalářského programu. S vybranými problémy a s jejich řešením na poněkud vyšší úrovni se pokračuje v magisterském programu „Chemické inženýrství“.



Další zdroje

Jak bylo naznačeno, procesní inženýrství stojí na mnoha různých teoretických základech a praktických zkušenostech takže bude věčným problémem otázka jak ohraničit učební text. Dostí záleží na koncepci studijního programu. Jinak to vypadá, jde-li o úvod do kursu chemického inženýrství, který má být dále rozvíjen, jinak jde-li o shrnutí poznatků z větší části již probraných pro studenty, kteří mají již důkladný základ ve fyzikální chemii, fyzice, matematice, chemické technologii, strojním a materiálovém inženýrství. Studentovi, který se probírá v literatuře, může připadat jako protivné, že terminologie a symbolika vzorců není zcela ujednocena. Důvod je prostý: některé zvyklosti se přenášejí z teoretických oborů, jiné zase jsou řízeny požadavky uživatelů. Abeceda, i s použitím řeckých písmen, není tak bohatá, aby jedinému pojmu byl přidělen jednoznačný symbol a aby každý symbol měl jednoznačný význam. Student a tím spíše inženýr musí být připraven na to se v tomto zdánlivém zmatku rychle orientovat. Slušností pisatele technických textů (bakalářské a diplomové práce v to počítaje) zase je poskytnout čtenáři úplné a jednoznačné vysvětlení užívaných veličin a vztahů, přinejmenším odkazem na některou klíčovou monografii nebo učebnici.

Tato učební pomůcka vznikla na základě soustavně doplňovaného a upravovaného textu

WICHTERLE K.: Základy procesního inženýrství, volně dostupného na adrese

http://homen.vsb.cz/~wih15/ProcIng/Zakl_Proc_Ing.pdf

Jsou tam i odkazy na anglojazyčné učebnice. Rovněž na klasické učebnice chemického inženýrství v češtině, které však jsou již většinou nedostupné a navíc jsou poněkud zastaralé.

Dnes lze doporučit skripta

ŠNITA D a kol. Chemické inženýrství I. ISBN 80-7080-589-7, 318 stran, VŠCHT Praha 2006 – cena 190 Kč, 2. vydání, ISBN 978-80-7080-002-7, 350 stran. VŠCHT Praha 2007 – cena 196 Kč + DPH

bezplatně dostupné na adrese: <http://vydavatelstvi.vscht.cz/>

Příhodná učebnice ve slovenštině je

BAFRNEC, M., BÁLEŠ, V., LANGFELDER, I., LONGAUER, J. Chemické inžinierstvo I. 440 stran, Malé centrum, Bratislava, 1999 - cena 310 SK

DOJČANSKÝ, J., LONGAUER, J. Chemické inžinierstvo II. 392 stran, Malé centrum, Bratislava, 2000 - cena 310 SK

Znalý inženýr nepoužívá učebnice, ale Perryho příručku, jejíž sedmá modernizace zabírá 2640 stran:

PERRY RH, GREEN DW, MALONEY JO: Perry's Chemical Engineers' Handbook ISBN: 0070498415 , McGraw-Hill Companies, 1997 - existuje také v elektronické verzi (cca 6000 Kč).

K jednotlivým kapitolám oboru existují speciální monografie se záběrem od teorie procesů až po strojní řešení, rozsahem záběru a hloubkou teorie přesahující rámec tohoto kursu. Klíčovými slovy pro širše pojaté práce jsou např.: „proudění, hydromechanické operace, sdílení tepla, separační procesy, difúzní procesy, chemické reaktory“, existují však i už zaměřené monografie na témata jako „destilace, míchání“, aj.

2. BILANCE

2.1. Bilanční schéma



Čas ke studiu: 0,5 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- pojmenovat základní pojmy používané při bilancování



Výklad

Existují takové veličiny, zavedené pro popis přírodních dějů, pro které platí za vymezených okolností zákon zachování a má tedy smysl je sčítat a odčítat – provádět jejich bilanci. Bilancovatelné veličiny patří k veličinám **extenzivním**. V soustavě údajů o **vstupech**, **výstupech**, **vzniku**, **zániku** a **akumulaci** (hromadění) můžeme výpočtem určit kteroukoliv položku tehdy, známe-li dostatečný počet položek ostatních. To je důležité, protože v praxi jen některé položky můžeme nastavit, některé se daří alespoň změřit a o řadě ostatních se můžeme něco dozvědět jen bilančním výpočtem. Někdy dává bilanční výpočet výsledek přesnější, spolehlivější a dosažený levnějším způsobem než může zajistit přímé měření, čehož se využívá při kalibraci měřicích přístrojů.

Bilancovat můžeme veličiny skalární (*např. hmotnosti, objemy, kusy, látková množství, peníze, energie různého druhu*). Při dodržení příslušných matematických pravidel můžeme bilancovat i vektorové veličiny (*např. síly, rychlosti, hybnosti*).

Při bilanci vymezujeme vždy **bilancovanou veličinu**, **bilancovaný systém** a **bilanční období**. Je účelné vyjadřovat bilancovanou veličinu v jedné jednotkách.

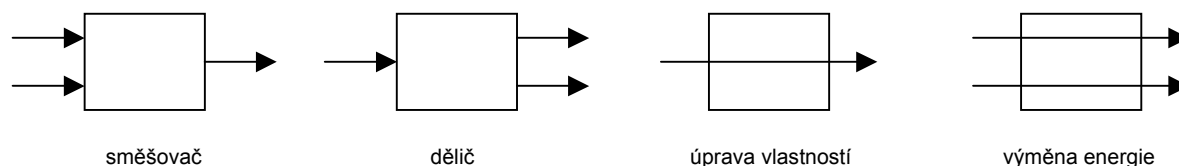
Volba bilancovaného systému je dána účelově a souvisí s otázkami, které si při bilanci klademe. Při cyklických dějích je rozumné za bilanční období volit dobu trvání jednoho cyklu nebo trvání zvoleného celočíselného počtu cyklů.

Při práci na paralelních výrobních linkách bývá zvykem brát za bilancovaný systém jednu linku.

Při kontinuálních dějích je volba bilančního období libovolná. Může to být kterákoliv jednotka času (*sekunda, hodina, směna, měsíc, rok*), avšak často se také volí doba, za kterou se zpracuje určité množství (*třeba 1000 kg*) sledované suroviny nebo za kterou se vyrobí určité množství produktu.

Bilanční schéma

Bilancovaný systém může sestávat z několika uzlů a jejich provázání si znázorníme graficky. Uzly znázorníme třeba zjednodušenou skicou aparátu, ale často vystačíme jen s obdélníčkem. Nejjednodušším uzlem, zajímavým z hlediska bilance hmotnosti, je směšovač nebo dělič proudů, schematicky znázorněný na obr 1,1



Obr. 2.1 Prvky bilančních schémat

Shrnutí všech položek bilance vyjadřuje rovnost

$$akumulace = \text{součet vstupů} + \text{součet vzniků} - \text{součet výstupů} - \text{součet zániků}$$

Většinou se v bilanci vyskytují jen některé z těchto položek. Během **ustáleného děje** nedochází k akumulaci ($akumulace = 0$). Jinak může být akumulace kladná (přírůstek veličiny) i záporná (úbytek). V některých neustálených dějích zase chybí vstupy nebo výstupy. Vznik ani zánik nepřípadá v úvahu, platí-li zachování veličiny, např. při bilanci hmotnosti protože zde platí zákon o zachování hmotnosti. Se vznikem a zánikem hmotnosti se můžeme setkat, bilancujeme-li hmotnost některé specifické formy hmoty.

Např. při tání ledu zaniká pevná fáze a vzniká kapalina a kombinace vzniků a zániků chemických látek je typická pro všechny chemické reakce.

Při provádění bilancí je podstatné, jak systém ohraničit, aby byl co nejjednodušší a umožnil přitom získat požadovanou informaci. Bilanční vztah však platí pro každý prvek bilančního schématu, pro celý systém, i pro jakkoliv ohraničenou skupinu prvků ze schématu.



Pojmy k zapamatování

Bilancovatelné veličiny

Bilanční systém

Bilanční období

Vstupy, výstupy

Akumulace

Vznik, zánik

2.2. Látkové bilance



Čas ke studiu: 6 hodin



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- použít k látkové bilanci hmotnosti, objemy, látková množství
- přepočítávat položky látkové bilance na stejný základ
- převádět vyjádření složení do jednotné formy
- popsat bilanci reaktoru s použitím fiktivních proudů
- zapsat obecně bilanci jednoduchých systémů pro dvousložkovou směs



Výklad

Látkové bilance

Rovnice bilance **hmotnosti** v základních jednotkách je

$$\text{akumulace } /(\text{kg}) = \text{součet vstupů } /(\text{kg}) - \text{součet výstupů } /(\text{kg}).$$

Bilancujeme-li za jednotku času, pak to lze také chápat jako

$$\text{rychlost akumulace } /(\text{kg/s}) = \text{součet přítoků } /(\text{kg/s}) - \text{součet odtoků } /(\text{kg/s}).$$

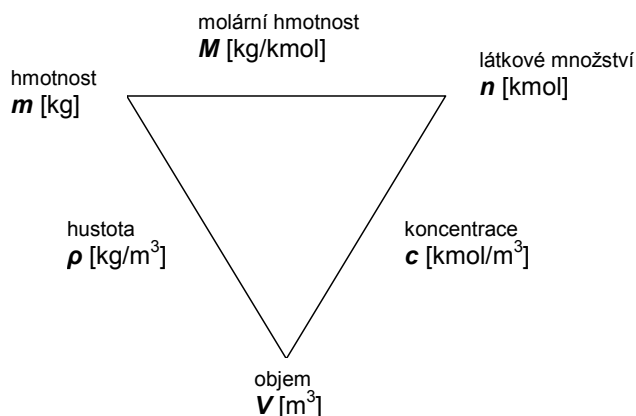
Avšak množství materiálu pohybujícího se v jednotlivých proudech je často z nějakých praktických důvodů vyjadřováno jinak než hmotnostmi:

Počet kusů je nejjednodušší bilanční veličina, pro kterou může platit zachování, jestliže každému kusu můžeme přiřknout stejnou hmotnost (*1 klubko příze = 100g, 1 pytel cementu = 50 kg*). Zvláštní možností je bilancovat počet souborů stejného počtu kusů. *Např. 50 zápalek (=1 krabička), 20 piv (=1 basa), 30 vajec (1 plató), 100 cihel (1 paleta).*

Jednotkou **látkového množství** je soubor $6,02 \cdot 10^{23}$ kusů (=1 mol); byl vybrán tak, že hmotnosti v gramech tohoto souboru atomů běžných chemických prvků jsou malá čísla, a mnohá z nich navíc blízká číslům celým.

Pro **látkové množství** platí zákon zachování v těch případech, kdy nedochází k chemické reakci. Tam, kde k chemické reakci dochází, je vyjádření bilancí pomocí látkového množství zvláště užitečné. Je však nutno modifikovat pravidla, což ukážeme v následujícím odstavci o bilanci chemických reakcí. Doplníme přitom jednoduchá a pevná pravidla **stechiometrie**.

Pro bilancování materiálů chemicky nedefinovaného složení je bilance látkového množství nepoužitelná, protože směsi nelze obvykle přiřadit jednoznačně molární hmotnost.



Obr. 2.2. Vztahy mezi běžnými extenzivními bilančními veličinami pro látkovou bilanci

Látkové množství je však užitečné pro úvahy o plynech, které máme často měřeny objemově a k přepočtu použijeme modelu **ideálního plynu**

$$P V = n R T$$

kde $V / (\text{m}^3)$ je objem, $P / (\text{Pa})$ tlak, $n / (\text{kmol})$ látkové množství, $T / (\text{K})$ absolutní teplota a $R = 8314 \text{ J kmol}^{-1} \text{K}^{-1}$ je univerzální plynová konstanta. Nezávisí to na tom, z jakých molekul jsou ideální plyny složeny! Praktici nahrazují látkové množství při bilancích plynů a plyných směsí veličinou normální objem (např. objem v normálních metrech krychlových je objem přepočítaný na podmínky 273,15 K a 101325 Pa.). Z rovnice ideálního plynu pak dostaneme přepočítávací faktor

$$V_{\text{normální}} = 22,4 \text{ (norm.m}^3/\text{kmol)} \cdot n$$

Starší literatura označuje jednotku normálního objemu jako Nm^3 (dnes se to N může plést s jednotkou Newton), angloamerická literatura píše $(\text{m}^3 \text{ s.t.p.})$ - standard temperature and pressure, v horším případě (cuft s.t.p.) : cubic foot = krychlová stopa = $28,3 \text{ dm}^3$.

Poměr mezi hmotností $m / (\text{kg})$ a látkovým množstvím čisté látky $n / (\text{kmol})$ je vyjádřen **molární hmotností** $M / (\text{kg/kmol})$

$$m = M n .$$

Molární hmotnost je poměrem dvou extenzivních veličin. Sama už je **veličinou intenzivní** – závisí jen na druhu látky ale nezávisí již na jejím množství. Intenzivní veličiny většinou nemá smysl počítat. Sčítáme-li molární hmotnosti (např. prvků při výpočtu molární hmotnosti sloučenin) sčítáme spíše intenzivní veličiny, protože vše vztahujeme na celočíselná látková množství.

Molární hmotnosti čistých látek se dají jednoznačně a nezávisle na stavových proměnných vypočítat z atomových hmotností, uvedených v tabulkách. Několik základních si chemik obvykle pamatuje.

Objem $V / (\text{m}^3)$ je extenzivní geometrickou veličinou, pomocí níž měříme kromě plynů i množství kapalin a není bez zajímavosti ani pro látky pevné. Vztah mezi objemem a hmotností vyjadřuje další intenzivní veličina, **hustota** $\rho / (\text{kg/m}^3)$

$$\rho \equiv m / V$$

Hustota ideálního plynu je podle uvedených vztahů

$$\rho = \frac{M P}{R T}$$

zřetelně tedy závisí na tlaku (přímá úměra) a na teplotě (nepřímá úměra na absolutní teplotě).

Pro čisté látky, důležité směsi a pro běžné materiály jsou hustoty tabelovány. Pamatujeme si přibližně některé základní hustoty:

voda 1000 kg/m^3 , křemen, sklo, horniny 2700 kg/m^3 , ocel 7800 kg/m^3 , rtuť 13500 kg/m^3 . Porovnejme s hustotou vzduchu okolo $1,2 \text{ kg/m}^3$ (při běžném tlaku a teplotě).

Pro kondenzovanou fázi (kapaliny, pevné látky) je hustota prakticky nezávislá na tlaku. Malé změny hustoty s teplotou jsou v některých problémech zanedbatelné. Většina materiálů zmenšuje hustotu s rostoucí teplotou, výjimky mohou být tam, kde se mění molekulární struktura a to je např. u vody v oblasti mezi 0 a 4°C . I malé změny hustoty jsou důležité, pokud o procesu rozhodují rozdíly hustot: teplotní roztažnost – měření teploty (*co se u běžného teploměru rozepíná více: rtuť nebo sklo?*), vliv roztažnosti na mechanické deformace těles, vliv změn hustoty tekutin na vznik samovolného přirozeného proudění (*komínový tah, mořské proudy, vítr*).

Koncentrace je obecný pojem pro veličiny, udávající množství sledované složky ve směsi. **Molární koncentrace** $c / (\text{kmol/m}^3)$,

$$c \equiv n / V .$$

je jedním z možných konkrétních vyjádření koncentrace; pro jednosložkovou látku udává kolik dané látky $/ (\text{kmol})$ je obsaženo v jednotce objemu $/ (\text{m}^3)$,

Směsi

Jestliže je nějaký proud v bilančním systému složen z více **složek**, pak můžeme bilancovat každou z jeho složek. Zastoupení složek ve směsi – **složení (koncentraci) směsi** – vyjadřujeme zpravidla některou z intenzivních veličin, definovaných jako:

- poměr množství dané složky k množství směsi nebo
- poměr množství dané složky k množství jiné vybrané složky

Přitom množství může být vyjádřeno hmotností, látkovým množstvím, kusy, nebo objemem. Volba tohoto vyjádření je poměrně volná a vychází nejčastěji z toho,

- **jak byla směs připravena** (*hrnek kávy se dvěma kostkami cukru, malta ze čtyř objemových dílů písku, jednoho dílu vápna a přiměřeného množství vody, nasycený roztok chloridu draselného, koncentrovaná kyselina sírová 98% hm., syntézní směs H_2 a N_2 v molárním poměru 3:1, paštika ze slavičích jazýčků míchaných 1:1 s hovězím masem (na 1 jazýček 1 kráva),...*)
- **jakým způsobem se složení stanovuje** (*moly dané látky na 1 dm³ kapalné směsi, gramy dané složky na 1 kg tuhé směsi, ppm uhlovodíků ve vzduchu, promile alkoholu v krvi, g kyslíku na odbourání nečistot z 1 l vody, procento tuku v sušině syra, množství vlhkosti vztažené na celý vzorek, množství vlhkosti vztažené na sušinu,...*)
- **k čemu koncentrační údaj potřebujeme:**
- pro inženýrské výpočty se snažíme obvykle převést údaje o složení do **jednotné formy** a vyjádřit je nejraději jako hmotnostní, molární nebo objemový zlomek (nebo %) celku. Někdy je účelnější vztáhnout hmotnostní, molární nebo objemový údaj k množství snadno bilancovatelné látky, pro niž platí v určitém smyslu zákona zachování – např. molarita (počet kilomolů aktivní složky na m³ roztoku) pro odměrnou analýzu. Jindy je užitečnější vztáhnout to na množství klíčové složky, procházející procesem beze změn a snadno měřitelné (*kg vlhkosti na kg suchého vzduchu*).
- výsledky někdy zpětně převádíme na vyjádření užitečné tím, že je pro daný obor **dohodnuté zvyky nebo kodifikované normami** (*obsah vodorozpuštěného fosforu v hnojivech přepočtený na hmotnostní % P_2O_5 , objemové % alkoholu v lihovině, ...*)

Převod z jednoho typu vyjádření složení na jiný lze vyjádřit pomocí jednoduchých vzorečků. Výběr toho správného z nich je tou součástí bilančních výpočtů, ve kterých se nejsnáze udělá chyba a studentovi nebývá platné, naučí-li se vzorečků desítky a bude je používat zcela nahodile. Rozumnější přístup je nacvičit si selskou úvahu, kterou pro každý zvláštní případ správný vztah jednoduše odvodíme. Dobrou kontrolou je připisovat si k jednotlivým veličinám rozměr, případně i s udáním intenzivních veličin, *např. veličiny: (počet jablek/1 bednička), (kg hmotnosti jablek/1bednička) nám umožní vypočítat (průměrný počet jablek/1 kg) nebo (průměrná hmotnost kg /1 jablko), (kg shnilých jablek/kg dobrých jablek), (kg dobrých jablek/kg všech jablek)* a u příslušných zlomků nám vždy musejí hrát dohromady i rozměry. Nejobvyklejší rozměry připisujeme v této práci často k veličinám do závorky za lomítkem formou:

veličina / (rozměr) , např.: hmotnost m / (kg) .

To, aby matematické vzorce byly rozměry v pořádku, i když použijeme pojmenovaných čísel (připojíme k nim i příslušné jednotky), je podmínkou nutnou; bohužel to není podmínkou postačující. Hodí se to však k průběžné první kontrole našich úvah.

Reaktory, vznik a zánik bilancované veličiny, fiktivní bilanční proudy

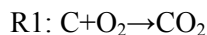
Zvláštním případem v bilancích jsou situace, kdy nás zajímá jen jistá forma bilancované veličiny, pak je možné, že tato forma v bilančním systému zaniká nebo vzniká (*např. z vejce se vylihne kuře, ze*

zanikajícího vápence vzniká oxid uhličitý a oxid vápenatý). V takovém případě pro danou veličinu neplatí zákony zachování. Abychom mohli zjednodušit bilanční schéma na jednodušší vztah

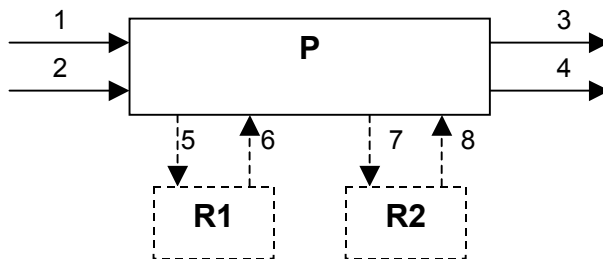
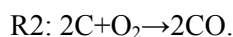
$$\text{akumulace} = \text{součet vstupů} - \text{součet výstupů}$$

nahrazujeme **vznik a zánik** přídavnými vstupními a výstupními **fiktivní proudy**, řídící se přesnými pravidly. Každé chemické reakci přičteme nový blok a takovou dvojici.

Například: k peci P, ve které je spalován koks, přidáme jednu dvojici proudů k reakci



a jednu k reakci



Obr. 2.3. Schéma bilance pece se zakreslením fiktivních proudů

Bilanční schéma je pak znázorněno na Obr.

2.3. , ve kterém 1 je vstup koksu, 2 je vstup vzduchu, 3 je výstup spalín, 4 je výstup nespáleného zbytku (nedopal, popel) a fiktivní proudy 5-8 jsou vyznačeny čárkovaně

Kdybychom bilancovali fiktivní proudy v látkových množstvích, tak platí jednoduché stechiometrické vztahy: proudem 5 odchází $n_{5,C}$ kmolů uhlíku a současně $n_{5,O_2} = n_{5,C}$ kmolů kyslíku a proudem 6 se vrací $n_{6,CO_2} = n_{5,C}$ kmolů oxidu uhličitého. Podobně proudem 7 odchází $n_{7,C}$ kmolů uhlíku a současně $n_{7,O_2} = \frac{1}{2} n_{7,C}$ kmolů kyslíku a proudem 8 se vrací $n_{8,CO} = n_{7,C}$ kmolů oxidu uhelnatého. (zápornými proudy do uvedených reakcí můžeme popsat i reakce vratné a kombinací i další reakce, třeba $C + CO_2 \rightarrow 2CO$)

Často bilancujeme vše v hmotnostech; pak lze s použitím molárních hmotností přepočítat fiktivní proudy takže když proudem 5 odchází $m_{5,C}$ kg uhlíku, odchází současně $m_{5,O_2} = m_{5,C} M_{O_2}/M_C$ kg kyslíku a proudem 6 se vrací $m_{6,CO_2} = m_{5,C} M_{CO_2}/M_C$ kg oxidu uhličitého. Podobně proudem 7 odchází $m_{7,C}$ kg uhlíku a současně $m_{7,O_2} = m_{7,C} M_{O_2}/(2M_C)$ kg kyslíku a proudem 8 se vrací $m_{8,CO} = m_{5,C} M_{CO}/M_C$ kg oxidu uhelnatého.

Fiktivními proudy se nepohybuje žádná ze složek, které v dané reakci nevystupují – zde například dusík ze vzduchu nebo popelovina z koksu.

Když využijeme pojmy fiktivních toků, pak pro uzel P platí, že vstupy jsou proudy 1,2,6,8 a výstupy jsou 3,4,5,7 a žádnou reakcí se již nemusíme zabývat.

Formální pravidla bilance

Velká část takzvaných slovních úloh ve školské matematice je založena na počítání bilancí při jednoduchém spojování a dělení proudů bilancovatelných veličin. Zručný student rychle najde úvahu, jak převést zadání na soustavu matematických formulí a jak je buďto postupně nebo souhrnně vyřešit. Je přitom možno používat různé důmyslné triky; v případě chemického procesu něco počítat v objemech, něco v látkových množstvích, něco ve hmotnostech, a přepočítávat tyto veličiny jen v minimální míře. Běžné technologie sestávají z většího počtu zařízení, které je možno chápat jako směšovače, děliče a chemické reaktory, takže je nutno sledovat desítky až stovky proudů. Pak individuální přístup by byl nepřehledný a je vhodné formalizovat bilance zvoleným jednotným způsobem. Jeden z poměrně osvědčených postupů lze rozepsat následujícím způsobem:

- 1) Zakreslíme bilanční schéma procesu, kde jednotlivé aparáty buďto zjednodušeně naznačíme, nebo jenom znázorníme bloky. Vyznačíme proudy, kterými se látky pohybují.
- 2) Probíhají-li v systému reakce, zapíšeme příslušné stechiometrické rovnice. Pro každou reakci připojíme k danému reaktoru dvojici fiktivní výstup a vstup.

- 3) Aparáty i proudy označíme jednoduchými symboly (u aparátů obvykle alfanumerická skupina, u proudů obvykle spíše jen číslo).
- 4) Provedeme soupis všech složek, případně skupin složek, vystupujících v bilanci společně (suchý vzduch můžeme třeba brát jako jedinou skupinu třeba v procesu sušení, při spalování musíme odděleně bilancovat kyslík, ale společně stále můžeme stále brát zbývající inertní plyny, při destilaci kapalného vzduchu se i argon od dusíku musí odlišit, atd.). Je užitečné proudy a jejich složky zapsat jako tabulku.
- 5) Sepíšeme všechny zadané hodnoty. (U výše probírané pece například zadáme, že dodáváme přebytek 15% vzduchu (základ 100% je množství potřebné na úplné spálení na CO₂) a tudíž ve spalínách nebude CO)
- 6) Sepíšeme matematickými výrazy všechny známé vztahy mezi veličinami.
- 7) Zvolíme bilancovanou veličinu; zpravidla hmotnost jednotlivých složek. Výjimečně při práci s čistými látkami (některé reaktory, destilační procesy,...) volíme látková množství. Pro plynné soustavy za podmínek ideálního plynu to může být i tzv. normální objem plynu (objem přepočtený na normální podmínky).
- 8) Přepočteme všechny hodnoty a vztahy na tento jednotný základ bilancování.
- 9) Bilanční vztahy jsou takto převedeny na soustavu rovnic, která by měla být jednoznačně řešitelná a nepřeurčená. Vhodným seskupením lze zpravidla rozdělit úlohu na dílčí jednoduché kroky a dostat se k menším přehlednějším soustavám rovnic, které lze řešit postupně. Pro řešení složitějších bilančních systémů je vhodné použít simulační programy, které jsou schopny řadu kroků provést automaticky.

Na VŠB TUO je k dispozici systém simulačních programů ASPEN, zvládající i zpracování řady dílčích fyzikálně-chemických a chemicko-inženýrských problémů na základě zabudovaných databází.

Simulace procesů

Účelem provádění bilance je dopočítání vlastností neznámých proudů, u kterých by měření průtoků a složení bylo obtížné a nákladné. Můžeme také vypočítat to, jak by se provoz choval, kdybychom měnili různým způsobem vstupní parametry i mimo běžné meze. Tomu říkáme matematická simulace procesu. Můžeme tak dopočítat tzv. parametrickou citlivost procesu dy/dx_i – jak se změna některé vstupní veličiny x_i projeví na hodnotě důležité výstupní veličiny y . Takováto simulace často najde skryté rezervy procesu a ukáže možnosti, kde se dá proces dílčími úpravami zefektivnit.

Simulovat je možno i krizové situace – předvídat co se stane v případě nezvyklé skutečnosti – při výpadku elektřiny, poruše čerpadla, prasknutí potrubí, apod. – v těchto případech musíme i v provozu, navrženém jako kontinuálním, počítat s akumulací, z této simulace se ukáže, kde je užitečné doplnit pomocná potrubí, čerpadla, zásobníky, jak připravit obsluhu na neobvyklé situace a jaké dát pokyny pro jejich řešení.

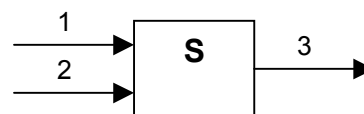
Bilance hmotnosti ve směsích s použitím hmotnostních zlomků

□ Dvousložkové směsi

Ve dvousložkové směsi je v bilančním proudě m_i obsažena hmotnost m_{iA} složky A a m_{iB} složky B.

Hmotnostní zlomek látky A v proudě m_i označíme jako x_A a platí

$$x_{iA} = \frac{m_{iA}}{m_i}, \quad x_{iB} = \frac{m_{iB}}{m_i}, \quad x_{iA} + x_{iB} = 1$$



Obr. 2.4. Směšovač

□ Směšovač

Směšováním (Obr. 2.4.) proudů 1 a 2 v kontinuálním ději (bez akumulace) vznikne proud 3 a platí

$$m_1 + m_2 = m_3$$

$$m_{1A} + m_{2A} = m_{3A}$$

$$m_{1B} + m_{2B} = m_{3B}$$

$$m_1 x_{1A} + m_2 x_{2A} = m_3 x_{3A}$$

$$m_1 x_{1B} + m_2 x_{2B} = m_3 x_{3B}$$

$$x_{1A} + x_{1B} = 1$$

$$x_{2A} + x_{2B} = 1$$

$$x_{3A} + x_{3B} = 1$$

Zdálo by se, že těchto rovnic je více, než potřebujeme. Ale některé z těchto rovnic se dají odvodit z rovnic ostatních, rovnice nejsou nezávislé a proto nepřinášejí novou informaci.

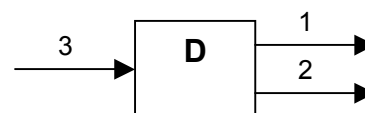
Obdobné vztahy bychom dostali i kdyby do směšovače vstupovalo více proudů anebo více složek.

□ Dělič

Dělením (Obr. 2.5.) dvousložkového proudu 3 v kontinuálním ději (bez akumulace) vzniknou proudy 1 a 2 a platí stejná soustava rovnic jako u směšovače. Postupujeme-li od známých vstupů m_3 , x_{3A} k neznámým výstupům, je třeba nějaká další dvě doplňující informace, podle jakého klíče se proudy rozdělí.

Jsou následující možnosti, které závisejí na technice dělení:

- odvětvení jednoho známého proudu, m_1 při stejném složení proudů $x_{1A} = x_{2A} = x_{3A}$,
- proporcionální dělení proudů 1 a 2 ve známém poměru m_1/m_2 při stejném složení proudů $x_{1A} = x_{2A} = x_{3A}$,
- zadaná složení x_{1A} , x_{2A} ,
- zadaný vztah složení $x_{1A} = f(x_{2A})$,
- jeden zadaný tok na výstupu m_1 a jedno složení buďto x_{1A} nebo x_{2A} .

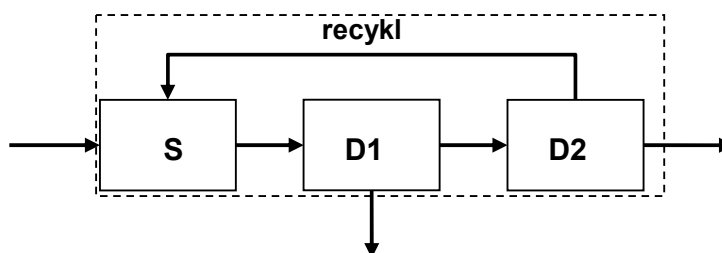


Obr. 2.5. Dělič

□ Zpětný proud - recykl

Velmi často se stává, že oddělení produktu ze směsi není dokonalé a zbytek je účelné vrátit k dalšímu přepracování. Tím vytváříme

zpětný proud, krátce označovaný jako **recykl**. V jednoduchém případě může vzniknout bilanční schéma, znázorněné na obr.2.6. Při bilančních výpočtech soustav s recyklem je výhodné vzít jako jeden bilanční blok také celou skupinu aparátů. Na obr. 2.6. je to konkrétně jeden dělič (ohrazený čárkovanou čarou), sestávající z bloků S, D1, D2. Avšak k určení vnitřních proudů mezi těmito bloky musíme současně zpracovávat také bilanční rovnice pro všechny vnitřní bloky soustavy. To se dále komplikuje, existuje-li ve velké sestavě více propletených zpětných proudů. Zařízení s recyklem mohou značně z hospodárnit kontinuálně běžící výrobní procesy. Jakákoliv změna vstupního proudu se na výstupu ze soustavy s recyklem projevuje pomaleji než v zařízení s jednosměrným tokem látek. To, podobně jako podélné promíchávání, vyhladí v produktu případné kolísání vstupního proudu, ale tím také znesnadní diagnostikovat čím je způsobena nějaká porucha ve výstupním proudu. Nevýhodou je složitý způsob odstavování procesu a pomalý náběh soustavy po odstávce.



Obr. 2.6 Systém s recyklem

Bilance energie

Rovněž energie je vázána na hmotnost a platí zákony pro její zachování. Za určitých podmínek, známých z fyziky nemění se **mechanická energie** těles výrazně na tepelnou a můžeme bilancovat

samotnou energii mechanickou (**kinetickou a potenciální**). Pro tekutiny musíme někdy uvažovat ještě s energií **objemovou**. (Tím se budeme detailněji zabývat v kapitole o proudění.) **Termodynamika** doplňuje zákonitosti přeměny mechanické energie na teplo a obráceně. Naštěstí zase u termodynamických úvah můžeme zanedbat vlivy energie kinetické a potenciální. (Tím se budeme detailněji zabývat v kapitolách o sdílení tepla, změnách fáze a o destilaci.) Přidání chemické reakce zpracovává **chemická termodynamika** a vytváří prostředky, jak zde zákony o zachování energie bezchybně interpretovat.

Bilance tepla používá speciálně definované energetické veličiny jakými je **vnitřní energie** a **enthalpie**. Chemická termodynamika z praktických důvodů tabeluje a počítá tyto veličiny jako intenzivní hodnoty, vztažené na látkové množství, nejčastěji v jednotkách kJ/mol (ve starších tabulkách kcal/mol). Avšak v technologických výpočtech je výhodnější vztahovat energii na jednotku hmotnosti materiálu. Aby nedošlo k mýlce, držíme se pravidla, že zde označujeme například enthalpii jednotky hmotnosti jako h (J/kg); termodynamice ponecháme obvyklé H (J/mol).

Za předpokladu, že nás například zajímá enthalpická bilance směšovače, platí

$$m_1 h_1 + m_2 h_2 = m_3 h_3,$$

$$n_1 H_1 + n_2 H_2 = n_3 H_3.$$

Samozřejmě, příslušné vztahy můžeme jednoduše odvodit i pro ostatní typy bilančních uzlů bez akumulace.

Podobně můžeme nakládat i s dalšími bilancovatelnými veličinami, vázanými na hmotnost (jako například cena materiálu).



Pojmy k zapamatování

Látkové bilance

Intenzivní veličiny—zde: hmotnost, počet kusů (látkové množství), objem

Extenzivní veličiny – zde: hustota, koncentrace, molární hmotnost

Směšovač, dělič, recykl



Příklady

Příklad 2.1.

Bilance bez chemické reakce

Do krystalizační nádoby bylo přivedeno 5000 kg horkého roztoku o koncentraci 31 hm.% Na_2CO_3 . Po ochlazení na 20°C vykrystalizuje $\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 10\text{H}_2\text{O}$. Rozpustnost při této teplotě je 21 dílů bezvodého uhlíčitanu sodného na 100 dílů vody. Voda, která se během krystalizace vypaří, tvoří 5 hm.% původní hmotnosti roztoku. Jaké je množství krystalů uhlíčitanu sodného?

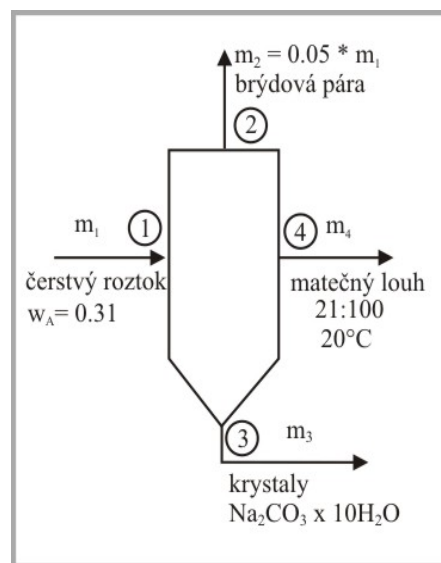
Řešení:

Ze zadání vyplývá, že se jedná o systém bez chemické reakce se dvěma složkami (Na_2CO_3 a H_2O). Za základ výpočtu zvolíme hmotnost vstupního proudu. Budeme tedy bilancovat hmotnosti. Složení jednotlivých proudů je tedy nutné vyjádřit v hmotnostních zlomcích.

Shrnutí: bilance bez chemické reakce

Složky: A – Na_2CO_3

B – H_2O



Veličiny: $m_1 = 5000 \text{ kg}$, $w_{A1} = 0.31$, rozpustnost A při 20°C : 21 dílů A ku 100 dílům B , odpar 5% ze vstupu, krystaly $\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 10 \text{ H}_2\text{O}$, $M_A = 106 \text{ g/mol}$, $M_B = 18 \text{ g/mol}$.

Hledáme: m_3

Přepočet na společné jednotky:

Bilance bez chemické reakce

Složení matečného louhu:

$$w_{A4} = m_{A4}/(m_{A4}+m_{B4}) = 21/(21+100) = \underline{0.1736}$$

$$w_{B4} = 1 - w_{A4} = 1 - 0.1736 = \underline{0.8264}$$

Složení krystalů:

$$x_{A3} = n_{A3}/(n_{A3} + n_{B3}) = 1/(1+10) = \underline{1/11}$$

$$x_{B3} = 1 - x_{A3} = 1 - 1/11 = \underline{10/11}$$

přepočet na hmotnostní zlomky:

$$w_{A3} = x_{A3} * M_A / (x_{A3} * M_A + x_{B3} * M_B) = 1/11 * 106 / (1/11 * 106 + 10/11 * 18) = \underline{0.3706}$$

$$w_{B3} = 1 - w_{A3} = 1 - 0.3706 = \underline{0.6294}$$

Matice zadání:

proud	m_i [kg]	w_A	w_B
1	5000	0.31	0.69
2	m_2	0	1
3	m_3	0.37	0.63
4	m_4	0.17	0.83

Bilanční rovnice:

celková $m_1 = m_2 + m_3 + m_4$

složková A $m_1 * w_{A1} = m_3 * w_{A3} + m_4 * w_{A4}$

složková B $m_1 * w_{B1} = m_2 + m_3 * w_{B3} + m_4 * w_{B4}$

odpar $m_2 = 0.05 * m_1 = 0.05 * 5000 = \underline{250 \text{ kg}}$

Dosadíme m_2 do složkových rovnic a řešíme soustavu dvou lineárních rovnic o dvou neznámých. Kontrolu řešení provedeme dosazením do celkové bilanční rovnice.

$$5000 * 0.31 = m_3 * 0.37 + m_4 * 0.17$$

$$5000 * 0.69 = m_3 * 0.63 + m_4 * 0.83$$

$$m_3 = \underline{1056.5 \text{ kg}}$$

$$m_4 = \underline{3693.5 \text{ kg}}$$

Kontrola:

$$m_1 = m_2 + m_3 + m_4$$

$$5000 = 250 + 1056.5 + 3693.5$$

$$\underline{5000 = 5000}$$

Odpověď:

Za daných podmínek vykrystalizuje 3693.5 kg dekahydrátu uhličitanu sodného.

Příklad 2.2.

Bilance s chemickou reakcí

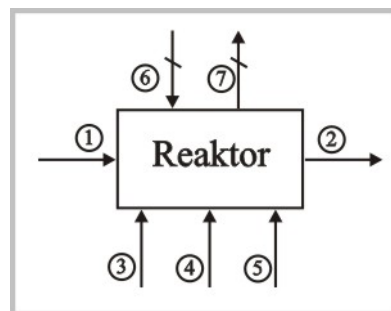
Př. 2: Z 1200 kg směsi kyselin o složení 68 hm.% H_2SO_4 , 22 hm.% HNO_3 , 10 hm.% H_2O je třeba připravit 2000 kg nitrační směsi o složení 63 hm.% H_2SO_4 , 28 hm.% HNO_3 , a 9 hm.% H_2O . K tomu se má použít 82 % HNO_3 , 92 % H_2SO_4 a 20 % olea. Oleum o koncentraci 20 hmot % obsahuje 80 hm.% H_2SO_4 a 20 hm.% SO_3 . Jaká bude spotřeba koncentrovaných kyselin a olea?

Řešení:

Shrnutí: bilanci s chemickou reakcí: $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$

Složky: A – H_2SO_4 , $M_A = 98 \text{ g/mol}$
 B – HNO_3 , $M_B = 63 \text{ g/mol}$
 C – H_2O , $M_C = 18 \text{ g/mol}$
 D – SO_3 , $M_D = 80 \text{ g/mol}$

Specifikace proudů:



1. 1200 kg, $w_{A1} = 0.68$, $w_{B1} = 0.22$, $w_{C1} = 0.10$
2. 2000 kg, $w_{A2} = 0.63$, $w_{B2} = 0.28$, $w_{C2} = 0.9$
3. $w_{B3} = 0.82$
4. $w_{A4} = 0.80$, $w_{D4} = 0.20$
5. $w_{A5} = 0.92$
6. $x_{A6} = 1$
7. $x_{C7} = 0.5$, $x_{D7} = 0.5$, molární zlomky přepočítáme na zlomky hmotnostní
 $w_{C7} = x_{C7} * M_C / (x_{C7} * M_C + x_{D7} * M_D) = 0.5 * 18 / (0.5 * 18 + 0.5 * 80) = \underline{0.184}$
 $w_{D7} = 1 - w_{C7} = 1 - 0.1837 = \underline{0.816}$

Bilance s chemickou reakcí

Matice zadání:

Proud	m [kg]	w_A	w_B	w_C	w_D
1	1200	0.68	0.22	0.1	0
2	2000	0.63	0.28	0.09	0
3	m_3	0	0.82	0.18	0
4	m_4	0.8	0	0	0.2
5	m_5	0.92	0	0.08	0
6	m_6	1	0	0	0
7	m_7	0	0	0.184	0.816

Bilanční rovnice:celková $m_1 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 = m_2 + m_7$ složková A $m_1 * w_{A1} + m_4 * w_{A4} + m_5 * w_{A5} + m_6 = m_2 * w_{A2}$ složková B $m_1 * w_{B1} + m_3 * w_{B3} = m_2 * w_{B2}$ složková C $m_1 * w_{C1} + m_3 * w_{C3} + m_5 * w_{C5} = m_2 * w_{C2} + m_7 * w_{C7}$ složková D $m_4 * w_{D4} = m_7 * w_{D7}$ doplňková $m_6 = m_7$

Řešíme soustavu pěti rovnic (4 složkové a 1 doplňková) o pěti neznámých, kontrolu výpočtu provedeme dosazením do celkové bilance.

$$1200 * 0.68 + m_4 * 0.8 + m_5 * 0.92 + m_6 = 2000 * 0.63$$

$$1200 * 0.22 + m_3 * 0.82 = 2000 * 0.28$$

$$1200 * 0.1 + m_3 * 0.18 + m_5 * 0.08 = 2000 * 0.09 + m_7 * 0.184$$

$$m_4 * 0.2 = m_7 * 0.816$$

$$m_6 = m_7$$

$$m_3 = \underline{360.98 \text{ kg}}$$

$$m_4 = \underline{320.78 \text{ kg}}$$

$$m_5 = \underline{118.24 \text{ kg}}$$

$$m_6 = \underline{78.59 \text{ kg}}$$

$$m_7 = \underline{78.59 \text{ kg}}$$

Kontrola:

$$m_1 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 = m_2 + m_7$$

$$1200 + 360.98 + 320.78 + 118.24 + 78.59 = 2000 + 78.59$$

$$2078.59 = 2078.59$$

Odpověď:

Za daných podmínek bude spotřeba koncentrovaných kyselin a olea následující:

Oleum 320.12 kg, Kyselina sírová 118.3 kg, Kyselina dusičná 360.98 kg.

3. HYDROMECHANICKÉ OPERACE

3.1. Mechanika tekutin



Čas ke studiu: 5 hodin



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- rozlišovat pojmy tekutina, kapalina, plyn, tekuté směsi
- bilancovat průtok kapaliny s použitím rovnice kontinuity
- bilancovat energii kapaliny s použitím Bernoulliho rovnice
- znát definici viskozity a úlohu vlivu viskozity v bilanci energie kapalin
- vyjadřovat relativní významnost různých vlivů pomocí bezrozměrných veličin



Výklad

Mechanika tekutin

Pod pojem **tekutina** budeme bezvýhradně zahrnovat jednofázové tekutiny – tedy **kapaliny** a **plyny**, za jistých okolností můžeme k tekutinám přiřadit i vícefázové směsi jakými jsou suspenze, emulze, krémy, kaše, pěny apod.

Ve fyzice, konkrétně v mechanice hmotného bodu jsme pracovali s pojmy hmotnost, rychlost, zrychlení, tíže, hybnost, síla, mechanická práce, kinetická a potenciální energie, výkon.

Ve fyzikální chemii jsme používali pojmy, vztahující se k chování látek, z nichž zde připomeňme ideální plyn, ideální kapalinu, objem, tlak, hustotu, objemovou práci, vnitřní energii, viskozitu.

Spojité prostředí

Vlastnosti hmoty, vyplňující prostor, se snažíme vyjadřovat pomocí intenzivních veličin, tj. veličin vyjadřujících vlastnosti hmoty přiřítané bodům prostoru, což jsou průměrné vlastnosti jednotkového objemu obklopujícího ve studovaném časovém intervalu zvolený bod. Představa hmoty jako spojitého prostředí, s vlastnostmi spojitě se měnícími v prostoru a čase, umožňuje použít pro její popis běžných prostředků matematické analýzy. (Právě pro tyto účely vymysleli Leibnitz a Newton diferenciální a integrální počet.)

Hmotnost m /(kg), látek je za neměnných podmínek úměrná **objemu** V /(m³). Zavádíme intenzivní veličinu nazvanou **hustota** a definovanou podílem

$$\rho = \frac{m}{V} \quad /(\text{kg m}^{-3})$$

Hustota kapalin a pevných látek je zhruba konstantní a je pro čisté látky a běžné materiály tabelována. V případech, kdy nás zajímají i malé změny hustoty (při volné konvekci), hraje zde roli teplotní závislost. Zpravidla se objem daného množství kapaliny s růstem teploty mírně zvětšuje, tedy hustota kapaliny s rostoucí teplotou mírně klesá (k málo výjimkám patří voda mezi 0 a 4°C). U plynů je hustota závislá na teplotě a tlaku výrazně,

$$\rho = \frac{n M}{V} = \frac{P M}{z R T} \quad /(\text{kg m}^{-3})$$

Zde n je **látkové množství** /(kmol), M je **molární hmotnost** plynu /(kg/kmol), P je **tlak** /(Pa), T je **absolutní teplota** /(K) a $R = 8314 \text{ J/(kmol K)}$ je **univerzální plynová konstanta**.

Pro odhad zpravidla vystačíme se stavovou rovnicí **ideálního plynu**, v níž **kompresibilitní faktor** $z=1$. Hustota se dá také vypočítat pro směsi plynů, protože pro ideální plyny platí pravidlo o zachování objemu. Pro vzduch za běžných podmínek je zhruba $\rho = 1,2 \text{ kg m}^{-3}$. Zato směsi mísitelných kapalin zpravidla zaujmají menší objem než kapaliny oddělené, takže bychom představou o zachování objemu učinili větší chybu, zejména u slitin kovů nebo u kapalin s molekulami vytvářejícími mezi sebou vazby (např. vodíkovými můstky).

Rychlost hmotného bodu $= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\text{změna polohy} / \text{změna času})$, základní jednotka /(m/s). Rychlost kapaliny je vektor, který se odvozuje od objemu kapaliny, prošlého orientovanou jednotkovou plochou za jednotkovou dobu, přičemž tato jednotky se volí dostatečně malé, aby se vystihly změny rychlosti, které nás zajímají a aby byly potlačeny projevy dějů, které nás v daném okamžiku nezajímají. Zajímá-li nás pohyb lodi po řece, nebudeme přihlížet k drobným vírům, ovlivňujícím pohyb malých objektů. Zajímá-li nás povaha těchto vírů (turbulence), nebudeme asi přihlížet k nepatrným pohybům, patřícím k Brownovu pohybu. Při toku nějakým potrubím nebo korytem nás obvykle zajímá především zprůměrněná **střední rychlost** u , patřící k danému průřezu potrubí, vypočtená jako podíl objemového průtoku V a tohoto průtočného průřezu S .

Hydrostatika

U hmotného bodu pracujeme jen se dvěma formami mechanické energie – **potenciální** $m g h$ a **kinetickou** $\frac{1}{2} m u^2$. U tekutiny přistupuje i **objemová** energie $p V$.

(Ve zvláštních případech, např. tehdy když se významně mění tvar a velikost zakřivené mezifázové plochy, musí se počítat i s energií povrchovou.)

Celková mechanická energie E , jejíž základní jednotkou je $1 \text{ J} \equiv 1 \text{ N m} \equiv 1 \text{ W s} \equiv 1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$, je

$$E = m g h + \frac{1}{2} m u^2 + p V$$

kde h je výška nad vhodně zvolenou geodetickou úrovní, tlak p vztahujeme k nule nebo k nějakému dohodnutému tlaku (často je to tlak barometrický). Vydělíme-li celý výraz objemem V , dostaneme mechanickou energii vztahovanou na jednotkový objem

$$e \equiv E/V = \rho g h + \frac{1}{2} \rho u^2 + p$$

Rozměr veličiny e je stejný jako rozměr tlaku, $1 \text{ Pa} \equiv 1 \text{ N m}^{-2} \equiv 1 \text{ J m}^{-3} \equiv 1 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$.

Zaujímá-li tekutina v klidu nějaký spojitý prostor, pak ve všech bodech tohoto prostoru má mechanická energie e stejnou úroveň. Protože nedochází k proudění, můžeme tedy klidový stav charakterizovat platností vztahu

$$\rho g h + p = \text{konst.}$$

To je základní rovnice hydrostatiky, platící pro tekutinu v gravitačním poli.

Tlak p se dá měřit tlakoměry (manometry, barometry) různých konstrukcí. U kapalinového tlakoměru užíváme tlakoměrné tekutiny o známé hustotě a sledujeme v průhledné trubici výšku, do které vystoupí tato kapalina do prostoru o známém tlaku. U manometrů stanovujeme sílu, kterou působí tekutina na píst nebo na pružnou stěnu. Mnoho manometrů neměří **tlak absolutní** nýbrž jen **rozdíl tlaku** mezi soustavou a okolním prostředím; pak mluvíme o **přetlaku** nebo **podtlaku**. Absolutní tlak v kapalinách a plynech je však vždy nezáporný!

Za standardní tlak byl kdysi vybrán tlak atmosférický, který je v nížinách běžně $100\,000 \pm 3\,000 \text{ Pa}$ a výrazně klesá s nadmořskou výškou. Fyzikální chemici si kdysi vybrali pro měření a tabelaci hodnot tlak, kterým v zemském gravitačním poli působí na podložku sloupec 760 mm rtuti, nad nímž je vakuum; dnes je takto zvolená standardní hodnota tlaku přepočtena na pevnou hodnotu $101\,325 \text{ Pa}$.

Posuďte:

Hodnoty tlaku v pneumatikách, v tlakových nádobách, ve vodovodním potrubí.

Jaký je tlak v plicích potápěče. Dusík, kyslík, helium.

Tlak vzduchu, přepočítaný na hladinu moře.

Změna tlaku vzduchu v budově.

Tlak na Lysé hoře, Himaláje

Bilance hmoty pro tekutinu v pohybu

Jestliže v tekutině existují oblasti, v nichž je hodnota součtu $\rho gh + p$ různá, začne probíhat samovolný proces, při němž se tyto hodnoty snaží vyrovnávat. Zpravidla je to spojeno s přeskupováním tekutiny, s prouděním. Proudění kapaliny z bodu 1 do bodu 2 si můžeme znázornit proudovou trubicí. Její stěnu tvoří proudnice, čáry po kterých se pohybují částice kapaliny. Kapalina do této proudové trubice vstupuje průřezem o ploše S_1 a vystupuje průřezem S_2 . Hmotnost kapaliny, která vstupuje za jednotku času – hmotnostní průtok m'_1 /(kg/s) do proudové trubice je roven $m'_1 = \rho_1 S_1 u_1$, hmotnostní průtok z proudové trubice je $m'_2 = \rho_2 S_2 u_2$. Jestliže je proudění ustálené, pak nedochází k akumulaci hmoty a musí platit konstantnost hmotnostního průtoku

$$m' = \rho_1 S_1 u_1 = \rho_2 S_2 u_2 .$$

nebo jednoduše

$$\rho S u = \text{konst.} \quad (3-1)$$

Tento vztah vyjadřuje zákon o zachování hmotnosti v proudící tekutině a nazýváme jej **rovnice kontinuity**. Při proudění kapalin, ale i plynů v případě malých změn tlaku (*to však neplatí např. v dálkových plynovodech*) můžeme obvykle předpokládat, že $\rho_1 = \rho_2 = \rho = \text{konst.}$ Pak z rovnice kontinuity vyplývá také konstantnost objemového průtoku $V'/(m^3/s)$

$$\begin{aligned} V' &= S_1 u_1 = S_2 u_2 && \text{pro } \rho = \text{konst.} \\ S u &= \text{konst.} && \text{pro } \rho = \text{konst.} \end{aligned} \quad (3-1a)$$

Jednoduše řečeno: dané množství tekutiny protéká větším průřezem pomaleji, menším průřezem rychleji. Proudová trubice může být vymezena např. i stěnami zařízení, pak plochy S_1 a S_2 jsou známé.

Bilance energie. Bernoulliho rovnice

Do proudové trubice vtéká objemový průtok $S_1 u_1$, na jednotku jehož objemu je vázána mechanická energie $e_1 \equiv \rho_1 g h_1 + \frac{1}{2} \rho_1 u_1^2 + p_1$. Odpovídající množství energie vytéká koncovým průřezem. Bilance mechanické energie v proudové trubici je

akumulace = přítok + zdrojem dodávaná energie – odebíraná energie – přeměna energie na jiné druhy – odtok.

Velice často sledujeme úsek proudění, ve kterém se **nedodává energie, neztrácí se významné množství energie ani nedochází k akumulaci**. Pak se bilance zjednoduší na rovnost přítok = odtok a matematicky je vyjádřena **Bernoulliho rovnicí**

$$\rho_1 g h_1 + \frac{1}{2} \rho_1 u_1^2 + p_1 = \rho_2 g h_2 + \frac{1}{2} \rho_2 u_2^2 + p_2$$

nebo jednoduše

$$\rho g h + \frac{1}{2} \rho u^2 + p = \text{konst.} \quad (3-2)$$

Úroveň mechanické energie se dá vyjádřit společně např. jako ekvivalentní tlak p_{ekv}

$$p_{ekv} = \rho g (h - h_0) + \frac{1}{2} \rho u^2 + p$$

nebo jako ekvivalentní výška

$$h_{ekv} = (h - h_0) + \frac{u^2}{2g} + \frac{(p - p_0)}{\rho g} ,$$

přičemž h_{ekv} je výška nepohyblivé hladiny nad zvolenou hladinou h_0 , kam by z daného místa vystoupala tekutina do nějakého standardního tlaku $p = p_0$, p_{ekv} je tlak, který bychom naměřili ve spojené nádobě na zvolené geodetické výšce $h = h_0$.

Pak se Bernoulliho rovnice v soustavě bez akumulace dá zapsat také jako

$$p_{ekv} = \text{konst.}$$

nebo

$$h_{ekv} = \text{konst.}$$

Máme-li dva systémy, v nichž jsou rozdílné hodnoty p_{ekv} , pak po jejich propojení dojde k samovolnému proudění z místa o vyšším p_{ekv} do místa o nižším p_{ekv} . Hnací silou tohoto proudění je rozdíl těchto hodnot, označovaný jako Δp . Tam, kde se významně uplatňuje působení tíže, dáváme často přednost druhému způsobu a konstatujeme, že proudění probíhá z místa o vyšším h_{ekv} a alternativně pokládat za hnací sílu Δh .

Akumulace energie v proudové trubici připadá v úvahu především tam, kde se v čase výrazně mění rychlost tekutiny a tedy kinetická energie. Jedním z technologicky důležitých případů je rozběh

kapaliny v dlouhém potrubí (třeba ropovod). Působící Δp se nejprve akumuluje do zrychlující se kapaliny; teprve od určité rychlosti se začíná spotřebovávat významněji na tření. Do kinetické energie se také často ukládá rozdíl potenciálních energií tak, že od určitého okamžiku se zase kinetická energie vratně mění na potenciální. Je to podobné jako u klasického kyvadla. V kapalinách se to projevuje vlněním hladiny, následujícím po vnesení nějakého impulsu.

Zdrojem energie v proudové trubici je zpravidla zařazené čerpadlo, které nějak přispívá k místnímu zvýšení Δp resp. Δh .

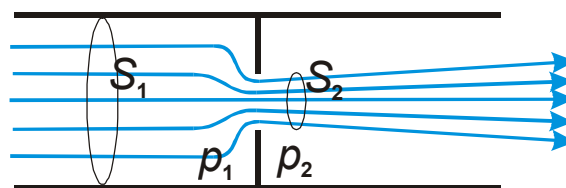
Odběr energie je v procesních technologiích méně obvyklý – bývá to např. turbína.

Přeměna mechanické energie na jiné druhy může být částečně vratná – např. u tepelného čerpadla (lednice); tu spíše přiřadíme k odběru energie. Daleko běžnější je nevratná přeměna mechanické energie viskózním třením na tepelnou energii – **ztráta mechanické energie**. Při ustáleném proudění (nulová akumulace) mezi dvěma systémy při absenci zdrojů a odběrů, se všechna energie, která je k dispozici, spotřebuje na viskózní tření.

□ Úlohy s Bernoulliho rovnicí

Řešení úloh bez započítání ztráty energie je užitečné tam, kde nejvýznamnějším dějem jsou přeměny forem energie – např. při náhlých změnách průřezu trubice. Takovýto případ je u některých **dynamických měřidel rychlosti** (clony, dýzy, rotametry), která indikují rozdíl tlaku $p_2 - p_1$ mezi místy o různém známém průtočném průřezu S_2 a S_1 .

Pro clonu na obr. 3.1 při stejném $h_1 = h_2$ a $\rho_1 = \rho_2$ platí



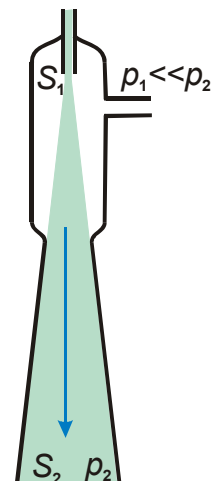
Obr. 3.1. Princip měření průtoku clonou

$\frac{1}{2} \rho u_1^2 - \frac{1}{2} \rho u_2^2 = p_2 - p_1$
a můžeme vypočítat objemový průtok

$$V' = \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho \left(\frac{1}{S_1^2} - \frac{1}{S_2^2} \right)}}$$

Bernoulliho rovnice také vysvětluje princip **vodní vývěvy** (Obr. 3.2.), ve které se rozšiřuje a zpomaluje proud vody, vystupující do prostoru o známém tlaku. V místě vysoké rychlosti kapaliny je podstatně snížený tlak a okolní plyn se strhává do proudu kapaliny. Hnací médium bývá v laboratoři vodovodní voda nebo přečerpávaný olej, v průmyslových zařízeních se využívá převážně páry; příslušnému zařízení pro vytváření nízkého tlaku („vakua“) říkáme pak **parní ejektor**. Rychlým proudem vzduchu můžeme také přisávat kapalinu, která se obvykle současně rozptýluje do drobných kapek. *(Tak se například připravuje vzduchobenzínová směs pro spalovací motory v jednoduchých karburátorech, nebo se tak rozptýluje nátěrová hmota v některých typech stříkacích pistolí.)*

Jestliže kapalině, proudící v delší trubici uzavřeme prudce cestu, její kinetická energie se může přeměnit jen na tlakovou. Setrvačnost kapaliny způsobí, že před překážkou prudce stoupne tlak. Vzniklá tlaková energie je schopna vytlačit jisté menší množství kapaliny užší trubici do poměrně velké výšky. Zařízení, využívající tohoto principu k čerpání kapaliny z vodoteče do výše položeného



Obr. 3.2. Tlakové poměry ve vodní vývěvě

místa, se nazývá **vodní trkač**. Vzniklý tlak se dá odhadnout ze vzorce $\Delta p = 5 \rho u L/t$, kde u je původní rychlost, L délka přívodního potrubí a t doba uzavírání. U běžných potrubí pro kapaliny se náhlému nárůstu tlaku nebezpečnému pro potrubí (tlakovému rázu) bráníme používáním uzavíracích členů, které se zavírají pomaleji (ventily místo kohoutů).

□ Sřlařitelné tekutiny

V Bernoulliho rovnici je uvařovaná i změna hustoty. Je tedy řeba posoudit, zda změna tlaku při proudění nevyvolá tak významnou změnu hustoty, abychom ji museli řipočítat. Ve velké řadě úloh (a ve většině, kterou řeší studenti tohoto kursu) změna hustoty pro dynamiku proudění není ani u plynů podstatná; může se ale projevit v rovnici kontinuity.

Tam, kde dochází k výrazné změně tlaku, musíme řídat znalost termodynamiky k tomu, abychom určili, jaká část mechanické energie se kompresí ři expanzí přeměňuje na tepelnou.

Mimořádná situace nastává tehdy, když jde o rychlá proudění s velkým poklesem tlaku. Tlak se v prostoru šíří stejnou rychlostí jako zvuk (zvuk je vlastně jen projev kolísání tlaku). Díky tomu, ře rychlost zvuku je vyšší v hustším prostředí a dohání tedy řelo postupující tlakové vlny, kde se udržuje skok tlaku v tzv. řázové vlně. Příslušná teorie se probírá např. při studiu aerodynamiky v nadzvukových rychlostech nebo při studiu explozí.

□ Zřáta tlaku při proudění, viskozita

Zřáta tlaku Δp , kterou můžeme alternativně vyjádřit pomocí zřáty výšky $\Delta h = \Delta p/(\rho g)$, je způsobena přeměnou mechanické energie na teplo (**disipace** mechanické energie). K tomu dochází, když se pohybují sousedící vrstvy tekutiny různou rychlostí. Při srážkách molekul se část kinetické energie rovnoměrného pohybu přemění na neuspořádaný tepelný pohyb – teplo.

Tato přeměna je spojena se silami, působícími mezi oblastmi tekutiny o různé rychlosti. Aby se tento stav udržel, musí ve dvou (skutečných nebo myřlených) rovnoběžných plochách o velikosti ΔS orientovaných do směru gradientu rychlosti $\Delta u/\Delta y$ působit proti sobě dvě síly o absolutní velikosti ΔF .

Síla, působící na plochu, se nazývá **mechanické napětí** $\tau \equiv \Delta F/\Delta S$. Z matematického hlediska je to tensor, neboť má dva směry - řiřazuje jednomu vektoru (plochy) druhý vektor (síly). Normálové napětí – složka napětí kolmá k ploše – je tlak. Zde se zaměřujeme na **tečné napětí**, spojené s řřením. Tato složka je pro běžné kapaliny a plyny úměrná **rychlosti smykové deformace** γ (pro nerotační proudění je $\gamma = \Delta u/\Delta y$), řičemž koeficientem úměrnosti je materiálová konstanta, nazývaná **viskozita**, μ .

$$\tau = \mu \gamma \quad (3-3)$$

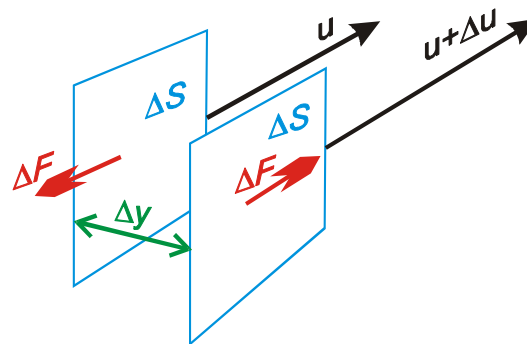
a v jednoduchém řípade řmykového proudění (obr.3.3.)

$$\frac{\Delta F}{\Delta S} = \mu \frac{\Delta u}{\Delta y}$$

Základní rozměr viskozity je $1 \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$, zkráceně 1 Pa s . Oblíbenou odvozenou jednotkou je milipascalsekunda, protože viskozita vody při běžné teplotě je řibližně 1 mPa s .

Z tabulky 3.1. je patrné, ře viskozita je veličina, která může nabývat značně rozdílných hodnot. Nízka viskozita plynů s rostoucí teplotou roste, viskozita kapalin s rostoucí teplotou klesá.

V lidové mluvě se málo tekuté (vysoce viskózní) tekutiny označují jako „husté“. To má více společného s vysokou koncentrací (řeba cukru v medu) než s hustotou; i „husté“ oleje mívají hustotu menší než voda.



Obr. 3.3. Jednoduché smykové proudění tekutiny mezi dvěma rovnoběžnými plochami. Pojmy potřebné k definici viskozity

Mechanická energie, která se viskózním třením přeměňuje na teplo – ztrácená neboli **disipovaná energie** v jednotce objemu za jednotku času $e'/(W\ m^{-3})$ rovna právě součinu

$$e' = \tau \gamma = \mu \gamma^2$$

Disipace energie třením Δp při průchodu jednotkového objemu tekutiny proudovou trubicí, v níž je γ konstantní (laminární proudění), bude tedy

$$\Delta p = \Delta e = e' t = e' \frac{L}{u} = \frac{\mu \gamma^2 L}{u},$$

protože doba průchodu kapaliny touto trubicí t je úměrná délce trubice L a nepřímo úměrná rychlosti. Smyková rychlost γ v proudové trubicí se může měnit v čase a podélně i příčně v prostoru, ale v každém případě může záviset jen na velikosti a tvaru této trubice, na rychlosti proudění a na vlastnostech kapaliny.

Bilance sil a hybnosti při působení viskozity vede k odvození pohybových rovnic pro objemovým element kapaliny, nazývaných podle autorů Navierovy – Stokesovy. Těmito parciálními diferenciálními rovnicemi, jejich odvozením a možnostmi jejich řešení se soustavněji zabýváme v předmětu „Přenosové jevy“.

Tab.3.1. Vlastnosti tekutin, důležité při proudění (přibližné hodnoty)

látko	teplota T /(°C)	viskozita μ /(mPa s)	hustota ρ /(kg m ⁻³)
vodík	20	0,008	0,1
vzduch	20	0,018	1,2
benzin	20	0,35	600
voda	20	1	1000
voda	90	0,3	960
roztavená ocel	1600	5	7500
olej M6	-5	5000	900
olej M6	100	12	900
glycerin 100%	100	14	1100
glycerin 100%	60	100	1200
20% cukr ve vodě	20	2	1000
40% cukr ve vodě	20	6	1100
60% cukr ve vodě	20	60	1200

□ Bezrozměrná kritéria („čísla“)

Fyzika se snaží studovat velmi přesně **vymezené problémy**, pro které vytváří velmi přesný popis. Procesní inženýrství fyzikální výsledky používá, avšak liší se zejména tím, že se soustřeďuje i na **meze platnosti** tohoto popisu. Často totiž je možno zanedbat i některé vlivy, které za jiných podmínek mohou být důležité.

Při srážce čmeláka s automobilem můžeme předpokládat, že hybnost automobilu se nezmění a mechanické účinky se akumulují ve čmelákovi; při srážce automobilu s betonovou stěnou se nezmění hybnost stěny a účinky se akumulují v automobilu. Při srážce dvou stejně těžkých aut se dá zhruba předpokládat, že hybnost obou těles se změní zhruba stejně a výsledné účinky na obě tělesa budou podobné. Přitom jde z fyzikálního hlediska stále o tutéž úlohu. Na první pohled vidíme, že zde možnost zanedbání některého účinku záleží na poměru hmotností studovaných těles.

Protože chemické inženýrství se zabývá komplikovanými procesy, hledá vodítka, určující kdy některé jevy lze zanedbat a kdy je tedy možno využít k popisu procesu s dostatečnou přesností některou **asymptotu**. Pro tento účel je účelné zavádět **bezrozměrná kritéria**, tzv. „čísla“..

Např.: z hlediska vesmíru je Země hmotným bodem v pohybu, z hlediska sluneční soustavy je to rotující koule, z hlediska laboratoře je povrch Země rovinný a nepohyblivý. V tomto případě jsme schopni intuitivně odhadnout, dokdy jsme oprávněni některý z těchto pohledů použít ve fyzice. Pro zmíněný příklad je kritériem poměr L/D_Z délkového rozměru L studovaného systému k průměru Země D_Z .

Podobně se dají dalšími „přirozenými“ měřítky vymezit speciální oblasti – například mikrosvět mezi vlnovou délkou světla a oblastí sledovatelnou neozbrojeným okem. Nanosvět - od vlnové délky světla k rozměrům malých molekul.

Kritéria, udávající poměr veličin stejného typu nazýváme **simplexy**. Pokud jsou to délky, pak je to **geometrický simplex**. (Nejznámějším geometrickým simplexem je Ludolfovo číslo π , dané poměrem obvodu a průměru kruhu.)

Pro člověka, studujícího děje v zařízení o rozměru L , kde je simplex $L/D_Z \ll 0,001$, stačí předpoklad, že Země je placatá. Letec při transatlantickém letu na vzdálenost L , pro kterou je $L/D_Z \approx 1$, tedy řádově blízké jednotce, musí respektovat kulovitý tvar Země a její rotaci. Astronom, zabývající se sluneční soustavou, smí při $L/D_Z \gg 1000$ popsat Zemi jako hmotný bod.

V přechodových oblastech hodnot simplexu musíme trochu vážit, zda se přiklonit k jednomu nebo druhému popisu, nebo zda stojí za úvahu vzít složitější popis, reflektující sousední asymptoty.

Bezrozměrová kritéria, mohou také dávat do vztahu složitěji popsané souměřitelné veličiny a jsou často pojmenována podle významných badatelů v oboru.

Tak např. po Jean Claude Eugène Pécletovi (1793-1857), francouzském fyzikovi, který sepsal průkopnické pojednání o teple, se veličina $Pe \equiv \frac{\rho c_p U d}{\lambda}$, nazývá Pécletovo číslo (Pécletovo kritérium). To dává do vztahu teplo přenášené proudem tekoucí tekutiny (rychlost U , hustota ρ , tepelná kapacita c_p) k teplo přenášenému vedením (tepelná vodivost λ) od stěny (délkový rozměr d). Pro $Pe \gg 1$ je rychlost omývání stěny vysoká a teplotní změny se projevují jen v tenké vrstvičce u stěny. Obráceně, pro $Pe \ll 1$ je omývání stěny málo významné a teplotní změny zasahují od stěny daleko.

Takovýchto kritérií bylo zavedeno mnoho; v tomto kursu se setkáme jen s asi desítkou nejběžnějších. Každá z asymptot umožňuje přidat nějaké zjednodušující předpoklady, dozvědět se o výsledku děje jednodušším měřením nebo výpočtem, a jednodušším způsobem závislost výsledku na procesních proměnných zapsat.

□ Časová měřítka

Jednotlivé dílčí děje procesů mohou mít různý vztah nejen k **prostoru**, ale i k **času**.

Obecně důležitým je stav **rovnováhy**, na kterém se soustava ustálí po dostatečně dlouhém (nekonečném) čase (těžší kapalina bude dole, lehčí plyn nahoře, vše bude mít stejnou teplotu a všechny příslušné chemické reakce proběhnou). Pro praktické úvahy je důležité, že všechny samovolné děje probíhají ve směru k rovnováze a zpravidla tím větší rychlostí, čím jsou od ní vzdálenější. Od rovnováhy musíme odlišit **ustálený** (stacionární) děj. Při něm se ve sledovaném systému s časem nic nemění, ale systém se podílí na nějakém ději vně. Pozorujeme-li nádrž do které na jednom místě vtéká stálý proud kapaliny a jinudy stejné množství odtéká, můžeme stav uvnitř nádrže označit jako **dynamickou rovnováhu** – nemění se tam s časem zdánlivě nic.

Ustálený děj probíhá např. v autě, jedoucím po rovině rovnoměrně rychlostí 50 km/h se spotřebou 6 l benzínu na 100 km. Jestliže auto bude velmi pomalu měnit rychlost z 40 na 60 km/h, můžeme očekávat, že v okamžiku, kdy pojede rychlostí 50 km/h bude stejně konzumovat 3 l/h, tedy okamžitá hodnota je opět 6 l / 100 km.

Děj, jehož okamžité výsledky závisí jen na okamžitých podmínkách (nezávisí na historii) nazýváme **kvasistacionární** (jakoby ustálený). Jistěže bude zcela jinou situace, když budeme zkoušet jak se nejrychleji automobil dostaneme z klidu na 100 km/h; to bude děj významně **neustálený** (nestacionární) a okamžité hodnoty spotřeby zde závisí nejen na okamžité rychlosti ale i na **historii** děje. V procesních technologiích pracujeme většinou s ději stacionárními a kvasistacionárními.

Např. při konstantním příkonu vařiče bude nejprve neustáleným způsobem postupně růst teplota vody při stále rovnovážné hladině vody. Po dosažení teploty varu bude z hrnce s vodou odcházet ustáleným proudem vodní pára. Z hlediska hladiny vody nastává tím děj neustálený, hladina bude pomalu konstantní rychlostí klesat, dokud voda bude přítomna, atd..

I zde můžeme charakterizovat děj např. bezrozměrovým simplexem, jímž je poměr doby pozorování k času, za který se soustava přizpůsobí vnějšímu působení.

Tento poměr byl pro reologické chování (deformace a tok) netypicky pojmenován jako Debořino číslo D - podle Bible (Kniha Soudců 5.5.), kde Debora zpívá, že se skály roztékají před očima Hospodina. Nízké D značí, že na materiál můžeme nahlížet jako na pevnou látku, vysoké D charakterizuje kapalinu. Např. asfalt je při krátkém pozorování pevný materiál, v delším čase se může projevit jako pomalu tekoucí kapalina.



Pojmy k zapamatování

Tekutina, spojité prostředí-kontinuum

Rychlost tekutiny (místní, střední)

Mechanická energie (potenciální, kinetická, objemová)

Tlak absolutní, přetlak, podtlak

Rovnice kontinuity – bilance hmotnosti (objemu) kapaliny

Bernouliho rovnice – bilance základních forem mechanické energie tekutin

Dynamická měřidla rychlosti tekutin

Vodní vývěva, parní ejektor

Viskozita, tečné napětí, smyková rychlost

Berrorměrná kriteria („čísla“), simplexy

Ustálené děje, rovnováha, kvasistacionární děje

3.2. Proudění tekutin



Čas ke studiu: 4 hodiny



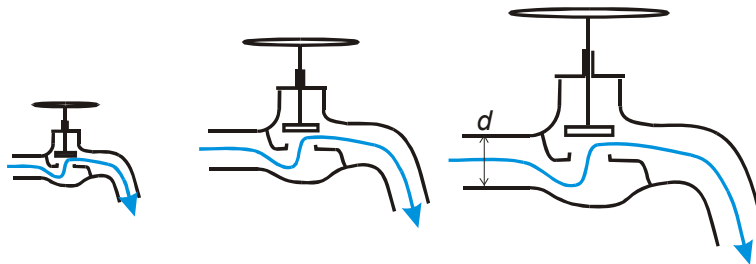
Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- charakterizovat laminární a turbulentní proudění
- vyjmenovat na kterých veličinách závisí tlaková ztráta při proudění
- popsat vztah tlakové ztráty a průtoku vhodnými bezrozměrovými vztahy
- využít definice charakteristického průměru pro popis proudění v nekuhových potrubích
- vysvětlit pojem porozita a mimovrstvová rychlost
- využít vlastností uzlů potrubní sítě

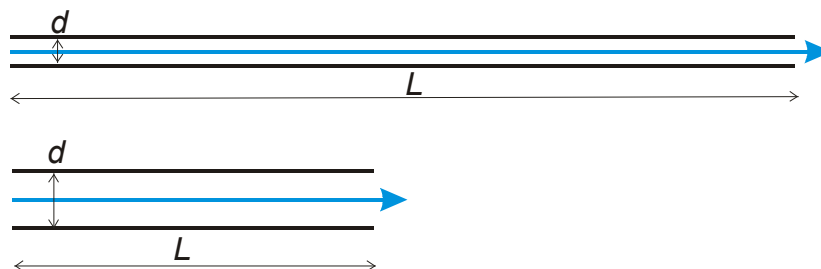


Výklad

**Proudová trubice, charakterizovaná jediným rozměrem.
Rozměrová analýza.**



Obr. 3.4. Uspořádání geometricky podobné průtočné soustavy se popíše verbálně (zde: proudění pootevřeným ventilem) a dále stačí jediný délkový rozměr. Nejčastěji se volí vnitřní průměr odpovídajícího potrubí d .



Obr. 3.5. U jiných průtočných soustav (např. potrubí kruhového průřezu) existují dva nezávislé délkové rozměry – průměr d a délka L . Pak jejich uspořádání popisujeme rovněž jedním rozměrovým parametrem d a bezrozměrovým geometrickým simplexem L/d .

Průtočnou trubici zadaného tvaru (např. ve ventilu na Obr.3.4.) můžeme charakterizovat jediným délkovým rozměrem, za který je zvykem volit vnitřní průměr potrubí d . Při změně velikosti d předpokládáme, že všechny ostatní délkové rozměry (tedy i dráha kapaliny L) se mění úměrně.

Při ustáleném proudění, nezávislém na čase, je pak γ funkcí pouze čtyř proměnných: rychlosti u , průměru trubice d a vlastností kapaliny – hustoty ρ a viskozity μ . Proto také tlaková ztráta je zde funkcí těchto čtyř proměnných $\Delta p = f(u, d, \rho, \mu)$. Tato funkce se dá zjednodušit pomocí **rozměrové**

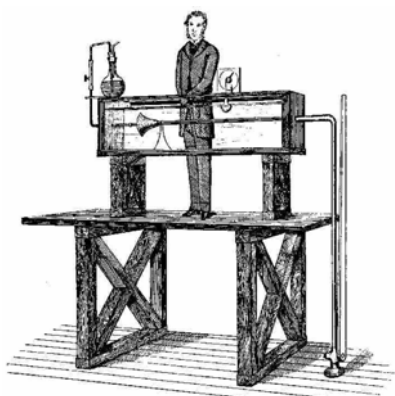
analýzy. Podle rozměrové analýzy je možno všechny fyzikální vztahy zjednodušit tak, že se proměnné seskupí do bezrozměrových skupin – takzvaných "čísel" nebo „kritérií“. Při tomto seskupení ubude za každý základní rozměr jedna proměnná. Jestliže tedy naše proměnné mají v základních jednotkách rozměry:

$$\begin{aligned}\Delta p & /(\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}) \\ u & /(\text{m s}^{-1}) \\ d & /(\text{m}) \\ \rho & /(\text{kg m}^{-3}) \\ \mu & /(\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1})\end{aligned}$$

pak rozměrovou analýzou ubudou tři proměnné (za kg, m, s) a uskupené bezrozměrové proměnné mohou např. být

$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\frac{\rho}{2} u^2} \quad \text{odporový součinitel,} \quad (3-4)$$

$$Re \equiv \frac{u d \rho}{\mu} \quad \text{Reynoldsovo číslo.} \quad (3-5)$$



Obr. 3.6. Osborne Reynolds předvádí londýnskému publiku v roce 1880 pokus s laminárním a turbulentním prouděním v trubce



Osborne Reynolds
(1842-1912)
objev
hydrodynamické
podobnosti; teorie
mazání

Ke stejnému výsledku můžeme dospět elegantněji pomocí **teorie podobnosti**. K tomu však potřebujeme popsat daný proces matematickým modelem, obsahujícím řešitelný soubor rovnic, i když toto řešení v daném okamžiku buďto nechceme nebo neumíme zvládnout. Avšak i v případě, že řešení máme, zmenší nám teorie podobnosti (stejně jako rozměrová analýza) počet sledovaných proměnných což ušetří mnoho výpočetní práce a zjednoduší zpracování výsledků do tabulek, grafů nebo vzorců.

Dané proudění popisuje vztah mezi bezrozměrovými čísly, tudíž tlakovou ztrátu můžeme vyjádřit pomocí funkce ζ (Re). Uvedená volba čísel porovnává u ζ tlakovou ztrátu s kinetickou energií protékající tekutiny, tak jak je známe z Bernoulliho rovnice; proto ta dvojka ve jmenovateli. Reynoldsovo číslo vyjadřuje poměr setrvačných sil k silám viskózního tření. Je

možno snadno navrhnout i jiná bezrozměrová čísla (a je to někdy užitečné), ale tato čísla bude v každém případě možno vyjádřit jako násobek, mocninu nebo násobek mocnin ζ a Re . Když bychom chtěli zvláště sledovat, jak závisí tlaková ztráta na rychlosti, volili bychom čísla, z nichž jedno by obsahovalo Δp v první mocnině a neobsahovalo by u ; druhé číslo by obsahovalo u v první mocnině a neobsahovalo by Δp . S těmito požadavky již nezbyvá další volnost a příslušná dvojice je vytvořena čísla

$$\zeta Re^2 \equiv \frac{2\Delta p d^2 \rho}{\mu^2}, \quad Re$$

Jindy je třeba účelněji separovat u a d a vyjdou čísla



Obr. 3.8. Proudění v potrubích - základní prvek procesních technologií

$$\zeta^{-1/2}, \quad \zeta^{1/2} Re$$

atd. Popíšeme-li data, naměřená v dané geometrii závislostí mezi nebo kterýmikoliv z těchto bezrozměrových čísel nebo nalezneme-li takovou závislost již v literatuře, vztah mezi ostatními kombinacemi bezrozměrových čísel můžeme získat jednoduchým přepočtem.

Laminární a turbulentní proudění

Typická závislost $\zeta(Re)$, vynesena v logaritmických souřadnicích, je nejčastěji klesající funkce, která má dvě významné oblasti. Pro velmi nízká Re můžeme očekávat pomalé proudění, setrvačné síly se příliš neprojeví a Δp tudíž nemůže prakticky záviset na hustotě ρ . Vynecháme-li tedy hustotu z rozměrové analýzy, pak můžeme pro tuto **laminární plouživou oblast proudění** odvodit jediné "číslo", představované součinem

$$\zeta Re = \frac{2 \Delta p d}{\mu u}, \quad (3-6)$$

a musí platit

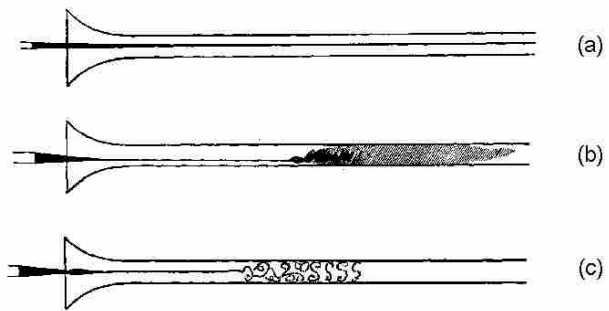
$$\lim_{Re \rightarrow 0} (\zeta Re) = (\zeta Re)_0 = \text{konst.} \quad (3-7)$$

Na druhé straně, při vyšších hodnotách Re se vliv viskozity přenáší dovnitř turbulentních vírů, ve kterých se konzumuje všechna dodaná kinetická energie. Tlaková ztráta přestává záviset na viskozitě a tedy na Re a pro tuto **turbulentní oblast proudění** lze očekávat

$$\lim_{Re \rightarrow \infty} \zeta = \zeta_\infty = \text{konst.}$$

(3-8)

Pro pootevřený ventil na obrázku by vycházelo ζ_∞ podle tvaru ventilu a jeho otevření asi 5 až 10.



Obr. 3.7. Reynoldsova původní skica: do trubice vtéká zleva čirá kapalina a středem je zaváděn tenký pramínek kapaliny barevné. Při laminárním režimu (a) je vytvořena barevná linka, při vyšších rychlostech (b),(c) dochází k víření - turbulenci

Proudová trubice, charakterizovaná dvěma rozměry

Nejběžnější případ potrubí kruhového průřezu (Obr. 3.5.) musíme popsat dvěma délkovými rozměry, průměrem d a délkou L . Z rozměrové analýzy nám pak vyjde navíc ještě jeden geometrický simplex, např. L/d .

Obecně musí existovat funkce $\zeta(Re, L/d)$, avšak snadnou úvahou dospějeme ke tvrzení, že tlaková ztráta v potrubí, jsou-li ostatní veličiny neměnné, musí být přímo úměrná délce L . Musí tedy existovat funkce $\Delta p/L = f(u, d, \rho, \mu)$ a do rozměrové analýzy můžeme vstoupit s veličinou $\Delta p/L$ namísto Δp . Pak nám vyjde, že je užitečné zavést skupinu

$$\lambda \equiv \zeta \frac{d}{L} = \frac{\Delta p d}{\frac{\rho}{2} u^2 L}, \quad \text{součinitel tření v potrubích,} \quad (3-9)$$

a pro výpočty proudění v trubce stačí znát funkci $\lambda(Re)$.

V angloamerické literatuře se častěji zavádí definice Fanningova třecího součinitele f , který je roven $f \equiv \tau / (\rho/2 u^2) = \lambda/4$. Jeho definice vychází ze síly tření rozložené na plochu stěny – tečného napětí τ , které je obecně rovno $\tau = \Delta p d_{ekv} / (4 L)$.

Pro asymptoty funkce $\lambda(Re)$ platí podobná pravidla jako pro funkci $\zeta(Re)$. Pro kruhovou trubku při **laminárním proudění** (nízké hodnoty Re) je možno odvodit řešením Navierovy-Stokesovy pohybové rovnice Hagenův-Poiseuillův zákon např. ve tvaru

$$\Delta p = \frac{32 \mu L u}{d^2} = \frac{128 \mu L V'}{\pi d^4}. \quad (3-10)$$

V bezrozměrové formulaci je to jednoduše

$$\lim_{Re \rightarrow 0} (\lambda Re) = 64. \quad (3-11)$$

Přímočaré proudění v trubce má určitou zvláštnost. V křivočarém proudění se totiž proudnice již pro $Re > 1$ vlivem setrvačnosti deformují, s dalším růstem Re vznikají nejprve velmi pravidelné rozměrné víry a teprve při velmi vysokých Re se objevuje chaotické víření turbulentního typu. Povlovný přechod z laminárního na turbulentní proudění máme možnost sledovat v kapitole o usazování na příkladu obtékané koule. U přímého potrubí se laminární proudění setrvačností do vysokých hodnot Re udrží a přechod režimu proudění na turbulentní je skokový a laminární režim zkolabuje podle dalších okolností při Re někde mezi 2000 a 4000. To experimentálně odhalil v roce 1880 Reynolds (Obr.3.6-7).

Při běžné přepravě vody, vzduchu a podobných kapalin a plynů v potrubích se volí rychlosti

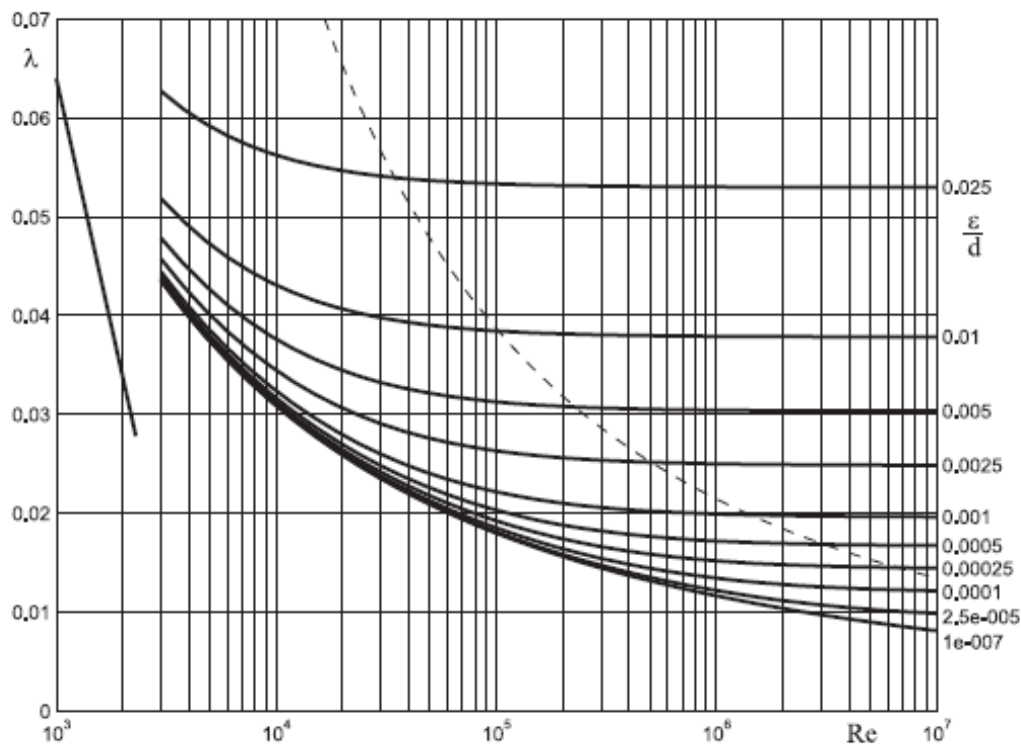
1-2 m/s pro kapaliny v běžných potrubích,

5 m/s pro kapaliny ve velkopřůměrových dálkových potrubích,

30-50 m/s pro plyny

takže se dá přepokládat turbulentní proudění. To platí i pro rtuť a roztavené kovy.

Laminární proudění těchto tekutin se vyskytuje jen při pomalém proudění např. v kapilárách (tenkých trubičkách), při filtraci a při průsaku tekutin porézní vrstvou s malými póry. Laminární proudění je obecně běžné u tekutin s vysokou viskozitou, což jsou hlavně taveniny a roztoky polymerů, nátěrové hmoty, pasty a krémy potravinářského průmyslu, roztavené sklo a strusky atd.



Obr. 3.9. Moodyho diagram.

Závislost součinitele tření λ na relativní drsnosti ε/d a na Re v oblasti vyšších hodnot Re pro proudění v potrubí kruhového průřezu

Turbulentní proudění v drsné trubce

Pro **turbulentní proudění** musíme vycházet z pokusných dat o odporu proudění v trubkách. Ukazuje se, že při vysokých $Re \gg 1000$ leží λ obvykle v rozmezí mezi 0,02 a 0,04 a tato hodnota závisí i na další geometrické veličině, kterou je charakteristická výška e výstupků případně hloubka důlků na vnitřní stěně potrubí. Ukazuje se, že důležitou veličinou je zde **relativní drsnost potrubí**, vyjádřená geometrickým simplexem e/d . Příslušné hodnoty λ byly získány měřením a pro účely návrhu potrubí jsou shrnuty např. graficky na obr. 3.9.

□ Potrubí konstantního nekrhového průřezu

Vedle nejběžnějšího kruhového průřezu potrubí proudí v technických zařízeních kapaliny i potrubími hranatými (Obr. 3.10 b) (*vzduchotechnika, betonové žlaby*), mezikruhovým prostorem mezi sousedními trubkami (*výměníky*) a často i dalšími složitými geometriemi. Většinou nám postačí přibližný výsledek, ke kterému se dostaneme tak, že použijeme vztahy pro λ , používané pro kruhové potrubí (Obr. 3.10 a), do kterých namísto průměru potrubí d dosadíme **hydraulický průměr** d_H , počítaný jako

$$d_H \equiv \frac{4S}{o} \quad (3-12)$$

V tomto vztahu je S plošný průřez zabíraný kapalinou a o je **smočený obvod stěn** potrubí (ve žlabech s otevřenou hladinou například sem tu část obvodu, příslušející hladině, nezahrnujeme). Pokud bychom trvali na přesnějších datech, jsou dnes již k dispozici softwarové prostředky „řešiče Navierových-Stokesových rovnic“, umožňující příslušnou hodnotu λ nebo přímo tlakovou ztrátu vypočítat přesně pro laminární proudění v potrubí libovolného tvaru a s poněkud vyšší přesností předpovědět tyto hodnoty i pro turbulentní proudění.

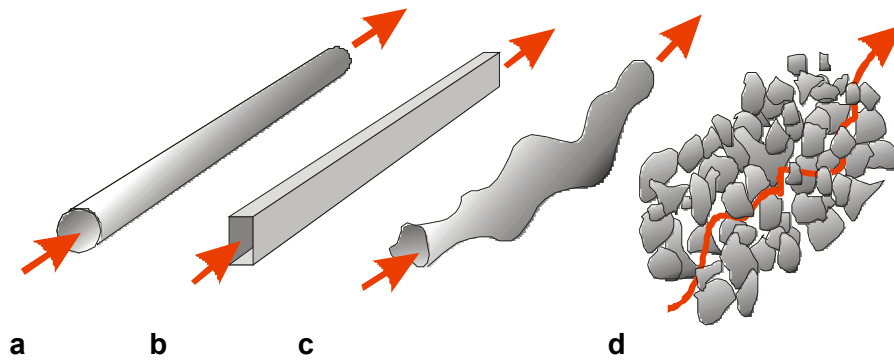
□ Průtočný prostor nekonstantního nekrhového průřezu a tok porézní vrstvou

Jak se přesvědčíme i v dalších kapitolách, protéká v řadě procesů tekutina porézním prostředím, což může být průlinčitý materiál (*papír, textil, keramika, monolitický katalyzátor apod.*) nebo vrstva částic (Obr. 3.10 d) (*uhlí v roštovém topeništi, vsázka vysoké pece, vrstva krystalů, písek, zemina, vrstva částic katalyzátoru, sorbentu, sypaná náplň kolony, chromatografická kolona apod.*). I pro popis proudění v této soustavě můžeme do jisté míry využít znalostí o proudění v kruhové trubce. V nejjednodušším případě můžeme na porézní vrstvu nahlížet jako na soustavu souběžných kanálků (Obr. 3.10 c). Hydraulický průměr pro kanálky nekonstantního průměru můžeme počítat pomocí zobecněného vztahu (3-12) jako

$$d_H \equiv \frac{4V_P}{S_P} \quad (3-13)$$

kde V_P je objem volného prostoru vrstvy a S_P je celkový smočený povrch vrstvy. V případě, že vrstva je vytvořena nasypáním známého počtu tělísek známé velikosti, pak lze snadno určit hodnotu S_P . Hodnota V_P je závislá na celkovém objemu vrstvy V_V a na uspořádání jejího prostoru; často je užitečné zavést bezrozměrovou veličinu ε , nazývanou **porozita**

$$\varepsilon \equiv \frac{V_P}{V_V} \quad (3-14)$$



Obr. 3.10. Jednosměrné proudění

a – kruhový průřez potrubí, b - nekruhový průřez kanálku, c - nekonstantní průřez kanálku, d - vrstva částic

Porozita se dá zjistit např. měřením sypné hmotnosti. Pro vrstvu tvořenou kuličkami stejného průměru d_p leží v intervalu $0,259 < \varepsilon < 0,476$ podle uspořádání částic a hydraulický průměr vyjde

$$d_H = \frac{2 \varepsilon d_p}{3(1 - \varepsilon)}$$

Vrstva nekulových částic nebo částic nestejné velikosti se dá uspořádat tak, že porozita je nižší, zmenšení volného objemu vrstvy může být také způsobeno stlačením poddajných částic (pružných či plastických). Vysokou porozitu, $\varepsilon \rightarrow 1$, mají neuspořádané vláknité vrstvy ale zejména vrstvy tvořené tvarovanými plošnými útvary, které využíváme v zařízeních pro kontaktování plynů s kapalinami (kolony, katalytické reaktory).

Rychlost tekutiny v pórzním prostředí charakterizujeme snadno určitelnou **mimovrstvovou rychlostí** u_0 , což je průměrná rychlost počítaná vydělením průtoku čelní plochou vrstvy tedy rychlost příslušející danému místu zařízení, z něhož by byla vrstva odstraněna.

$$u_0 \equiv \frac{V'}{S}$$

Skutečná průměrná rychlost u_H v kanálcích vrstvy je tím větší, čím je menší porozita,

$$u_H = \frac{u_0}{\varepsilon}$$

takže pokud známe příslušné veličiny, je užitečné zavést charakteristické Reynoldsovo číslo pro vrstvu částic o průměru d_p vztahem

$$Re_H \equiv \frac{2 d_p u_0 \rho}{3(1 - \varepsilon) \mu}$$

Zpracováním řady experimentálních údajů se došlo k Ergunově rovnici

$$\frac{\Delta p d_p \varepsilon^3}{\rho u_0^2 L (1 - \varepsilon)} \approx \frac{100}{Re_H} + 1.75 \quad (3-15)$$

přičemž první člen pravé strany sám postačuje v plouživé laminární oblasti $Re_H < 1$ a je zanedbatelný v turbulentní oblasti $Re_H > 300$. Všimněme si, že při křivočarém proudění dochází ke změně režimu proudění plynule a odehrává se při hodnotách Reynoldsova čísla podstatně nižších než skoková změna režimu při proudění přímočarém.

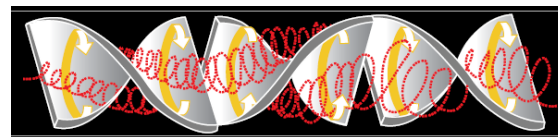
Nejsme-li schopni dobře odhadnout veličiny d_H a ε , stačí jediné měření tlakové ztráty na vrstvě daného materiálu buďto k určení rozměrové konstanty k_1 , pokud pracujeme pouze v laminárním režimu, nebo k_2 pokud pracujeme až v režimu rozvinuté turbulence.

$$\frac{\Delta p}{\rho u_0^2 L} \approx \frac{k_1 \mu}{u_0 \rho} + k_2$$

Laminární režim je typický pro proudění filtračním koláčem obtížně filtrovatelných suspenzí, turbulence se dá očekávat např. při proudění plynů volnějšími mezerami mezi nasýpanými tabletami katalyzátoru nebo v náplních kolon.

□ Statické směšovače

Při obtoku tekutiny kolem částic vrstvy se proud tekutiny neustále dělí a spojuje, zpomaluje a zrychluje, takže dochází k výraznému podélnému i příčnému promíchávání. Proto byly vyvinuty různě tvarované prvky, které se vkládají do trubek, chceme-li využít části energie proudící tekutiny k míchání. Velice jednoduchý statický mixer Kenics používá řazení pásků zkroucených střídavě doprava a doleva. Každý prvek rozřeže proud přitékající tekutiny a ještě přetáčí proud od stěn k ose trubky a zpět střídavě v pravotočivém a levotočivém smyslu. Existuje i mnoho dalších statických směšovačů se složitějšími vestavbami, které však s rychlejším a dokonalejším směšováním přináší i vyšší tlakové ztráty.



Obr. 3.11. Příklad proudění okolo trojice prvků statického směšovače „Kenics“ v trubce

□ Bezrozměrové korelace

V této kapitole jsme viděli, že některé zákonitosti procesů se dají shrnout do vztahu mezi bezrozměrovými kritérii. Například tlakovou ztrátu v přímé trubce jsme popsali vztahem $\lambda(Re)$. Tento vztah sice v grafu představuje složitou křivku, ale má dvě výrazné asymptoty – pro laminární a pro turbulentní proudění. Obě, podobně jako v jiných případech, se dají formálně zapsat jediným vztahem

$$\lambda = A Re^a,$$

kde však

$$\begin{aligned} A = 64, & \quad a = -1 \quad \text{pro laminární proudění,} \\ A = f(e/d), & \quad a = 0 \quad \text{pro turbulentní proudění.} \end{aligned}$$

Připomeňme, že podle matematické terminologie jde o **mocninový vztah**, kde A označujeme jako **součinitel (koeficient)** a a je **exponent**. Výhodou tohoto vyjádření je, že platí

$$\log(\lambda) = a \log(Re) + \log(A),$$

takže v grafickém znázornění při volbě obou os grafu logaritmických, vycházejí příslušné asymptoty jako přímky, jejichž směrnice odpovídá exponentu a a úsek na ose součiniteli A .

Pojmenování **mocninový vztah**, $y = A x^a$, nesmíme nikdy plést s označením **exponenciální**, které patří výhradně k funkcím typu $y = A \exp(ax)$, v nichž je nezávislá proměnná v exponentu !

Potrubní sítě

Všechny předchozí úvahy o hydrodynamice byly omezeny na jednu proudovou trubici, jedno potrubí. Typickou situací je použití potrubních sítí v nichž se proudy rozbíhají (např. v distribuční síti vodovodu) nebo sbíhají (např. z několika zdrojů do úpravný vody) nebo také běží v několika paralelních větvích. V procesních technologiích se také často tekutina vrací recyklem. Při výpočtu toho, jak se rozdělí průtoky a tlaky v celé soustavě popíšeme síť soustavou **uzlů** představovaných děliči a směšovači. Případně tam mohou být dále ještě zásobníky (kladná nebo záporná akumulace), čerpadla (dodávání energie), někdy i hydrodynamické stroje, odebírající energii. Tyto bloky jsou propojeny úseky spojovacích potrubí a pro každý z nich můžeme aplikovat univerzální vztah mezi odporovým součinitelem a Reynoldsovým číslem. Tlaky a průtoky v soustavě větví jsou neznámé a k jejich dopočítání slouží dvě zásadní pravidla bilance hmotnosti a energie, platná pro každý uzel (v němž nedochází k akumulaci):



Obr. 3.12. Ropovod Baku – Ceyhan
Průměr 1100 mm.. Maximální tlak 4 MPa. .

- součet všech hmotnostních přítoků do uzlu je roven součtu všech hmotnostních odtoků,
- každému uzlu přísluší jediná hodnota geodetické výšky h a jediná hodnota tlaku p , použitelná pro všechny větve, navazující na tento uzel,
- v běžných situacích nemusíme zpravidla brát v úvahu rychlé časové změny; proto v každém okamžiku řešíme úlohu jako ustálenou (quasistacionární děj),
- jde-li o proudění z velké nádrže anebo do velké nádrže, používáme v Bernoulliho rovnici podmínky na hladině kde známe výšku a tlak a můžeme zanedbávat kinetickou energii.

Když úlohu dobře zformulujeme, dostaneme snadno řešitelnou soustavu rovnic. Pro řešení rozsáhlejších potrubních sítí jsou k dispozici přátelské softwarové prostředky.



Pojmy k zapamatování

Podobnost průtočných soustav, rozměrová analýza

Reynoldsovo číslo

Odporový součinitel, součinitel tření v potrubí

Laminární a turbulentní proudění

Drsnost

Hydraulický průměr, smočený obvod, průtočný průřez

Porozita, mimovrstvová rychlost

Potrubní síť, větve, uzly



Příklady

Příklad 3.1.

Tlaková ztráta v potrubí (tření, místní odpory, drsnost)

Vypočítejte ztrátu tlaku třením při průtoku 20 % $\odot$ CaCl_2 při 20°C ($\rho = 1.18 \text{ g/cm}^3$, $\mu = 2.32 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) novým ocelovým potrubím dlouhým 450m, vnitřního průměru 100 mm. Roztok proudí průměrnou rychlostí 2.2 m/s. V potrubí jsou tři 90°kolena, jedna tvarovka T použitá jako koleno (vtok delší části) a jedno otevřené šoupě. Jak se změní ztráta tlaku, bude-li potrubí korodované? Počítejte s hodnotou absolutní drsnosti $\varepsilon = 0.005 \text{ cm}$ pro nové a $\varepsilon = 0.05 \text{ cm}$ pro korodované potrubí.

Postup: Tlaková ztráta je dána součinem ztrátové výšky a hustoty kapaliny. Protože jde o potrubí členité s armaturami a ohyby, je nutné za jeho délku dosadit celkovou dopravní délku potrubí, tj. součet skutečné délky

potrubí a ekvivalentních délek jednotlivých armatur, viz Tabulka 1. K určení koeficientu tření potřebujeme znát Re a v případě turbulentního proudění také relativní drsnost. Koeficient pak odečteme z Moodyho diagramu $\lambda = \lambda(Re, \varepsilon/d)$ - Obr.3.9.

Tabulka 1: Ekvivalentní délky armatur

Armatura	l_e/d	Armatura	l_e/d
Koleno 45° (1" - 3")	15-20	Zpětná klapa	80
Koleno 90° (3/8" - 2.5")	30	Křížový kus	50
Koleno 90° (3" - 6")	40	Ventil přímý otevřený	10
Střední kolenovitý oblouk	25	Rohový ventil otevřený	170
Dlouhý kolenovitý oblouk	15-20	Uzavírací ventil otevřený	300
Koleno s ostrým	75	Šoupě otevřené	7
Oblouk 180° malý poloměr křivosti	75	Šoupě uzavřené z 1/4	40
Oblouk 180° velký poloměr křivosti	50	Šoupě uzavřené z 1/2	200
Tvarovka T jako koleno (vtok delší části)	60	Šoupě uzavřené ze 3/4	800
Tvarovka T jako koleno (vtok ramenem)	90	Vodoměr s impulsním kolečkem	300

Ekvivalentní délky armatur: $l_e = (3 \cdot 40 + 1 \cdot 60 + 1 \cdot 7) \cdot 0.10 = \underline{18.7m}$

Celková délka potrubí: $l = 450 + 18.7 = \underline{468.7m}$

Reynoldsovo číslo: $Re = u \cdot d \cdot \rho / \mu = 2.2 \cdot 0.10 \cdot 1180 / 0.00232 = \underline{111900}$

Proudění je turbulentní, pro koeficient tření musíme určit relativní drsnost potrubí.

Pro nové potrubí: $(\varepsilon/d) = 0.005/10 = 0.0005$

Pro korodované potrubí: $(\varepsilon/d) = 0.05/10 = 0.005$

Hodnotu koeficientu tření λ pro korodované i nové potrubí odečteme např. z Moodyho diagramu korelaci koeficientu tření λ na Re a ε/d .

nové potrubí $\lambda = 0.0205$

korodované potrubí $\lambda = 0.0305$

Tlaková ztráta je pak dána vztahem $\Delta P = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho u^2}{2} q$.

Pro nové potrubí činí $\Delta P_N = 0.0205 \cdot 468.7 / 0.1 \cdot 2.2^2 / 2 / 9.81 \cdot 1180 = \underline{27.967 \text{ kPa}}$

Pro korodované činí $\Delta P_K = 0.0305 \cdot 468.7 / 0.1 \cdot 2.2^2 / 2 / 9.81 \cdot 1180 = \underline{41.612 \text{ kPa}}$

Odpověď:

Ztráta tlaku v novém potrubí bude 28 kPa, ve starém 41.6 kPa. Tlakové ztráty jsou úměrné poměru odporových koeficientů.

3.3. Čerpání tekutin



Čas ke studiu: 3 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- znát třídy čerpadel a jejich typické představitele
- vybrat typ čerpadla podle účelu
- použít charakteristiku čerpadla pro kvantitativní popis možnosti čerpadla
- popsat možnosti čerpání plynů a výběr aparátů



Výklad

Při čerpání dodáváme tekutině mechanickou energii, která se zpravidla současně nebo později využije k uvedení tekutiny do pohybu – proudění.

Příkladem dodání energie jako **potenciální** je např. vytažení vědra ze studny rumpálem. Typicky se to používá u roztavených kovů, které se zvedají v pánvích jeřábem a přelévají se, protože je obtížné najít pro ně jiný způsob přepravy. Není zde ale nic specifického pro kapalinu a patří to k jednoduchým mechanickým problémům.

Čerpáním nazýváme případy, kdy tekutině dodáváme energii buďto jako **tlakovou** (čerpadla objemová) nebo **kinetickou** (dynamická čerpadla). Pro dopravu běžných kapalin a plynů jsou nejobvyklejší dynamická čerpadla s točivým rotorem, zejména čerpadla odstředivá a axiální vrtulová.

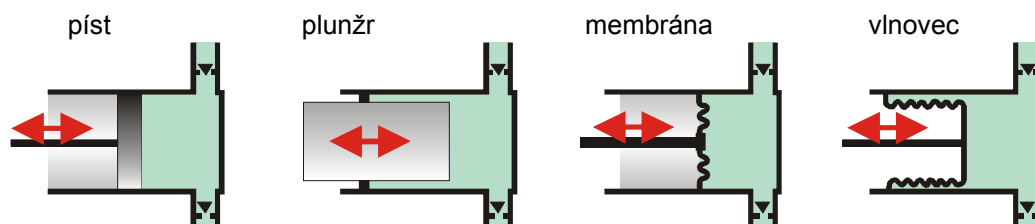
Čerpadla objemová

Práce objemových čerpadel spočívá v přemísťování určitého objemu z prostoru o nižším tlaku do prostoru o tlaku vyšším. Zvlášť jednoduchým příkladem je injekční stříkačka, kterou nasajeme tekutinu z jednoho prostoru a vytlačíme ji do prostoru jiného. Střední objemový průtok přemístěné tekutiny je dán součinem **plochy pístu** $/(\text{m}^2)$, jeho **zdvihu** $/(\text{m})$, a **frekvence** pracovních cyklů $/(\text{s}^{-1})$. Objemová čerpadla, například můžeme použít pro dávkování předepsaného průtoku, který můžeme nastavit např. proměnným **zdvihem pístu** nebo proměnnou **rychlostí** motoru, nahánějícího píst. Přemísťuje-li se tekutina z prostoru o tlaku p_1 do prostoru o tlaku p_2 , je důležitý rozdíl těchto tlaků $\Delta p = p_2 - p_1$. Množství dodané energie je $\int \Delta p \, dV$, pro kapalinu obvykle je to přímo $\Delta p \, V$. Výkon čerpadla je pak roven $\Delta p \, V^\circ / (\text{W})$. Tento výkon je omezen pouze maximálním tlakem, který je schopen motor překonat a který snese zařízení.

Při čerpání větších objemů připojujeme pracovní prostor čerpadla současně k **sacímu** a **výtlačnému** potrubí přes střídavě uzavírané **ventily**. Úkolem ventilu je propouštět kapalinu jenom požadovaným směrem. Uzavírání ventilu může být spřaženo s pohybem pístu, častěji však se pracuje se zpětnými ventily, uzavírajícími se samočinně protitlakem kapaliny, případně podporovaným působením pružiny nebo vlastní vahou.

Např. u běžné ruční pumpy na studniční vodu se nejčastěji pohybuje ve svislém válci píst, ve kterém je umístěn ventil, uzavírající se, je-li zatížen sloupцем kapaliny. Při pohybu pístu dolů zvedne kapalina ventil v pístu a pronikne nad něj. Při pohybu pístu vzhůru se ventil pístu uzavře a naopak se zvedne druhý ventil v sacím koši, propouštějící vodu ze studny do spodní části potrubí.

Podobně při nafukování pneumatik ruční hustilkou máme dva ventily; sacím ventilem je ohebná manžeta pístu hustilky, výtlačným ventilem je uzavírací ventilek pneumatiky.



Obr. 3.13. Objemová čerpadla s periodickým pohybem

Uspořádání s pístem je pro pochopení objemového čerpání nejjednodušší. Přesto dnes je nasávání a vytlačování tekutiny dosahováno jinými nástroji: **plunžr** je posuvný válec, zasunutý se do pracovního prostoru – jeho výhodou je snazší výroba, než vyžaduje vnitřní obrobení pístového válce, a pohodlnější těsnění. Zvětšovat a zmenšovat prostor je také možno bez těsnění pokud použijeme pružných stěn; klasickým případem jsou měchy kovářského fukaru nebo tahací harmonika. Soudobým řešením pružných stěn v technické praxi jsou **membrány** a **vlnovce** z kovu nebo z pryže a plastů. Hermetické oddělení pracovního prostoru membránového čerpadla od vnějšího prostoru bez použití těsnění je výhodné tam, kde se pracuje s nepříjemnými tekutinami (jedovaté, výbušné apod.).

Jako objemové čerpadlo s pružnými stěnami pracuje také srdce, kde spolupracují střídavě stlačované komory a jako ventily slouží chlopně.

Malé membránové čerpadlo s jednoduchou pryžovou membránou, stlačovanou elektromagnetem, určené pro čerpání vzduchu pod hladinu vody, znají akvaristé.

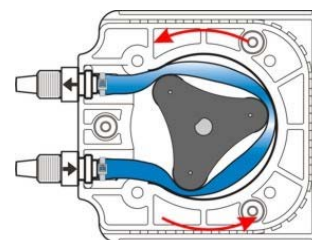
Jednou z nevýhod objemových čerpadel je skutečnost, že čerpané medium se pohybuje v jednotlivých pulsech. U plynů se to dá vyrovnat zařízením zásobníku plynu, ve kterém se pulsy vyrovnají. U kapalin můžeme zařadit tzv. **vzdušník (větrník)**, což je nádoba se vzduchovým polštářem, který se při prudkém přítoku kapaliny stlačí a udrží v průběhu cyklu rovnoměrnější tlak na výstupu z čerpadla. Podobný zásobník se umísťuje i na domácích vodárnách, i když tam bývá zpravidla čerpadlo odstředivé. V tomto případě je totiž vytvořený tlak vzduchu schopen vytlačit určité množství kapaliny do potrubí, takže při každém odběru malého objemu vody se nemusí spustit pohon čerpadla, jehož spínání a vypínání je řízeno nastavením hodnot minimálního a maximálního tlaku v zásobníku.

Vytlačování tekutiny z pružné trubice, jak to známe třeba u zubní pasty, se dá použít k čerpání zejména když postupně ve vlnách stlačujeme a uvolňujeme v řadě umístěné tlačky. Natéká-li za stlačený úsek díky pružnosti trubice nová kapalina, pak probíhá něco podobného jako se děje peristaltickými pohyby ve střevěch. **Peristaltická čerpadla**, ve kterých pružnou trubici například přejíždějí přitlačované válečky (Obr. 3.14.), hodí se i pro dopravu hrubozrnných suspenzí.

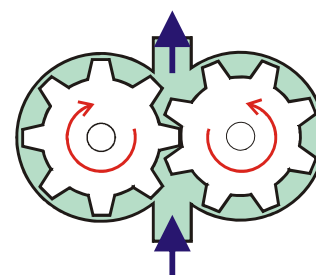
I další uspořádání, ve kterých je více pohyblivých částí, oddělují trvale

sací a výtláčný prostor. **Zubové čerpadlo** (Obr. 3.15.) stěhuje tekutinu v prostorech mezi ozubením. V prostoru, kde do sebe zuby zapadají při otáčení na jedné straně kapalina mezi zuby natéká, na druhé straně je vytlačována. Taková čerpadla se nedají použít pro čerpání kapalin, obsahujících hrubé pevné částice neboť by mohlo dojít k zadření pohyblivých součástí. Výhodné jsou naopak pro čerpání olejů nebo tavenin polymerů. Na rozdíl od klasického pístového čerpadla zde nejsou žádné ventily, stojící zubové čerpadlo nepropustí kapalinu ani jedním směrem a změnou směru otáčení zde změním směr proudění.

Podobně pracují i čerpadla se zasouvacím nebo ohebným ozubením



Obr. 3.14. Peristaltické čerpadlo



Obr. 3.15. Zubové čerpadlo



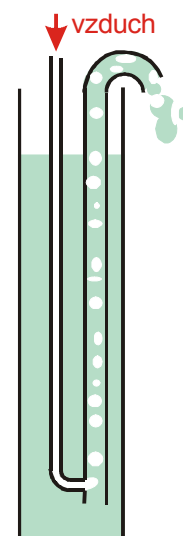
Obr. 3.16. Rotory šroubového čerpadla

Šroubová čerpadla (Obr. 3.16.) mají pouzdro se dvěma do sebe zapadajícími šrouby – levotočivým a pravotočivým; ty rovněž uzavírají sací a vytlačný prostor. Při protiběžném otáčení obou šroubů, posunuje se v osovém směru tekutina, uzavřená v prostoru mezi závitů.

Pro čerpání zvláštních materiálů může stačit i jediný šroub (šnek) tehdy, když dopravovaný polotekutý a poněkud soudržný materiál dává přednost osovému klouzání podél vrubované stěny před příčným pohybem přes vruby (Známostou aplikací je masový strojek.). Pro vysoceviskózní tekutiny, přilínající k povrchu stěn, dokonce stačí k uvedení do osového pohybu samotný hladký šnek v hladkém válcovém pouzdře, čehož se využívá ve šnekových vytlačovacích strojích (extruderech) na zpracování polymerů. Tato zařízení jsou ale zcela nepoužitelná pro běžné nízkoviskózní kapaliny, které přes ně protékají stejně dobře oběma směry aniž na ně rotující šnek výrazně působí. Poměrně univerzální je **jednovřetenové čerpadlo** s jednochodým šnekem, uloženým v pryžovém, dvojchodém šroubovicovém kanále.

Čerpadla hydrostatická

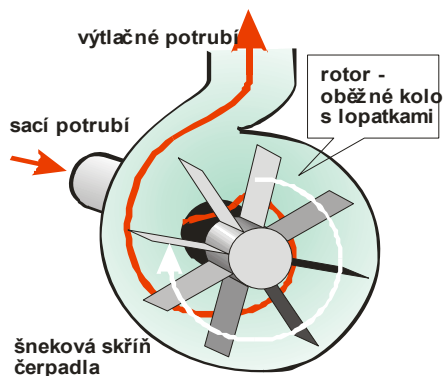
Jestliže do kapaliny začneme vsypávat těžší částice, vytvoříme těžší kapalnou suspenzi, která se bude snažit klesnout zatímco se okolní čirá kapalina bude pohybovat vzhůru. Běžnější situace je, uvádíme-li ke dnu kapaliny plyn. Stoupající bubliny způsobí, že sloupec provzdušněné kapaliny má nižší průměrnou hustotu a je tedy vyvažující čirou kapalinou nadzvedáván. Zpravidla se sloupec probublávané tekutiny vymezuje vodící trubici, ze které pak může být odváděna odčerpávaná tekutina. Toto čerpací zařízení se označuje jako pumpa **mamutka**, nebo jednoduše **airlift** (Obr. 3.17.). Maximální výška $h-h_0$, o kterou se dá kapalina zvednout, závisí na výšce h_0 hladiny nad místem uvádění plynu. Je-li hustota číré kapaliny ρ a objemový zlomek plynu v probublávané kapalině roven ε , pak střední hustota probublávané kapaliny je přibližně $\rho(1-\varepsilon)$ a z hydrostatiky vyplývá, že $h(1-\varepsilon) = h_0$. Airliftu se také využívá k vyvozování vnitřní cirkulace při promíchávání suspenzí, zejména tehdy když plyn vstupuje do reakce s kapalinou. Je to běžné zařízení pro loužení rudných suspenzí (hydrometalurgie), a velmi běžně i v aerobních biotechnologických reakcích (čištění vod, fermentace). Probublávání vrstvy roztaveného kovu nejprve kyslíkem a dále argonem je podstatnou součástí ocelářských technologií.



Obr. 3.17.
Mamutka
(airlift)

Čerpadla dynamická (hydrodynamická)

Tato čerpadla jsou nejběžnější při čerpání běžných kapalin a plynů do nepříliš vysokých tlaků. Dynamická čerpadla udělují tekutině primárně energii kinetickou stykem s pohyblivými součástmi nebo kontaktem s rychle proudícím pomocným tekutým médiem.



Obr. 3.18. Schéma vnitřního uspořádání
odstředivé čerpadla



Obr. 3.19. Jednostupňové odstředivé čerpadlo

Nejčastější je použití rotujících těles u **čerpadel odstředivých**. (Obr. 3.18.) Kapalina uzavřená v prostoru, rotujícím s úhlovou rychlostí ω $/(s^{-1})$ neboli s frekvencí otáčení $N/(s^{-1}) = \omega/(2\pi)$ má nulovou kinetickou energii v ose rotace a se vzdáleností r od osy rotace kvadraticky rostoucí kinetickou energii. Na průměru d je obvodová rychlost

$$u = r \omega = \pi d N$$

a kinetická energie

$$\frac{1}{2} \rho u^2 = \frac{1}{2} \rho (\pi d N)^2.$$

Když kapalinu propojíme s okolním nepohyblivým prostorem, ve kterém rotaci zastavíme, projevuje se na průměru d účinek rotace v ideálním případě jako přírůstek tlaku podle Bernoulliho rovnice

$$\Delta p_{ideální} = \frac{1}{2} \rho (\pi d N)^2 \quad (3-16)$$

nebo hydrostatické výšky

$$\Delta h_{ideální} = \frac{1}{2} (\pi d N)^2 / g. \quad (3-17)$$

Díky tomu může být vyvoláno proudění kapaliny odstředivým směrem. Během tohoto pohybu se kapalina roztáčí a zvyšuje svou kinetickou energii díky působení lopatek, tvořících součást **rotoru odstředivého čerpadla**. Roztočená kapalina ve **statoru** přemění část své kinetické energie na tlak. Užitím vícestupňových čerpadel, ve kterých jsou rotory, umístěné na společném hřídeli, prostřídány se statory, lze přírůstek tlaku navýšit několikrát. Skutečné hodnoty Δh pro jeden rotor jsou vždy o něco nižší než $\Delta h_{ideální}$ a klesají, protéká-li čerpadlem kapalina rychleji, takže se nestačí všechna roztočit až na rychlost rotoru. Odvod tekutiny z rotoru do statoru bývá u odstředivých čerpadel obvykle tečným směrem. Někdy je výhodné lopatky rotoru natočit jako u vrtule a odvádět tekutinu axiálně (ve směru osy), což je běžně známé u **axiálních vrtulových čerpadel**, ke kterým patří mnoho jednoduchých ventilátorů. Jejich vícestupňovým uspořádáním vzniká **turbokompresor**, který je důležitým prostředkem pro stlačování velkých průtoků plynů.

□ Charakteristika čerpadla

Hledáme-li čerpadlo vhodné pro nějaký konkrétní účel, srovnáváme čerpadla nejprve podle jejich charakteristiky.

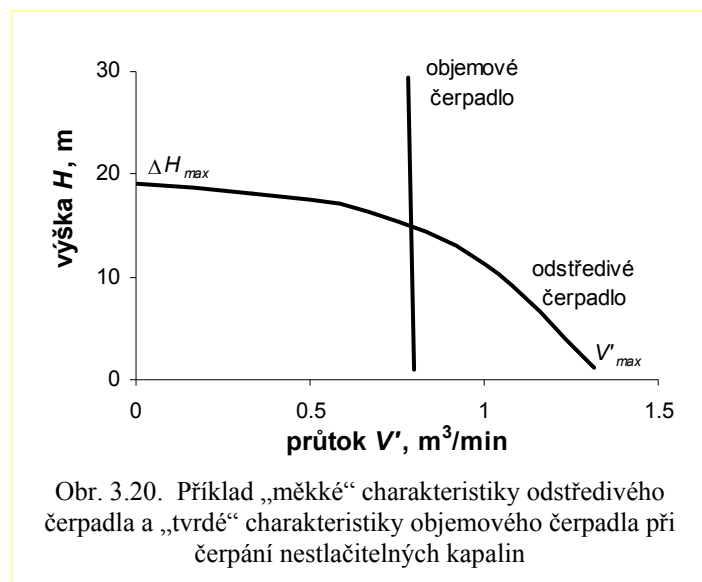
Pro všechna čerpadla existuje **maximální výška** Δh_{max} do které čerpadlo je schopné vytlačit tekutinu při nulovém průtoku. Existuje také **maximální hodnota průtoku** V'_{max} , při které už čerpadlo nestačí tekutině dodat více mechanické energie než se spotřebuje na samotný průtok čerpadlem, tedy při $\Delta h=0$. Celá závislost výšky Δh $/(m)$, do které čerpadlo vytlačí kapalinu, na objemovém průtoku V' $/(m^3/s)$ je klesající funkce, nazývaná **charakteristika čerpadla**. Obvykle se znázorňuje graficky. **Výkon čerpadla** je roven součinu

$$P \equiv \rho g \Delta h V' \quad (W). \quad (3-18)$$

Jeho nejvyšší hodnota je někde v centrální části charakteristiky a podle něj se dimenzuje motor čerpadla. (Na krajích charakteristiky klesá výkon k nule, neboť klesá buďto průtok nebo výška.)

Charakteristika je standardní součástí firemní literatury ke každému čerpadlu a dává zájemci informaci o tom kolik kapaliny a jak vysoko je čerpadlo skutečně schopno dopravit.

Pro dynamická čerpadla má charakteristika tvar křivky, znázorněný na obr.3.20. Pro objemová čerpadla na kapaliny je průtok prakticky málo závislý na výšce. Maximální výška je dána



mechanickými možnostmi náhonu a pevností součástí. Aby nedošlo k mechanické poruše při náhodném uzavření nebo ucpání výtlačného potrubí, bývá čerpadlo opatřeno pojistným ventilem. Zatímco zařazení dvou objemových čerpadel za sebou nemá obvykle opodstatnění, zařazením dvou stejných dynamických čerpadel za sebe zdvojnásobujeme při stejném průtoku čerpací výšku. Prakticky stejného účinku dosáhneme užitím víceústupňových čerpadel (Obr. 3.21.), ve kterých jsou rotory, umístěné na společném hřídeli prostřídány se statory, čímž lze přírůstek tlaku navýšit několikrát. Použití několika čerpadel na jedné potrubní trase může být nezbytné, když celková tlaková ztráta je vysoká. Kdybychom zde použili jediného velmi výkonného čerpadla, pak by potrubí bezprostředně za ním muselo být dimenzované na vyšší tlak.

Na ropovodech jsou přečerpávací stanice zhruba každých 100 km – ve složitějším terénu blíže. Podobně bývá opatřena série čerpadel i stoupačka vodovodu ve výškových stavbách.



Obr. 3.20 Malé dvoustupňové čerpadlo – druhý stupeň je nalevo ve vloženém válcovém tělese sevřeném svorníky

□ Sací a výtlačná výška a technické problémy provozu

Charakteristika čerpadla nám dává informaci, jakou energii můžeme čerpadlem dodat, když bude vše v pořádku. Nevhodným zapojením a provozováním čerpadla však je možno jeho funkci částečně nebo úplně znehodnotit. Zaprvé je nutno si uvědomit, že na vstupu do čerpadla může být jen nezáporný tlak tekutiny. I kdybychom zde dosáhli prakticky vakua, nepodařilo by se nám nasát z atmosférického tlaku vodu do výše více než zhruba 10 m. Obvykle pro výšku sacího potrubí pro vodu a běžné kapaliny počítáme maximálně 6 až 8 m (rozumějme tím celou ekvivalentní sací výšku h_{ekv}). Není vhodné abychom se blížili až k 10 m, neboť pak by při nízkém tlaku za lopatkami čerpadla mohlo dojít k takzvané **kavitaci** což je buďto prosté přetržení kapaliny nebo důsledek varu kapaliny při sníženém tlaku; vznikající a posléze zanikající bubliny vakua nebo nízkotlaké páry přitom vyvolávají mechanické rázy a způsobují zvýšenou korozi zařízení.

Rtuť bychom mohli vakuem vytáhnout do výšky okolo 760 mm, roztavenou ocel asi 1,3 m. Rovněž máme-li na sacím potrubí uzavírací člen (ventil, kohout, šoupě, apod.), v žádném případě jej nenecháváme uzavřený za chodu čerpadla! Chceme-li dopravit kapalinu z velké hloubky, pak musíme čerpadlo umístit do nižší části potrubí. Určitou výhodu skýtá, umístíme-li čerpadlo dokonce pod hladinu prostoru, odkud čerpáme kapalinu. Pak zůstává prostor čerpadla i při dlouhodobém odstavení plný kapaliny a po spuštění motoru začne vzápětí kapalina proudit.

Pro čerpání vody ze studní nebo z vrtů jsou populární ponorná čerpadla, celá umístěná do sacího prostoru. Musí mít motor a přívod elektřiny bezpečně těsně chráněný před vodou.

Uzavíracího členu na výtlačném potrubí hydrodynamického čerpadla se dá použít k regulaci průtoku a jeho úplné uzavření je užitečné při spouštění většího čerpadla, neboť tím snížíme výkon čerpadla a tedy ráz na motor a mechanické části. V žádném případě se o něco takového nepokoušíme u objemového čerpání kapalin! (Uzavírací členy okolo čerpadla jsou zde instalovány pro uzavření potrubí pouze při údržbě a opravách čerpadla.)

V čerpadle, umístěném nad hladinou, může při odstavení dojít k zavzdušnění čerpadla, u objemových čerpadel se tím zhoršuje těsnost ventilů i pohyblivých částí, díky stlačitelnosti plynu je nasávaný objem podstatně menší než zdvihový objem a případně neodstraněná pružná bublina plynu ovlivňuje nepřesnost dávkování i poté, co čerpadlo již nasálo kapalinu. U odstředivého čerpadla je sací tlak úměrný hustotě roztáčeného media, takže se vzduchem se dosáhne zhruba tisíciný sacího účinku oproti kapalinám. Aby se čerpadlo rozjelo, je tedy podstatné jeho komoru před spuštěním zaplnit kapalinou a mnoho čerpadel je pro tento účel přímo opatřeno nálevkou s kohoutem nebo se snadno vyjímatelnou zátkou. Běh čerpadla na sucho pozná zkušený pracovník podle zvuku. Při běhu některých čerpadel na sucho může dojít k zadření mechanických částí. U některých vodních čerpadel se někdy také záměrně ponechává trocha vody prokapávat ucpávkou pro chlazení a mazání hřídele. Existuje však celá řada jiných konstrukčních řešení ucpávek, jimiž lze naopak unikům čerpané tekutiny a její kontaminaci zabránit.

Čerpání plynů, kompresory

U čerpání plynů jsou dvě typické třídy problémů: čerpání velkých objemových průtoků a stlačování plynů.

Čerpání **velkých objemů** plynů proti **nízkému tlaku**:

Čerpání plynů do méně než 10 kPa je obvyklé ve vzduchotechnice – větrání, teplovzdušné topení (v malém rozměru fén na vlasy), digestoře, umělý tah v topeništích, vzduchové chlazení motorů a elektrosoučástek, nepřímé vzduchové chlazení kondenzátorů par a přímé chlazení vody. Dále při dopravě lehkých materiálů – vysavače prachu, doprava pilin, fukary pro dopravu sena a slámy.

V těchto případech se používají **dmychadla**, nejčastěji jednoduché hydrodynamické **ventilátory** s radiálním odvodem plynu (Obr. 3.22.) nebo axiální vrtulové ventilátory.

Pro **stlačování plynů** se používají **kompresory** – nejčastěji objemová čerpadla.

Silně stlačené plyny (až 100 MPa) potřebujeme pro vybrané reakce (syntéza amoniaku, hydrogenace v organických technologiích), tlaky do 2 MPa stačí pro probublávání vysoké vrstvy kapaliny (hydrometalurgické loužení rud, aerobní fermentace, čištění odpadních vod) pro pohon pneumatických strojů (pneumatická kladiva – sbíječky).

Na rozdíl od prakticky nestlačitelné kapaliny se u plynů v pracovním prostoru mění s tlakem i objem; jde zpravidla o rychlé a tudíž adiabatické stlačení a velká část dodané energie se přemění na teplo podle známých zákonů termodynamiky.

Přečerpání látky o objemu V_1 a tlaku p_1 do tlaku p_2 , kdy zaujímá objem V_2 vyžaduje energii W /(J):

$$W = V_1 (p_2 - p_1) \quad (3-19a) \text{ pro nestlačitelnou tekutinu}$$

$$W = V_1 p_1 \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \quad (3-19b) \text{ pro izotermní stlačení ideálního plynu}$$

$$W = \frac{\kappa}{\kappa - 1} V_1 p_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right] \quad (3-19c) \text{ pro adiabatické stlačení ideálního plynu.}$$

Pro běžné plyny je $\kappa \approx 1,4$.

Při výpočtech se stlačitelnými tekutinami je nutno počítat někde s celým objemem pracovního prostoru; nestačí např. znát pouze samotný zdvihový objem pístu.

Adiabatickým stlačením se teplota plynu zvyšuje, čehož se využívá v **tepelných čerpadlech** (např. pro zvýšení teploty topné páry, ale také při vytápění Nové auly VŠB TU Ostrava), expanze se obráceně používá při strojním chlazení (ledničky, zkapalňování vzduchu). U reálných plynů ještě přistupuje vliv Joule-Thomsonova tepla.

K dosažení vysokého tlaku je nutno zpravidla použít vícestupňové stlačování. Pro velké objemy se užívá dynamických čerpadel s mnoha řadami rotorů prostřídáných statory - **turbokompresorů**. Protože objem stlačovaného plynu postupně klesá, bývají také rotory v jednotlivých stupních turbokompresoru konstruovány jako postupně zmenšované. Rychloběžné, dobře mechanicky vyvážené a potřebně pevné rotory způsobují, že jde o investičně drahá zařízení, konzumující také poměrně mnoho energie.

Rozebraný turbokompresor vypadá podobně jako parní turbína (obr. 3.23), jejímž úkolem v elektrárně je vícestupňově odebírat expandující tlakové páře její energii.



Obr. 3.22. Provozní ventilátor,
 $d = 1,6 \text{ m}$, $N = 16 \text{ s}^{-1}$,
 $V' = 20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $\Delta p = 1,5 \text{ kPa}$

V poslední době se místo starších objemových kompresorů s písty stále více uplatňují rychloběžné **šroubové kompresory** se dvěma šrouby – jako mají šroubová čerpadla. Dnes se dají vyrobit přesné šrouby o velkém průměru s proměnným stoupáním a hloubkou závitů, takže se objem (a tedy i tlak) čerpaného plynu mění postupně. Vysokorychlostní šroubové kompresory dávají plynulý tok stlačeného plynu.

Pro **vytváření vakua** se používají **vývěvy**, které mohou mít podobnou konstrukci jako kompresory. Při nezbytnosti odvádět velké množství plynů nebo par jsou spíše vhodné parní ejektory, které pracují na stejném principu jako vodní vývěva na obr.3.2. V parních ejektorech je hnacím médiem pára, která získala tlakovou energii zahřátím, tedy za cenu levnější tepelné energie.

Hydrodynamické motory

Obrácený efekt než čerpadla mají hydrodynamické motory, které tekutině odebírají její mechanickou energii a odvádějí ji na v nějaké jiné formě pryč. Nejstarší aplikací je mlýnské kolo. Modernější hydrodynamické motory do jisté míry připomínají čerpadla obráceně zapojená. Parní stroj, vládnoucí průmyslu a dopravě asi 150 let, je podobný pístovému čerpadlu, pohybem jehož pístu je současně ovládáno zavírání a otevírání vstupního a výstupního ventilu. Podobně pracuje i výbušný motor s výhradou toho, že tekutina dostává tlakovou energii teprve hořením uvnitř válce.

Moderním zařízením jsou turbíny.

Parní turbíny připomínají vysokoobrátkové turbokompresory s velkým počtem šikmých lopatek rotoru a s mnohastupňovou řadou rotorů a statorů (Obr. 3.23.). Protože zde pára ztrácí postupně tlak, roste také její objem, volí se v této řadě postupně zvětšující velikost lopatek tak, aby se energie páry přeměnila na energii rotoru co neúčinněji. U elektrárenských turbín jsou průměry turbín a frekvence otáčení velké, takže také síly na rotoru jsou vysoké; výroba zařízení vyžaduje kvalitní materiály a jejich precizní zpracování. Ještě náročnější jsou plynové turbíny, do kterých jsou vháněny spalné plyny o vysoké teplotě a tlaku v turbovrtulových motorech nebo (v podstatně větším rozměru) v paroplynových elektrárnách.

Větrné motory, pracující s podstatně menším tlakem, se přidržují především koncepce axiálního proudění a jsou konstruovány nejčastěji jako vrtule o průměru až 100 m, dnes se štíhlými listy naklápěnými podle síly větru (Obr. 3.24.).

U **vodních turbín** se podobně dají naklápět rozměrnější lopatky **Kaplanovy turbíny**. Jinou koncepci má např. **Peltonova vodní turbína** (Obr. 3.25.), připomínající obráceně zapojené odstředivé čerpadlo, samozřejmě s nesrovnatelně menším počtem lopatek a větším průtočným průřezem než mají turbíny parní.

Každému hydrodynamickému motoru můžeme přiřadit vztah mezi průtokem a změnou mechanické energie, podobný jako je charakteristika čerpadla.

Skládování mechanické energie

Největší zdroje energie – parní elektrárny založené na spalování nebo na štěpné reakci nemohou rychle reagovat na změny odběru. Větrné elektrárny nedodávají energii podle žádného plánu. Ukládání energie do vratné chemické reakce (např. elektrické akumulátory, výroba vodíku nebo uhlovodíků) vyžaduje velkou hmotnost přeměňovaných látek a snese (vzhledem k vedlejším reakcím) jen omezený počet cyklů. Jedním z řešení je uložit energii dočasně jako energii mechanickou a podle potřeby ji uvolňovat. Sledují se dvě cesty používající kombinace čerpadlo – turbína. Přecherpávací elektrárny čerpají přebytečnou elektrinou vodu do vysoko položené nádrže, odkud se při energetické špičce vypouští na



Obr. 3.23. Oběžné kolo parní turbíny



Obr. 3.24.. Vrtule větrné elektrárny



Obr. 3.25. Oběžné kolo Peltonovy turbíny

turbínu (Dlouhé Stráně v Jeseníkách: nádrž 3 miliony m³, výškový rozdíl 500 m, potrubí průměru 3,6 m špičkový výkon 650 MW). Další možností je ukládat energii do vzduchu stlačeného do podzemních prostor. Většinou jde o utěsněné opuštěné rudné doly. V současné době se však podzemní prostory přednostně využívají ke skladování plyných paliv.



Pojmy k zapamatování

Čerpadla objemová, hydrostatická, hydrodynamická

Píst, plunžr, membrána, vlnovec, zdvih, frekvence

Peristaltické, zubové, šroubové čerpadlo

Mamutka, airlift

Odstředivé, radiální čerpadlo

Axiální čerpadlo, vrtule

Charakteristika čerpadla, průtok, sací a výtlačná výška, výkon

Dmychadla, ventilátory, kompresory, turbokompresory

Vývěvy



Příklady

Příklad 3.2.

Příkon čerpadla

8000 kg/h 98 %ní kyseliny sírové má být čerpáno při teplotě 20°C potrubím o světlosti 25 mm z nádrže A do výše položené nádrže B. Výtok kapaliny do nádrže B leží o 20 m výše než hladina kapaliny v nádrži A. Potrubí je nové litinové dlouhé 47,5 m a jsou v něm dvě 90° kolena, přímý otevřený ventil. Jaký je potřebný příkon elektromotoru čerpadla, je-li celková účinnost čerpadla 50%? Kyselina sírová má při dané teplotě hustotu 1840 kg/m³ a viskozitu 25 mPas. Ztráty tlaku u výtoku z nádrže A lze zanedbat.

Postup: Pro výpočet příkonu čerpadla je nutné znát dopravní výšku čerpadla. Dopravní výšku určíme z energetické bilance toku (Bernoulliho rovnice – výškový tvar). Bilanci provedeme pro hladinu nádrže A (index 1) a pro výtok z potrubí do nádrže B (index 2). V bilanci se neprojeví tlakové členy, protože obě nádrže jsou otevřené do atmosféry a je v nich tudíž stejný tlak. Střední rychlost kapaliny, která určuje charakter proudění kapaliny, vypočteme z hmotnostního průtoku, hustoty a geometrie potrubí. Vypočteme Re a určíme koeficient tření. Vše využijeme k výpočtu ztrátové výšky. Poté vypočteme dopravní výšku a nakonec příkon čerpadla.

Příkon čerpadla:

$$P = \frac{\dot{V} \rho H g}{\eta} = \frac{\dot{m} H g}{\eta}$$

Dopravní výška:

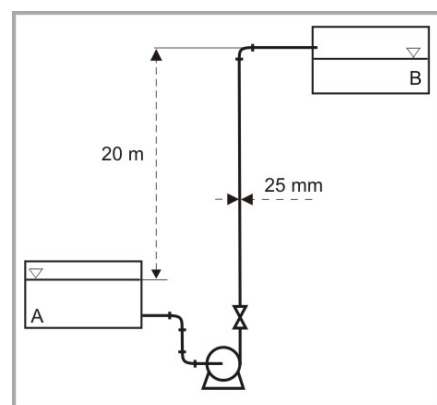
$$H = z_2 - z_1 + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + H_z$$

Ztrátová výška:

$$H_z = \lambda \frac{l u^2}{d 2g}$$

Reynoldsovo číslo:

$$Re = \frac{u d \rho}{\mu}$$



Čerpadlo

Střední rychlost kapaliny: $u = \frac{\dot{m}}{\rho S}$

Výpočet:

$$u = \frac{\dot{m}}{\rho S} = \frac{8000}{3600 \cdot 1840 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0.025^2} = 2.46 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{u d \rho}{\mu} = \frac{2.46 \cdot 0.025 \cdot 1840}{0.023} = 4526, \dots \text{turbulentní proudění}$$

Relativní drsnost potrubí ε/d : absolutní drsnost litinového potrubí je $\varepsilon = 0.03 \text{ mm}$
 $\varepsilon/d = 0.03/25 = 0.012$

Koeficient tření odečteme z Moodyho diagramu $\lambda = \lambda(Re, \varepsilon/d)$; $\lambda = 0.05$

Celková délka potrubí včetně ekvivalentních délek armatur:

$l_e = 2 \text{ kolena } 90^\circ + \text{tavorvka T} + \text{přímý ventil}$

$$l_e = 2 \cdot 30 \cdot 0.025 + 10 \cdot 0.025 + 90 \cdot 0.025 = 4 \text{ m}$$

$$\text{Ztrátová výška: } H_z = \lambda \frac{l_e u^2}{d \cdot 2g} = 0.05 \frac{41.5 \cdot 2.46^2}{0.025 \cdot 2 \cdot 9.81} = 31.7 \text{ m}$$

V rovnici bilance pro dopravní výšku je geodetická výška zadána, ztrátovou výšku jsme právě vypočetli, zbývá tedy upřesnit „kinetickou“ výšku danou rozdílem rychlostí proudění kapaliny v průřezech 1 a 2. Z porovnání rychlostí proudění kapaliny v průřezu 1 a 2 vyplývá, že rychlost proudění kapaliny v průřezu 1, tedy u hladiny nádrže A, je vzhledem k rychlosti kapaliny v průřezu 2, výtoku do nádrže B, zanedbatelná. Dosadíme do bilance:

$$H = z_2 - z_1 + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + H_z = 20 + \frac{2.46^2 - 0}{2 \cdot 9.81} + 31.7 = 52 \text{ m}$$

Příkon elektromotoru čerpadla je v kW pokud dosadíme veličiny v následujících jednotkách $m[\text{kg/s}]$, $H[\text{m}]$,

$$P = \frac{\dot{V} \rho H g}{\eta} = \frac{\dot{m} H g}{\eta} = \frac{8000 \cdot 52 \cdot 9.81}{3600 \cdot 0.5 \cdot 1000} = 2.27 \text{ kW}$$

Odpověď:

Pro daný případ je zapotřebí příkon 2.27 kW.



3.4. Usazování



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- vysvětlit chování suspenze v gravitačním poli
- popsat průběh usazování v čase a charakterizovat konečný stav
- provést bilanci usazování
- popsat odpor při pohybu částice v kapalině a veličiny, které jej ovlivňují
- porozumět příčinám neideálního usazování částic
- stanovit odstředivou sílu a vysvětlit její použití



Výklad

Usazování částic v tekutině

Usazování – sedimentace je proces ve kterém se vlivem rozdílné hustoty oddělují dvě fáze. Může to být děj žádoucí pro separaci materiálů i nežádoucí (*např. usazování pigmentu v nátěrových hmotách*). Může to být děj probíhající v několika sekundách, ale jindy mohou být jeho časovým měřítkem měsíce a roky. Spojitým prostředím bývá kapalina nebo plyn, tuhé částice vytvářejí **usazeninu**, kapky nebo bubliny se po odsazení obvykle spojují (tomuto ději říkáme koalescence) a vytvářejí novou spojitou fázi. Hnací silou usazování bývá nejčastěji **tíže**, využívá se však také **setrvačnosti** v odstředivkách a v cyklonech. Pro kvantitativní hodnocení usazování je podstatné znát výsledný stav a rychlost, kterou se k němu dospívá. Potřebné veličiny můžeme stanovit laboratorním modelovým experimentem, pro idealizované případy je můžeme předpovědět na základě jednoduchých teorií.

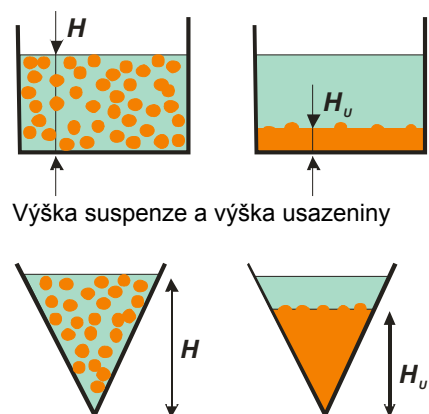
Nejběžnějším je případ **tuhých částic** o hustotě ρ_p suspendovaných v kapalině o hustotě $\rho_L < \rho_p$, v gravitačním poli. Při tom v počátečním okamžiku předpokládáme rovnoměrně rozmístěné částice - tzv. „homogenní suspenzi“.

(Pozor! fyzikální chemik homogenním materiálem označuje výhradně jednofázové soustavy; s jistými výhradami nanometrické koloidy !)

Výchozím bodem je suspenze charakterizovaná podílem tuhé fáze např. obsahem s_0 pevných částic (sušiny) v jednotce objemu $/(kg \text{ sušiny}/m^3 \text{ suspenze})$ nebo jejich objemovým zlomkem c_0 $/(m^3 \text{ sušiny}/m^3 \text{ suspenze})$. Výsledný stav usazeniny také někdy charakterizujeme vlhkostí $/(kg \text{ kapaliny}/kg \text{ sušiny})$.

Rovnovážný stav

Po dostatečně dlouhé době se shromáždí u dna vrstva usazeniny (sedimentu) o složení s_U (nebo c_U), které nezávisí na původní koncentraci suspenze, a které je třeba získat měřením. Jen ve zvláště jednoduchých případech se dá vypočítat na základě představy o geometrickém uspořádání částic v usazenině. Porozita $e_U = 1 - c_U$ může být u volně usazených kulových částic 0,3-0,5, nižší může být po mechanickém prohrabání nebo setřepání, zejména pro soubory nestejně velkých částic. Naproti tomu pro vláknité částice bývá e_U pod 0,05 a nízké porozity usazeniny lze také očekávat u koloidních částic udržujících si odstup působením



Obr. 3.26. Usazování v kuželovitém prostoru počáteční a konečný stav

odpudivých sil, například u usazenin jílu.

Se znalostí c_0 a c_U můžeme určit objem V_U usazeniny, vyloučivši se z objemu V suspenze. Z bilance tuhé fáze vyjde

$$V_U = V c_0 / c_U \quad (3-20)$$

V usazovací nádrži konstantního půdorysu lze tento poměr aplikovat i na výšku usazeniny H_U závisící na původní výšce suspenze H

$$H_U = H c_0 / c_U \quad (3-21)$$

Ke stanovení malých obsahů tuhé fáze v suspenzi se využívá měření výšky usazeniny v kuželovité nádobě, kde geometrie říká, že

$$V_U / V = (H_U / H)^3 \quad (3-22)$$

takže

$$c_0 = c_U (H_U / H)^{1/3} \quad (3-23)$$

Dynamika usazování

Každá těžší částice suspenze se vydává na cestu směrem ke dnu, takže se u hladiny začíná objevovat vrstva bez částic. Jestliže se rychlost částic rychle ustálí na konstantní **usazovací rychlosti** u_U , pak po době t má vyčiřená vrstva výšku

$$H_L = u_U t, \quad (3-24)$$

přitom částice dorazivší ke dnu se shromažďují v usazenině. V průběhu doby roste výška H_U v usazováku konstantního průřezu tak, že celkové množství tuhé fáze zůstává zachováno:

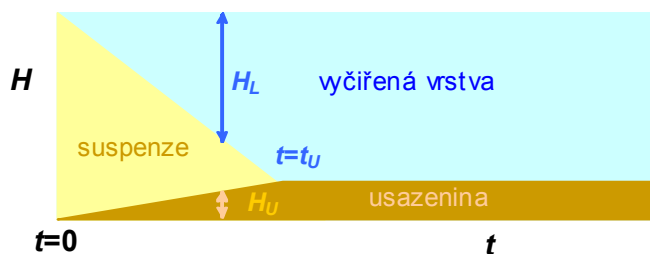
$$H c_0 = (H - H_L - H_U) c_0 + H_U c_U \quad (3-25)$$

Spojením vztahů (3-23) (3-24) dostaneme vzorec pro výpočet výšky usazeniny v čase

$$H_U = \frac{c_0}{c_U - c_0} H_L = \frac{c_0}{c_U - c_0} u_U t \quad (3-26)$$

Časový průběh sedimentace ve sloupci o výšce H pak zaznamenává graf, ze kterého je patrné, že proces je ukončen po proběhnutí doby t_U , pro kterou platí

$$t_U = \frac{H (c_U - c_0)}{u_U c_U} \quad (3-27)$$



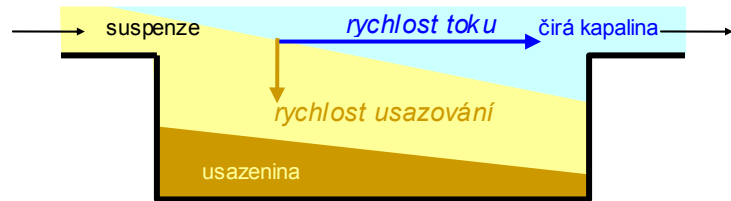
Obr. 3.30. Časové rozdělení vrstev při usazování (Kynchův model)

Situace se stává poněkud méně přehlednou, obsahuje-li suspenze částice s různými usazovacími rychlostmi. Rozhraní nejsou pak zcela výrazná, vrstva zcela čiré kapaliny je dána rychlostí nejpomalejších částic, zatímco usazenina se vytváří nejprve z nejrychlejších částic a v postupu času se v ní částice přeskupují a k jejímu sesedání dochází i po čase t_U . V takovém případě je možno užít sedimentace ke **třídění částic** buďto podle velikosti nebo podle hustoty. Sledováním usazování dané suspenze ve válci můžeme stanovit v laboratorní sedimentační rychlost u_p /(m/s) i objemový zlomek c_U /(m³ sušiny/m³ usazeniny). S jejich pomocí pak můžeme předpovědět pro zadané c_0 a H potřebnou dobu usazování ve vsádkovém provozním usazováku daného tvaru.

Kontinuální usazování

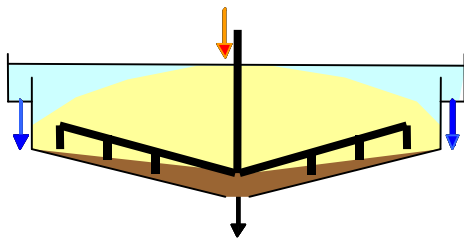
Při kontinuálním usazování protéká suspenze v nejjednodušším případě usazovací nádrží. Typické rozložení koncentrací je schematicky znázorněno na obrázku 3.31..

Tangenta úhlu rozhraní mezi suspenzí a vyčeřenou kapalinou je dána poměrem pádové rychlosti a rychlosti postupu tekutiny protékající usazovací nádrží. Objem kapaliny vyčeřené za jednotku času je dán součinem pádové rychlosti a plochy půdorysu nádrže. Na hloubce nádrže tento výkon nezávisí, závisí však na něm doba, za kterou se nádrž naplní usazeninou. Průmyslové usazovky pro zachycování většího množství tuhé fáze se proto často opatřují kontinuálním nebo periodickým vynášením usazeniny aby nemusely být zbytečně hluboké.

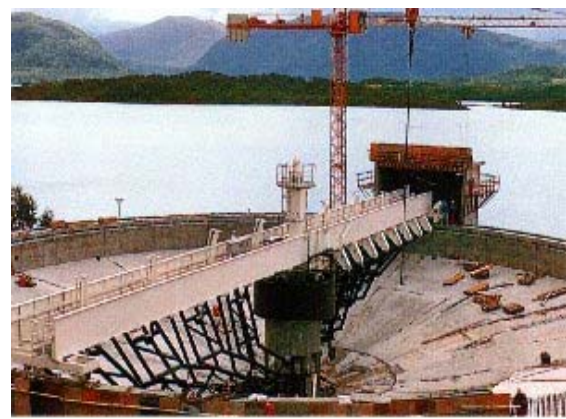


Obr. 3.31 Rozhraní vrstev v průřezu usazovák

Kruhové usazovky jsou válcové nádoby s přívodem suspenze k ose a s odvodem po obvodu. Postupná rychlost tekutiny v ve směru k obvodu klesá, takže vrstva čiré kapaliny je u výtoku nejhlubší. Nejčastějším typem, užívaným velmi často v úpravnách odpadních vod, jsou **Dorrové usazovky** (Obr. 3-31,32). Ty jsou obvykle vybaveny pomalu se otáčejícím mostem, na němž jsou zavěšena hrabla zasahující až do prostoru usazeniny. Jejich účinkem se usazenina ještě ztuhne a zároveň se shrnuje ke středu kuželového dna, odkud je odčerpávána. Jestliže tekutina obsahuje i nečistoty lehčí (jako např. odpadní voda), vybavuje se usazovák i horními hrabli sbírajícími plovoucí vrstvu nečistot z hladiny.



Obr. 3.32. Kruhový usazovák Dorrova typu



Obr. 3.33. Dorrov usazovák ve výstavbě

Teorie usazovací rychlosti

Pro odhad usazovací rychlosti slouží poznatky o pohybu jednotlivé částice v tekutině. Východiskem jsou znalosti o energii ztracené při pohybu částice. S ní souvisí síla F , která se musí vynaložit na udržení částice v pohybu. Obráceně pak lze působící síle přičíst rychlost částice. Zvláštním případem je pádová rychlost u_p , příslušející síle vyvolávané vlastní tíží částice. Částice o objemu V_p a měrné hmotnosti ρ_p má hmotnost $m_p = \rho_p V_p$ a ve směru tíže na ni působí síla $F_+ = \rho_p V_p g$, vyvažované podle Archimédova zákona silou vztlaku $F_- = \rho_L V_p g$. Celková působící síla, která je zde

$$F = F_+ - F_- = (\rho_p - \rho_L) V_p g,$$

uvádí částice do pohybu, jenž se díky odporu prostředí ustálí na konečné pádové rychlosti částic u_p . O směru a rychlosti pohybu částic rozhoduje tedy významně rozdíl hustoty částice a tekutiny. Mají-li částice větší hustotu, pak klesají ke dnu, částice menší hustoty (piliny ve vodě, struska v tekutém kovu, tuk v mléku, bubliny plynu v kapalinách) vyplouvají nahoru. Při rovnosti hustot k usazování nedochází – pak k mechanickému oddělení částic ze suspenze musíme zvolit jiný postup, obvykle filtraci.

Odpor při ustáleném pohybu koule v tekutině

Kulová částice o průměru d_p (m) pohybující se rychlostí u (m/s) překonává odpor prostředí vyjádřený silou F (kg m/s²), která může obecně záviset již jen na vlastnostech okolní tekutiny, tedy na viskozitě μ (kg/(m s)) a na hustotě ρ (kg/m³). Rozměrová analýza nám umožňuje snížit počet

proměnných na 2 bezrozměrové veličiny. Za účelné se pokládá vzít jedno seskupení, které neobsahuje sílu F ; pak vychází Reynoldsovo číslo pro pohyb koule

$$Re_P \equiv \frac{d_P u \rho}{\mu}$$

a druhé seskupení, které neobsahuje viskozitu, tedy např. skupinu

$$C_D \equiv \frac{8F}{\pi d_P^2 \rho u^2}.$$

Zavedení nadbytečného násobného faktoru $8/\pi$ nabývá smyslu při obecnější definici bezrozměrového **součinitele odporu** C_D vztahem

$$C_D \equiv \frac{F/S_0}{\frac{1}{2} \rho u^2}, \quad (3-28)$$

ve kterém S_0 je čelní plocha částice (pro kouli $S_0 = \pi d_P^2/4$) a polovina ve jmenovateli vztahuje výraz k obvyklému zápisu ztrátového členu Bernoulliho rovnice. Tato definice silně připomíná definici odporového součinitele ζ pro proudění v potrubích, kolem překážky nebo pro proudění vrstvou. Pro obtékání koule existuje jednoznačné funkční přiřazení $C_D(Re_P)$.

Z hydrodynamického náhledu je zřejmé, že o režimu proudění zde rozhodují dva typy sil. Setrvačné, spojené s rychlostí přemísťování tekutiny kolem překážky a viskózní spojené s deformací tekutiny během obtoku. Jejich poměr je charakterizován právě Reynoldsovým číslem a lze očekávat, že pro malá Re_P je proces nezávislý na setrvačnosti, z rozměrové analýzy vypadne hustota ρ a celý děj lze popsat konstantou

$$C_D Re_P = \text{konst.} \quad \text{pro } Re_P \rightarrow 0 \quad (3-29)$$

Teoreticky odvozené pohybové rovnice pro pohyb jednotlivé koule v prostředí nepohyblivé tekutiny se po zjednodušení předpokladem $Re_P=0$ dají transformovat na řešitelné obyčejné diferenciální rovnice. 150 let staré Stokesovo řešení pro kouli při $Re_P \rightarrow 0$ se dá vyjádřit vztahem

$$C_D Re_P \equiv \frac{8F}{\pi d_P \mu u} = 24, \quad (3-30)$$

což s dostatečnou přesností lze přijmout při $Re_P < 1$.

Při vysokých Re_P můžeme naproti tomu očekávat, že se bude málo projevovat viskozita, z čehož by vyplývala nezávislost C_D na Re_P . Skutečně, experimenty ukazují, že můžeme počítat

$$C_D = 0,44 \quad \text{pro } 500 < Re_P < 3 \cdot 10^5 \quad (3-30)$$

Funkci $C(Re_P)$ zachycují příručky zpravidla ve formě grafu, ale lze ji také po částech interpretovat semiempirickými formulemi.

Přibližný Brauerův vztah

$$C_D \approx \frac{24}{Re_P} + \frac{4}{Re_P^{0,5}} + 0,4 \quad (3-32)$$

hezky vyhovuje pro celou oblast $Re < 3 \cdot 10^5$.

Zvláštní chování při $Re_P > 3 \cdot 10^5$ se přičítá na vrub dalšímu vývoji turbulence, avšak tato oblast leží až v ohnisku zájmů letectví a balistiky a v procesních technologiích ji zpravidla nepotkáváme.

Odpor nekulových těles

Na základě rozměrové analýzy je možno i pro každou jinou skupinu geometricky podobných těles nalézt funkci $C_D(Re_P)$, mající podobný



Sir George Gabriel
Stokes
(1819-1903),

Tab.3.2 Odporový součinitel nekulových těles
při vyšších Re_P

situace	C_D
nátok kolmo na plochý pás	2
parašutista s otevřeným padákem	1,4
příčný obtok válcové tyče	1,2
kolmý nátok na kruhový terč	1,2
autobus	0,6
koule	0,44
osobní auto	0,2-0,4
kapkovité těleso	0,2
křídlo letadla	< 0,1

charakter jako pro kouli. Pro běžné tvary jsou grafy proměřených průběhů rovněž dostupné v příručkách. Pro oblast Re_P okolo 10^4 jsou přibližně konstantní hodnoty tabelovány (Tab. 3.2).

Při nižších rychlostech proudění se dostáváme k problému co dosazovat za charakteristický rozměr místo d v Reynoldsově čísle. Jednou z možností by bylo zvolit takové d aby pro $Re_P \rightarrow 0$ platil vztah (3-30). Ukazuje se však (na rozdíl od případu koule), že v některých jiných, zdánlivě stejně jednoduchých situacích se nedají pohybové rovnice pro $Re=0$ vůbec řešit (Stokesův paradox proudění kolem válce). Proto se hledá definice d_P daná čistě geometrií částic. Účelné je vyjít z veličin jednoznačně definovaných pro každé tělísko, například objemu V_P a povrchu S_P . Pro kouli platí $V_P = S_P d_P/6$ takže se naskytá myšlenka zavést ekvivalentní průměr nekulové částice vztahem

$$d_P = 6V_P / S_P \quad (3-32)$$

(nehodí se to ale pro ploché destičky s prakticky nulovým objemem, kde musíme postupovat jinak). Přestože každému tvaru částice odpovídá jiná závislost $C_D(Re_P)$, pro orientační úvahy můžeme vyjít z diagramu pro kouli nebo ze vztahu (3-32) neboť odchylky od něj nejsou dramatické.

Rychlost usazování vlivem tíže

Znalosti vztahu (*16) můžeme využít například pro stanovení viskozity ze známého rozměru částice a její pádové rychlosti v_P při ustáleném usazování pod vlivem tíže, kdy

$$F = (\rho_P - \rho_L) V_P g = (\pi/6) (\rho_P - \rho_L) g d_P^3, \\ C_D \equiv \frac{4 (\rho_P - \rho_L) g d_P}{3 \rho u_P^2} \quad (3-34)$$

Častý případ, kdy řešíme závislost rychlosti částice na jejím rozměru nebo kdy stanovujeme rozměr částic z pádové rychlosti, si žádá transformovat vztah tak, aby v jedné proměnné nebyla rychlost a v druhé proměnné nebyl průměr. Tomu vyhovují např. skupiny

$$Ar \equiv \frac{3}{4} C_D Re_P^2 \quad \text{a} \quad Ly \equiv \frac{4}{3} Re_P / C_D,$$

nazývané někdy Archimedovo a Lyaščenkovo číslo.

Za podmínek laminárního pádu v gravitačním poli je jednoznačný vztah mezi pádovou rychlostí a průměrem kulové částice možno vyjádřit pomocí Stokesova zákona (3-33), takže

$$u_P = \frac{d_P^2 (\rho_P - \rho_L) g}{18 \mu} \quad \text{pro} \quad Re_P \rightarrow 0 \quad (3-35)$$

Pomocí uvedeného vztahu můžeme také stanovit ze změřené pádové rychlosti rozměr částic. Höpplerův viskozimetr využívá podobného vztahu ke stanovení viskozity z doby pádu kuličky v trubce.

V některých výševiskózních kapalinách je pro zrychlení sedimentace možné snížit viskozitu ohřevem. (Odstranění střípků skla z medu)

Všimněme si, že pro částice těžší než tekutina platí formálně stejné zákonitosti sedimentace jako pro částice lehčí, které sedimentují vzhůru.

Jak byste uspořádali zařízení pro jejich usazování? Jak fungují normé stěny pro zachycování ropných látek, uniklých do řek?

Pádová rychlost se obecně zvyšuje s rostoucí velikostí částic. Tam kde chceme zrychlit sedimentaci, používáme činidla, kterými se částice shluknou do větších objektů: flokulace, koagulace, vločkování.

(Vysoká Reynoldsova čísla vedou k výpočtu rychlosti pomocí (3-31):

$$u_P = \sqrt{\frac{4 d_P (\rho_P - \rho_L) g}{3 \rho_L C_D}} \quad \text{pro} \quad Re_P \rightarrow \infty \quad (3-35))$$



Loránd Eötvös
(1848-1919)

Tyto podmínky jsou běžné pro pád větších kulových těles v plynech nebo v běžných nízkoviskózních kapalinách a sedimentace takovýchto částic bývá velmi rychlá.

□ Usazování tekutých částic, bubliny, kapky

Pro tekuté částice je účelné studovat odděleně případ kulových částic. Tekutinové částice jsou udržovány v kulovém tvaru **mezifázovým napětím** σ $/(N\ m^{-1})$. V nejčastějším případě, kdy jednou z fází je vzduch (nasycený při dané teplotě parou dané kapaliny), označujeme σ jako **napětí povrchové**, které je pro řadu kapalin tabelováno. Povrchová síla, která se snaží minimalizovat mezifázovou plochu bubliny nebo kapky je úměrná součinu σd_p , tíže, která se snaží vyrovnat mezifázové plochy do roviny je úměrná $|\rho_p - \rho_c| g d_p^3$, kde ρ_c je hustota spojitě fáze. Z rozměrové analýzy vychází bezrozměrové Eötvösovo číslo

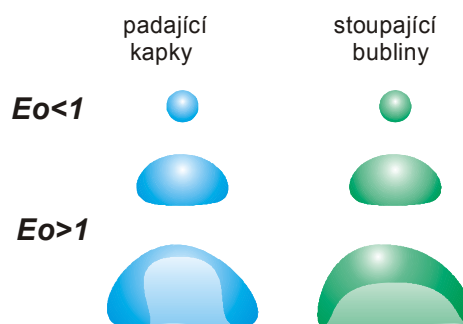
$$Eo \equiv \frac{d_p^2 |\rho_p - \rho_c| g}{\sigma} \quad (3-37))$$

a na základě experimentálních pozorování je možno potvrdit, že pro malé $Eo \ll 1$ jsou tekuté částice v podstatě kulové, pro $Eo > 1$ nabývají při sedimentaci zploštělého a posléze miskovitěho tvaru. Ve vysoceviskózních kapalinách mívají i další bizarní tvary.

U pádu nekulových částic se v některých případech nastává stabilní poloha (např. u tuhých těles kapkovitého tvaru), jindy vzniká nestabilita a poloha i rychlost částice osciluje (padající listy). U větších částic tekutiny (dešťové kapky) osciluje i jejich tvar.

Rychlost kulových tekutých částic se řídí podobnými zákony jako pádová rychlost tuhých částic; v případě neznečištěného pohyblivého povrchu bývá o málo vyšší. Pro větší částice se dostáváme do oblasti vyšších Re_p a vlivem jejich zplošťování je pro ně typická malá proměnnost pádové rychlosti s velikostí; typická rychlost vzestupu bublin ve vodě je asi 0,3 m/s a rychlost pádu kapek vody ve vzduchu je okolo 5 m/s.

V plynokapalinových (parokapalinových) směsích nebývá tedy rychlost oddělování fází zpravidla problémem, pokud jde o jednotlivé bubliny či kapky.



Obr. 3.34. Běžné tvary kapek padajících v plynu a bublin stoupajících v kapalině. Kapka padající ve vzduchu má zásadně jiný tvar než je „kapkovitý tvar“ kapky, stékající po stěně!

□ Neideální usazování pevných částic

Technická realita je někdy vzdálená představě jednotlivé částice v nepohyblivém prostředí.

Při sedimentaci v suspenzi s vysokým objemovým podílem částic je klesajícími částicemi kapalina vytlačována vzhůru významnou rychlostí. Dochází k **rušené sedimentaci**, při které mohou dokonce vznikat nestability a částice se budou řadit do vlnitě se pohybujících vláček, zatímco samotná kapalina se vrací kolem nich.

Častým případem je sedimentace částic o různých rozměrech a tvarech případně o různých hustotách, z čehož vyplývá jejich nestejná pádová rychlost. Během usazování se částice předbíhají a pád pomalejších částic je výrazně rušen stoupající kapalinou. Toho je možno využít při **třídění částic**.

Usazenina má strukturu, v níž na dně převládají rychleji sedimentující hrubé částice, u horní hranice usazeniny převládají pomalé a jemné částice. Energickým prohrabáváním usazeniny můžeme uvést do vznosu lehčí částice, které lze odplavit proudící kapalinou zatímco těžké částice se shromažďují na dně.

Například klasické rýžování využívá shromažďování kovových částic (zlata) o vysoké hustotě (a tedy o vyšší usazovací rychlosti) u dna nádoby, ve které suspenzi střídavě uvádíme do vznosu a necháváme usazovat, přičemž promyté částice horniny o menší usazovací rychlosti necháváme odplavovat.

Při nepřilíhnutí energickém prohrabávání (setřásání) usazeniny může dojít k odlišnému jevu: hrubší částice se uspořádají úsporněji a jemné částice postupně vyplní mezery, čímž se dá vrstva **zthutnit**. Dorrův usazovák toho obvykle využívá a proto je v angličtině nazýván také „thickener“ – tedy zahušťovač.

Disperzní soustavy, koalescence, inverze

Disperzní směs směsí dvou nemísitelných tekutin (L-L nebo L-G) mohou mít částice různé velikosti a různé objemové zastoupení. V **emulzi** L-L může být spojitá fáze polární a nespojitá nepolární – tzv. emulze „olej“ ve „vodě“ (např. mléko, smetana, vodou ředitelné nátěrové hmoty), nebo obráceně může být emulze „voda“ v „oleji“ (např. krémy, máslo, majonéza). Disperze vznikají mechanickým **štěpením** nebo vznikají vylučováním částic vs spojitou fázi. Spojitou fází bývá většinou ta z fází, jejíž objemové zastoupení je větší, mnoho emulzí má však široké pásmo objemových poměrů, ve kterém lze udržet kterýkoliv z obou typů emulzí. Usazováním se zvětšuje podíl lehčí fáze nahoře a těžší fáze dole a mezi částicemi původně dispergované fáze se zmenšuje vrstva fáze spojitě. Dostanou-li se dispergované tekuté částice do takové blízkosti, že se překonají mezifázové povrchové a elektrostatické síly, začnou se spojovat. Proces spojování tekutých částic se označuje jako **koalescence**. Praskání vrstvičky mezi částicemi bývá velmi rychlý proces a často se při tom vytvoří z původní spojitě fáze oddělené částice, uzavřené do fáze koaleskující. Fáze dispergovaná se stává spojitou a fáze původně spojitá přechází na dispergovanou; tomuto efektu říkáme **inverze fází**. Koalescenci a následnou inverzi je možno podpořit mechanickým působením (příkladem je stloukání másla). Podobné jevy jako pro L-L disperze můžeme pozorovat i u G-L disperzí, které mají buďto spojitou plynnou fázi (**mlhy**) nebo kapalnou fázi (**pěny**). Mohou být dosti stabilní, zejména v případě mikrometrických nebo nanometrických rozměrů (koloidní soustavy), kde síly tíže jsou srovnatelné s povrchovými silami různého typu. Usazování a koalescence manometrických **aerosolů** ale i větších částic mlhy je velmi pomalý proces, který můžeme urychlit např. odstředivou silou nebo vybitím náboje elektrostatickými odlučovači. Pěny, které vznikají probubláváním kapaliny nebo vývojem plynu v objemu kapaliny (varem nebo chemickou reakcí) v některých případech koaleskují neochotně, zejména v přítomnosti povrchově aktivních činidel - **tenzidů** (mýdlo, saponáty, polymery, bílkoviny).

Usazování v odstředivém poli

Pomalé procesy usazování můžeme urychlit odstřediváním. Při rotaci úhlovou rychlostí ω působí na tělesa ve vzdálenosti r od osy odstředivé zrychlení

$$a \equiv \omega^2 r, \quad (3-37)$$

které může mnohonásobně převýšit sílu tíže. Úhlová rychlost je $\omega = 2\pi N$, kde N je frekvence otáčení (počet otáček za sekundu); charakteristický poloměr $r = D/2$ je polovina průměru bubny. Odstředivé zrychlení tedy můžeme počítat jako

$$a = 2 \pi^2 N^2 D \quad (3-38)$$

U rychlé odstředivky domácí pračky (800 otáček za minutu, $r=0,20\text{m}$) je zrychlení asi 140-násobkem gravitačního zrychlení g .

Ve speciálních ultracentrifugách se dosahuje i zrychlení $10^6 g$ (miliontý násobek gravitačního zrychlení) a rychlost usazování je pak odpovídajícím způsobem zvýšena vůči rychlosti usazování v gravitačním poli.

Usazovací odstředivkou lze podstatně zrychlit procesy jako je vydělování tukových částic z mléka, kdy proces probíhající přirozeně po týdny lze uskutečnit během několika minut. Materiál o vyšší hustotě (více vody – odstředěné mléko) se soustřeďuje u obvodu rotující nádoby a méně hustý (přebytek tuku – smetana) zůstává blíže k ose rotace.

Pozor, zde je znovu typický konflikt fyzikálního pojmu hustota (density) s obecným chápáním slova „hustý“ v češtině pro popis materiálu o vysoké koncentraci („hustý roztok, hustá smetana, hustá tkanina“), pro špatnou tekutost – viskozitu („hustý olej, hustá kaše“) nebo pro špatný průchod záření („hustá mlha“).

Při dělení nemísitelných kapalin je možno vhodně umístěnými přepady plynule odvádět na jedné straně rotujícího bubnu oddělené fáze, ke druhé straně pak dodávat surovinu. Ačkoliv při samotném usazování se nespotebovává mnoho energie, je nutno počítat s poměrně značnými příkony,

potřebnými k prvnímu roztočení materiálu na danou rychlost. Technicky představují odstředivky nákladné aparáty, se strojně náročně obroběnými díly z kvalitních materiálů. Laboratorní ultracentrifugy, které jsou dokonce schopny např. oddělovat nanometrické objekty jako viry nebo směsi makromolekul, pracují na hranicích pevnosti špičkových materiálů.

V Íránu se v roce 2006 buduje řada 50 000 ultracentrifug, které by měly být schopny postupným obohacováním dělit plyny, konkrétně vydělit z plynného UF_6 nepatrně lehčí složku s izotopem U^{235} .

Vírové odlučovače – cyklóny

K odstředivému působení dochází i tehdy, když se těleso pohybuje po zakřivené dráze. Jako jsou cestující při rychlé jízdě tlačeni k vnější stěně zatáčky, tak dochází i při proudění vícefázové směsi (např. napěněné suspenze) v zakřiveném potrubí k soustřeďování těžší fáze (tuhých částic) u vnější strany a lehčí (bublin) u vnitřní strany ohybu.

Jakto, že se cestující v tramvaji nebo vagony Alston-Pendolino naklánějí k vnitřní straně zatáčky?

Efektu odstřeďování využíváme k oddělování směsí, ženeme-li směs na stěnu. V jednoduchém případě stačí jen prudce změnit směr proudění tekutiny, častěji je však použití **vírových odlučovačů** (nazývaných v technické hantýrce **cyklony**) obvykle válcového tvaru, do nichž vháníme tečným směrem dělenou směs, nejčastěji pevné částice v plynu. Těžší částice se dostávají k obvodové stěně, o níž se zbrzdí a vlastní tíží padají kuželovitým dnem do výsypky, lehčí tekutá fáze se odvede vzhůru centrálně umístěným potrubím.

Hrubý odhad odstředivého zrychlení můžeme založit na znalosti vstupní rychlosti plynu u_0 a průměru odlučovače D . Předpokládáme-li obvodovou rychlost $\omega r \approx u_0$, pak odstředivé zrychlení vychází

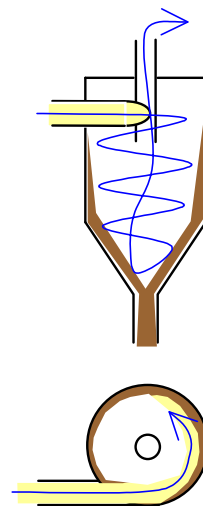
$$a \approx \frac{u_0^2}{2D}. \quad (3-39)$$

Doba zdržení plynu v cyklonu se dá odhadnout jako **prostorový čas** $t \approx V/V'$, což je podíl objemu zařízení V a objemového průtoku V' plynu. Za tuto dobu by měly částice usazováním působením zrychlení a urazit dráhu $(u_p t) > d$ rovnou nejméně průměru d vstupního potrubí.

Nad cyklonem umístěným venku bývá klobouk, chránící vnitřek před deštěm a celá sestava, připomínající lidskou postavu, je např. typickým znakem střech dřevozpracujících výroben, kde se v tomto zařízení zachycují piliny, odsávané od strojů.

Kapalně suspenze se usazují někdy v zařízení, založeném na stejném principu, nazývaném **hydrocyklon**.

Na principu cyklonu jsou také konstruovány moderní vysavače, zachycující částice do vrstvy vody na skrápěné stěně.



Obr. 3. 35. Nárys a půdorys cyklónového odlučovače



Obr. 3.36. Vírový odlučovač – cyklon
zleva přívodní potrubí od ventilátoru, vespod zásobník na vypadávací

Jiné hnací síly

Zvláštním případem je např. usazování v **elektrostatickém** poli, kde síla působící na částici závisí na vzdálenosti od elektrody. Tímto způsobem se daří např. zachycovat do jisté míry drobné částice

popílku ze spalin při spalování pevných paliv a odpadů. **Magnetickými** odlučovači můžeme oddělit z přesypávaného zrnitého materiálu některé rudy nebo odstranit nežádoucí úlomky oceli z kaolinové suspenze nebo z jiné kapaliny.



Pojmy k zapamatování

Usazování - sedimentace

Částice, spojitě prostředí, usazenina – sediment

Usazovací rychlost, pádová rychlost, součinitel odporu, Reynoldsovo číslo pro částice

Usazování v tíhovém poli, Stokesův zákon

Bubliny, kapky, mezifázové – povrchové napětí

Disperzní směsi: suspenze, emulze, krémy, pěny, mlhy, aerosoly

Koalescence, štěpení, inverze fází, povrchově aktivní látky - tenzidy



Příklady

Příklad 3.3

Usazování při sušení kulových částic

Vypočítejte hmotnostní tok vzduchu (kg/h) v proudové sušárně o průměru 100 mm pro sušení síranu měďnatého (pentahydrátu). Předpokládejte, že sušené částice mají prakticky tvar koule o průměru 1.25 mm. Střední rychlost vzduchu v sušárně má být dvojnásobkem rychlosti usazování daných částic. V sušárně je normální tlak a teplota 60°C.

Postup:

Při usazování hrají důležitou roli následující parametry: rozdíl hustot usazovaného materiálu a prostředí, jímž se usazuje, viskozita prostředí a tvar usazovaných částic. Obecně se většinou postupuje tak, že se problém řeší pro kulovou částici a poté se zavádí tvarová korekce. Teplotní závislost hustoty a viskozity prostředí je pro řadu běžných látek dobře známa. Teplotní závislost hustoty lze usazovaných částic většinou zanedbat. Usazování jedné kulové částice popisuje Stokesův zákon. Pro bezrozměrnou reprezentaci sedimentačních problémů lze s výhodou využít Arheniova a Lyaščenkova čísla.

Archimédovo číslo: $Ar = \frac{g \cdot d_p^3 (\rho_s - \rho_f)}{\nu^2 \rho_f}$

Lyaščenkovo číslo: $Ly = \frac{v_s^2 \rho_f}{g \nu^2 (\rho_s - \rho_f)}$

kde g - gravitační zrychlení, d_p - velikost částice, ρ_f - hustota tekutiny, ρ_s - hustota částice,

ν - kinematická viskozita tekutiny, v_s - rychlost sedimentace.

Klíčem k určení hmotnostního průtoku vzduchu v sušárně je určení sedimentační rychlosti. Tu určíme ze závislosti. Rychlost sedimentace je obsažena v Ly , tedy vypočteme Ar a z grafu $Ar^{1/3} = f(Ly^{1/3})$, viz. kapitola 0, odečteme odpovídající hodnotu Ly . Hodnoty hustoty částic, hustoty kapaliny a viskozity kapaliny odečteme z tabulek s ohledem na teplotu v sušárně. Střední rychlost vzduchu v sušárně má být dvojnásobkem rychlosti usazování daných částic. Hmotnostní průtok je pak dán součinem střední rychlosti, průřezu sušárny a hustoty proudící tekutiny.

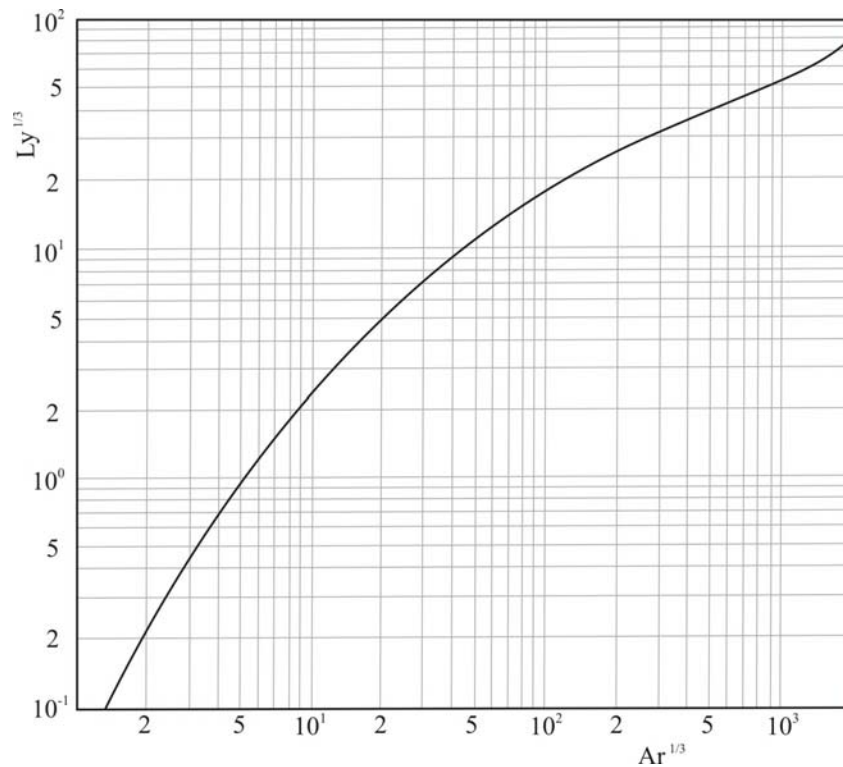
Výpočet:

Hustota tekutiny $\rho_f = 1.06 \text{ kg/m}^3$, hustota částice, $\rho_s = 2.29 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, kinematická viskozita tekutiny $\nu = 18.84 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ vše při 60°C.

$$Ar = \frac{g \cdot d_p^3 (\rho_s - \rho_f)}{\nu^2 \rho_f} = \frac{9.81 \cdot (1.25 \cdot 10^{-3})^3 (2.29 \cdot 10^3 - 1.06)}{(18.84 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 1.06} = 1.165 \cdot 10^3$$

Z grafu $Ar^{1/3} = f(Ly^{1/3})$ pak pro $Ar^{1/3} = 48.85 \rightarrow Ly^{1/3} = 11$

Pak

**Diagram $Ar^{1/3} = f(Ly^{1/3})$**

Popis sedimentace částic v přechodové a turbulentní oblasti

$$Ly = \frac{v_s^3 g_L}{g v^2 (q_s - q_f)} \rightarrow v_s = \sqrt[3]{\frac{Ly g v^2 (q_s - q_f)}{g_L}} = \sqrt[3]{\frac{11^3 \cdot 9.81 \cdot (18.84 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (2.29 \cdot 10^3 - 1.06)}{1.06}} = 8.098 \text{ m/s}$$

Střední rychlost tekutiny: $v = 2 \cdot v_s = 2 \cdot 8.098 = 16.196 = 16.2 \text{ m/s}$

Hmotnostní průtok tekutiny sušárnou:

$$m = v \cdot S \cdot \rho_f = 16.2 \cdot \frac{\pi \cdot 0.1^2}{4} \cdot 1.06 = \frac{0.1349 \text{ kg}}{\text{s}} = 485.5 \text{ kg/s}$$

Odpověď: Hmotnostní tok vzduchu v proudové sušárně o průměru 100 mm při sušení síranu měďnatého bude 485.5 kg/h.

3.5. Oddělování směsí specificky propustnou přepážkou



Čas ke studiu: 4 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- charakterizovat hlavní typy přepážek, užívaných k dělení směsí
- konstruovat a číst distributivní a kumulativní graf
- pojmenovat a bilancovat proudy filtrace
- zdůvodnit proč lze předpokládat při filtraci laminární proudění
- popsat funkci základních laboratorních a provozních filtračních zařízení
- vysvětlit, na čem závisí rychlost filtrace
- popsat použití membránových zařízení
- vysvětlit, na čem závisí rychlost membránových procesů



Výklad

Úvod

Jedním z nejúčinnějších způsobů separace je oddělování pomocí přepážky, která propouští jen vybraný podíl ze směsi. Nejjednodušším případem je **třídění na sítích**, která dělí zrnitý materiál na **podsítný podíl** s částicemi menšími než je otvor síta a na **nadsítný podíl** s částicemi většími.

K oddělování tekutin (kapalin nebo plynů) od zrnité pevné fáze slouží **filtrace** na **filtrační přepážce**, kterou projde tekutina jako **filtrát**, a na které se zachytí zrnitá fáze obvykle ve formě **filtračního koláče**.

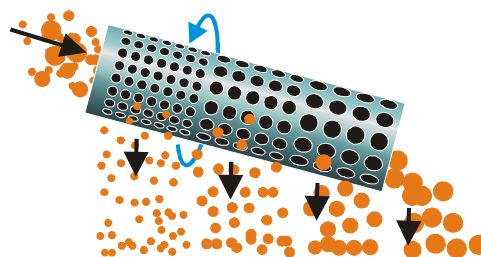
Mikrofiltrace pracuje již s přepážkami o otvorech rozměrů kolem 1 μm , kterými se dají zachytit i běžné mikroorganizmy.

Materiály s ještě menšími póry se označují jako **membrány**. Jsou běžné zejména v rostlinné a živočišné říši, protože tvoří buněčné stěny. Moderní materiálové inženýrství dovede vytvořit další typy membrán polymerních, keramických i kovových, které jsou laboratorně i průmyslově použitelné pro **ultrafiltraci**, při které nejjemnější membrána zachytí částice o rozměrech až 1 nm (molekuly cukru).

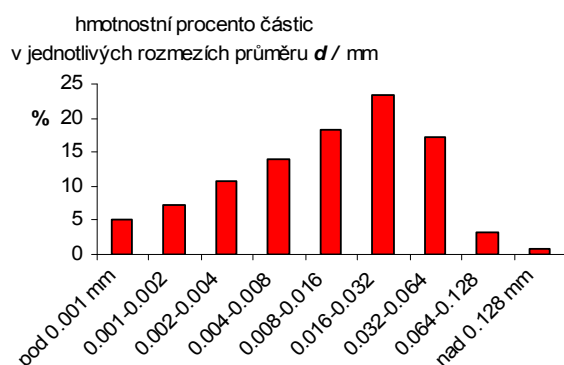
Propustnost membrán v oblasti malých pórů je již ovlivněna i povahou povrchu těchto pórů (elektrickým nábojem, smáčivostí atd.), což brání membráně propustit selektivně některé typy podstatně menších molekul nebo iontů.

Třídění na sítích

Vstupním proudem je zrnitý materiál s různým rozměrem zrna. Hnací silou pohybu částic přes síta je většinou tíže. Menší částice propadnou většími otvory. Aby nedošlo k zablokování otvorů síta velkými částicemi nebo klenbou malých částic, je nezbytné zrnitý materiál na sítu přesýpat (například rotací skloněného válcového síta, do jehož prostoru dávkuje materiál). Jinou možností je sítem vibrovat přičemž zrnitý materiál nadskakuje a částice se neustále přeskupují. Přetřídění vybraného množství

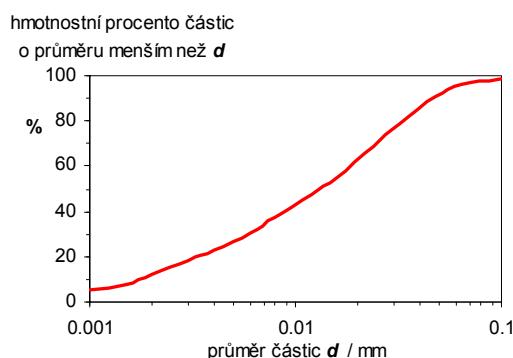


Obr. 3.37. Třídění částic rotačním sítem



Obr. 3.38. Distributivní diagram velikosti částic

(pro jeden druh cementu)



Obr. 3.39. Kumulativní diagram velikosti částic

zrnitého materiálu v laboratoři řadou sít od nejřidšího nahoře po nej hustší dole se nazývá **síťová analýza** a zvážení zbytku na jednotlivých sítích dostaneme **hmotnostní zastoupení** jednotlivých tříd velikosti (frakcí). Tu zaznamenáváme buďto jako nějakou formu distributivní funkce (obr.3.38) nebo jako funkci kumulativní, kterou lze snadno vykreslit jako funkci spojitou (obr.3.39).

Při matematickém popisu této funkce zpravidla používáme logaritmických stupnic velikosti (protože neexistují částice velikosti záporné). Spojitou distributivní funkci můžeme např. získat jako derivaci funkce kumulativní. Za předpokladu konstantní hustoty zhruba kulovitěho tvaru částic můžeme vypočítat také jiné typy distribucí: např. **počtu** částic zvoleného průměru, **objemu** částic s vybranou **plochou povrchu**, můžeme také vypočítat **celkový povrch** všech částic (to je důležité třeba pro rychlost rozpouštění nebo v případě, že povrch částic působí jako katalyzátor), případně další užitečné veličiny nebo funkce, charakterizující daný soubor částic. Pro zjištění rozdělení velikosti částic používáme vedle síťové analýzy i dalších laboratorních metod; pro nejmenší částice používáme počítání částic v mikroskopu – obvykle za využití počítačové analýzy obrazu.



Obr. 3.40. Laboratorní vibrační stůl se sadou sít

Filtrace

Pod pojmem filtrace se skrývají dva rozdílné typy operací:

koláčková filtrace, při které se hrubší částice shromáždí nad povrchem přepážky s malými otvory (např. běžná filtrace na papírovém filtru v laboratoři),

hloubková filtrace, při které se částice menší než rozměr pórů přepážky, usazují uvnitř pórů vyšší filtrační vrstvy (např. čištění vody průtokem pískovým filtrem).

V této kapitole se budeme zabývat jen koláčovou filtrací, problémy hloubkové filtrace ponecháme do kapitoly o adsorpci a dalších procesů, využívajících povrchových interakcí částic s propustnou vrstvou a s tím související nestejnou rychlostí postupu částic různého typu.

Při periodické koláčkové filtraci je vstupním proudem disperze pevných částic v tekutině – obvykleji je to **suspenze** v kapalině, ale někdy i částice unášené proudícím plynem (např. ve vysavači). **Filtrační přepážka** propouští samotnou tekutinu – **filtrát**; na přepážce se hromadí částice, tvořící **filtrační koláč**.

Filtrační přepážka v nejběžnějších případech je tvořena textilní **plachetkou**. Obecně může být tvořena jakýmkoliv vláknitým materiálem (papír, plst, plachetka z přírodních, polymerních, skleněných nebo kovových vláken), porézním materiálem (keramika, frit - slinutá skleněná drť, porézní kov) nebo síťovinou. Materiál volíme podle chemické povahy a teploty zpracovávané suspenze a ohledu na možnost periodické obměny přepážky (praní plachetky). Filtrační přepážka se totiž postupem času může ucpávat. Porézní materiál může být mechanicky samonosný, častěji

případem je, že se filtrační plachetka klade na tuhé síto. Někdy je možno přepážku na sítu vytvořit jako koláč vláknitého nebo zrnitého materiálu, který vytvoříme před vlastní filtrací.

□ Bilance filtrace

Při bilanci filtrace zpravidla pracujeme s hmotností nebo s objemem. Z hlediska celkového procesu můžeme na koláčovou filtraci nahlížet jako na dělič, ze kterého vycházejí dva proudy.

$$m_1 = m_2 + m_3$$

označíme-li **hmotnostní zlomek částic** x_i , pak bilance pevné fáze je

$$m_1 x_1 = m_3 x_3$$

protože při správné funkci filtrace neprojde do filtrátu pevná fáze.

Zpravidla je zadána koncentrace vstupní suspenze x_1 . Koncentrace x_3

v koláči je určena tvarem a velikostí částic a dá se pokusně změřit v laboratoři. Snadno měřitelnou veličinou je množství filtrátu m_2 .

Příslušnými přepočty pak dostaneme pro **výsledek filtrace**

$$m_1 = \frac{m_2 x_3}{x_3 - x_1}, \quad m_3 = \frac{m_2 x_1}{x_3 - x_1}. \quad (3-40)$$

Průběh procesu ale popisujeme jako **neustálený děj**, při němž vstupuje suspenze, vystupuje filtrát a akumuluje se koláč:

$$\frac{dm_3}{dt} = \frac{dm_2}{dt} \frac{x_1}{x_3 - x_1}. \quad (3-41)$$

Protože jde nejčastěji o kapalinu o hustotě ρ_L a nemísitelnou pevnou fázi o hustotě ρ_S , můžeme také předpokládat zachování objemu a **střední hustoty** jsou pro suspenzi

$$\rho_1 = \frac{1}{\frac{x_1}{\rho_S} + \frac{1-x_1}{\rho_L}} \quad (3-42)$$

a pro koláč

$$\rho_3 = \frac{1}{\frac{x_3}{\rho_S} + \frac{1-x_3}{\rho_L}}. \quad (3-43)$$

Pomocí těchto veličin můžeme pak přepočítávat různě zadané množství a koncentrační údaje na jednotný základ (zde používáme hmotnosti a hmotnostní zlomky).

Tloušťka koláče má v průběhu filtrace rostoucí hodnotu L . Při ploše filtru S_F platí

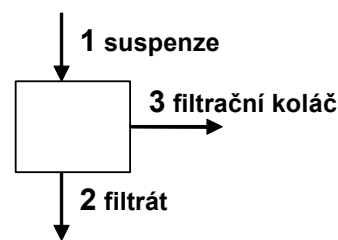
$$L = \frac{m_3}{\rho_3 S_F} \quad (3-44)$$

Porozita koláče (podíl objemu, zaujímaného kapalinou, zadržovanou v koláči)

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{1 + \frac{x_3 \rho_L}{1-x_3 \rho_S}} \quad (3-45)$$

je podstatná pro posouzení odporu proudění filtrátu. Je také důležitá pro **promývání koláče**. Uvědomme si, že někdy je účelem získat

- co nejčistší částice (*např. krystaly hydrogenuhličitanu sodného v Solvayově procesu, vařené nudle nebo vyprané ponožky*),
- jindy co nejčistší kapalinu (*kyselina fosforečná ze sádrovcové kaše, čaj, překapávaná káva*),



Obr. 3.41. Bilance filtrace

- někdy jsou užitečné oba oddělené produkty (vařené hovězí maso a polévka).

Často je vhodné zbavit koláč zachyceného filtrátu. Něco se podaří vytlačit z koláče mechanickým stlačením (ždímání prádla), něco se dá odstranit protlačováním plynu přes koláč, ale většinou je zapotřebí použít ještě pomocnou tekutinu. Jednou z možností je částice v ní znovu suspendovat (máchní prádla) a opakovat filtraci, jinak je také možno přes neporušený koláč na filtru protlačit promývací kapalinu. Podle požadavku na dokonalost oddělení by ji měl být objem několikanásobně přesahující objem zadržený v pórech.

V automatické pračce je to asi 10-100 krát více a trojím máchním a odstředováním se odstraní asi 99,9 % nečistoty a pracích prostředků.

□ Rychlost periodické filtrace

Pro rychlost filtrace platí zákonitosti, ukázané v odstavci o toku porézním prostředím. Při oddělování velkých částic od tekutiny bývá proudění turbulentní a rychlostí cezení se nemusíme příliš zabývat. Čím jsou částice menší a těsněji uspořádané, tím je filtrace obtížnější a pomalejší. Filtrace je většinou tak pomalým procesem, že není třeba ani kontrolovat hodnotu Reynoldsova čísla a můžeme předpokládat, že tlaková ztráta na koláči je podle Ergunovy rovnice (3-15)

$$\Delta p_K \approx \frac{150 (1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3 d_p^2} \mu u_0 L \quad (3-46)$$

ve které L je aktuální tloušťka koláče a u_0 je mimovrstvová rychlost filtrátu, která se při ploše filtru S_F rovná

$$u_0 \equiv \frac{1}{\rho_L S_F} \frac{dm_2}{dt} \quad (3-47)$$

Geometrické parametry porézního prostředí můžeme shrnout do rozměrové konstanty $k_K/(m^2)$

$$\Delta p_K = k_K \mu u_0 L$$

K další tlakové ztrátě dochází na filtrační přepážce, kde obdobně

$$\Delta p_F = k_F \mu u_0$$

(konstantní tloušťka plachetky je zahrnuta do koeficientu $k_F/(m^1)$ a celkový rozdíl tlaku tekutiny před a za filtrem tedy je

$$\Delta p = (k_K L + k_F) \mu u_0$$

a po dosazení primárních dat dostaneme **diferenciální** rovnici pro závislost hmotnosti filtrátu na čase

$$\Delta p = \frac{\mu}{\rho_L S_F} \left[\frac{k_K x_1}{S_F (x_3 - x_1)} \left(\frac{x_3}{\rho_S} + \frac{1 - x_3}{\rho_L} \right) m_2 + k_F \right] \frac{dm_2}{dt} \quad (3-48)$$

Počáteční podmínka je, že v počátečním na počátku filtrace v čase $t=0$ je množství filtrátu $m_2=0$. K **integraci** této rovnice potřebujeme ještě znát, čím je proudění vyvoláváno. Obecně je to charakteristika čerpadla, která uvádí do vztahu tlakovou ztrátu Δp a průtok dm_2/dt . V mezních případech je charakteristiku pro používaný rozsah proměnných možno zjednodušit buďto předpokladem **konstantního průtoku** $dm_2/dt=\text{konst}$ (například pro objemová čerpadla)

$$\Delta p = \frac{\mu}{\rho_L S_F} \left[\frac{k_K x_1}{S_F (x_3 - x_1)} \left(\frac{x_3}{\rho_S} + \frac{1 - x_3}{\rho_L} \right) \left(\frac{dm_2}{dt} \right) t + k_F \right] \frac{dm_2}{dt} \quad \text{pro } dm_2/dt=\text{konst} \quad (3-48a)$$

nebo pro **konstantní tlakové ztráty** $\Delta p=\text{konst}$.

$$\Delta p = \frac{\mu}{\rho_L S_F} \left[\frac{k_K x_1}{2 S_F (x_3 - x_1)} \left(\frac{x_3}{\rho_S} + \frac{1 - x_3}{\rho_L} \right) m_2 + k_F \right] \frac{m_2}{t} \quad \text{pro } \Delta p=\text{konst.} \quad (3-48b)$$

Uvedený model je bohužel jen zjednodušením, vhodným pro popis filtrace suspenzí s pevnými částicemi zhruba stejných rozměrů. Drobné částice totiž mohou v průběhu procesu ucpávat průchody v koláči a k_K potom již nezůstane konstantní. Ještě horší je to při filtraci měkkých částic, tvořících koláč stlačitelný.

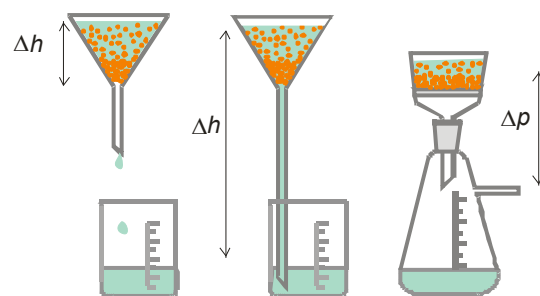
□ Filtrační zařízení

V jednoduché laboratorní verzi je rozdíl tlaku zajišťován tíží a výškou hladiny nad filtrem.

$$\Delta p = \rho g \Delta h.$$

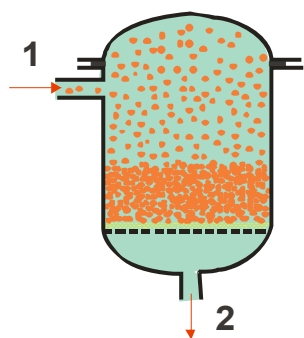
Pro zvýšení rozdílu hladin se někdy využívá nálevky s tenkým zaplaveným stonkem, kde je rozdíl hladin podstatně větší. Výhodné je ještě přidat rozdíl tlaku; technicky jednodušší je připojit prostor filtrátu k vývěvě – nebrání to dolévání suspenze do nálevky. Běžná laboratorní vodní vývěva udržuje tlak okolo 2-5 kPa; při tlaku okolo blízkém hodnotě 100 kPa tedy působí zhruba stejně jako rozdíl hladin vody 10 m.

Aby bylo možno použít k filtraci vyššího tlakového rozdílu, musí se méně mechanicky pevné filtrační přepážky podepírat tuhým sítím nebo vroubkovanou deskou, umožňující odvod filtrátu.

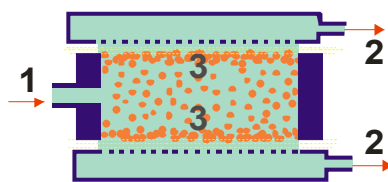


Obr.3.42. Filtrace v laboratoři

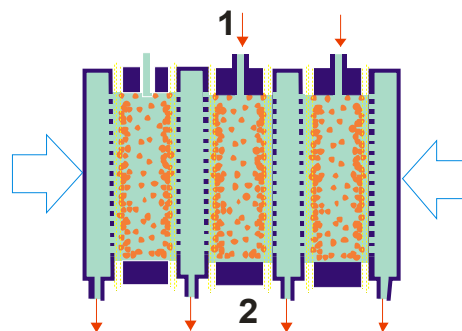
Provozní obdobou laboratorního filtru je **nuč**, nádoba s děrovaným dnem, na něž se klade plachetka (obr. 3.43 a, 3.44). Opatříme-li ji těsnějším víkem, můžeme suspenzi dovnitř čerpat pod tlakem a tlakový rozdíl se obvykle nastavuje na hodnoty Δp nepřesahující 1 MPa (vyšší tlaky zvyšují příliš nároky na materiály nádob a na technologii jejich výroby, má-li být zařízení bezpečné). Při filtraci na nuči je nepříjemná manipulace se zavíráním



Obr.3.43 a Nuč



b Jednodílný kalolis



c Kalolis

a otvíráním víka a s vyprazdňováním koláče – velké nuče bývají uloženy kyvně, aby se dal obsah vykláčet. Byla vyvinuta rozebíratelná nuč, ve které je druhá filtrační plachetka umístěna také nad suspenzí, jako na obr. 3.43 b. Tím se žádoucím způsobem zvětšuje plocha S_F . V praxi se sestavují baterie takovýchto jednotek nastojato uspořádaných tak, že se střídají děrované komory pro odvod filtrátu s rámy s přívodem suspenze, proloženými filtračními plachtami (obr. 3.43 c, 3.45). Dohromady je celá sestava stahována šroubem nebo hydraulickou jednotkou, podobně jako při lisování – odtud pochází český název **kalolis**.

Pozor, hlavním smyslem tu není lisování zpracovávaného materiálu, ale jen o těsné stažení ráků!

Kalolisy se sestavují i z mnoha desítek ráků; plocha jedné filtrační plochy u manuálně obsluhovaných filtrů je do 0,4 m², operace s většími těžkými ráky (až 2 m²) musí již být do značné



Obr. 3.44. Nuč – pivovar Velké Popovice

míry mechanizovány. U starších kalolisů se suspenze i filtrát rozváděly soustavou na sebe navazujících otvorů v rámech; dnes je jednodušší použít ohebných tlakových hadic, napojených na jednotlivé rámy tak, aby se nemusely při manipulaci s rámy odpojovat. Rámy kalolisu se dají vyrobit dostatečně tuhé a snesou dosti vysoké tlaky. Podle vzrůstu hydraulického odporu se dá sledovat postup plnění rámu koláčem a stav, kdy je filtraci nutno ukončit. Pokud je zapotřebí koláč promýt, čerpá se potom promývací kapalina do každé druhé z filtrátových komor a z ostatních komor je odváděna. Někdy se ještě tlakovým plynem vytlačuje z koláče promývací kapalina případně se také po otevření filtru protiproudým plynem odfukuje koláč od plachetky.



Obr.3.45. Průmyslový kalolis

Nemáme-li k dispozici vysoký tlak, je vhodné zachycovat tenčí vrstvu koláče na větší ploše, obvykle **tkaninového**

filtru. Nejběžnější jsou pytlové filtry, které se používají zejména pro zachycení částic z proudícího plynu, což známe z domácích vysavačů smetlí.

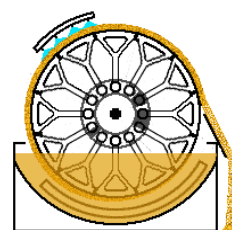
Pro čištění vzduchu nasávaného do spalovacího motoru automobilu se nejčastěji používají papírové varhánkové filtry, upevněné v bubínku; frekvence jejich výměn závisí na prašnosti vzduchu.

Často se tkaninové filtry umísťují tak aby se usazený koláč dal shodit do výsypky oklepáním nebo vibrací a aby bylo možno rychle ve filtraci pokračovat. U tuhých porézních filtrů je možnost oddělit koláč obráceným profouknutím filtru.

Vakuové filtry se konstruují třeba tak, že filtrační plachetky ve formě pytlů jsou navlečeny na klece nebo vroubkované desky a vyčištěný plyn se odsává zevnitř.

□ Kontinuální filtrace

Nevýhodou periodické filtrace je nutnost časté obsluhy zařízení a velké množství ztrátových časů při sestavování aparátu, přepojování průtoku, otevírání a vyprazdňování aparátu a čištění a výměn filtrační přepážky. Kontinuální filtrace se hodí tam, kde pracujeme na straně suspenze převážně jen s atmosférickým tlakem. Filtr bývá uspořádán jako oběžný, pomalu se otáčející buben, kotouč nebo pás, na nějž je v jednom místě přiváděna suspenze, o něco dále je koláč promýván, potom je odvodňován a odřezáván či odškrabáván tak, aby se vracela plachetka do počátečního bodu s minimální vrstvou zbylého koláče.



Obr. 3.46 Schematický řez vakuovým bubnovým filtrem
Sběrné větve uvnitř odvádějí do různých odvodních potrubí filtrát a promývací kapalinu

□ Odvodňování koláče, kapilarita

Působíme-li na vlhký filtrační koláč shora tlakem plynu nebo zdola vakuem, podaří se nám vytlačit ještě část kapaliny. Do jaké míry se to podaří, závisí na kapilaritě. Povrchová síla brání vytváření nebo zániku nového povrchu. Charakterizuje ji povrchové napětí σ $/(N\ m^{-1})$, což je síla působící na rozhraní mezi kapalinou a plynem na jednotku délky hladiny.

Přibližně je pro vodu je asi $\sigma \approx 0,07\ N\ m^{-1}$, pro nepolární organické látky $\sigma \approx 0,02\ N\ m^{-1}$, pro alkoholy $\sigma \approx 0,03\ N\ m^{-1}$.



Obr. 3.47. Buben pro vakuový filtr

V pórech kruhového průřezu o průměru d , smočených kapalinou, se udrží kapalina proti tlaku

$$\Delta p = \frac{4 \sigma}{d}, \quad (3-49)$$

což znamená, že proti síle tíže vystoupí do výšky

$$\Delta h = \frac{4 \sigma}{\rho g d}. \quad (3-50)$$

Tlakem plynu se tedy dá vytlačit kapalina jen z největších pórů, v zákoutích a malých skulinách mezi částicemi drží kapalina velmi pevně.

Jaký průměr mají kapiláry, které vytáhnou vodu z kořenů do koruny stromu ve výšce 30 m?

Suchým porézním materiálem můžeme také odtáhnout z jiných míst volnou vlhkost.

Když se psalo inkoustem, používal se nekližený papír „piják“ k sušení textu.

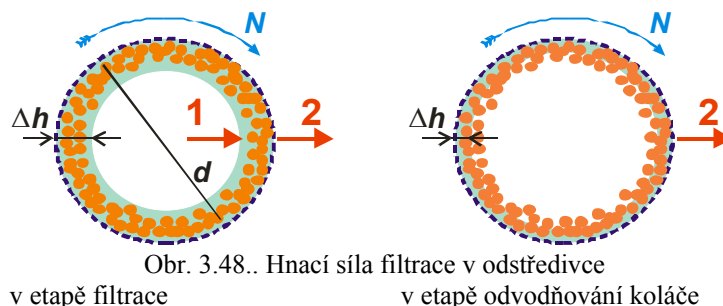
Ztuhlé kapky parafinu odstraníme z tkaniny přezhlením přes filtrační nebo novinový papír.

Filtrace v odstředivce

Poměrně malá výška kapaliny může působit značnou silou na průtok, pokud je umístěna v odstředivém poli. Předpokládáme-li pro jednoduchost, že sloupec kapaliny Δh (viz obr. 3.48) je podstatně menší než $d/2$, je hnací síla filtrace v odstředivce o průměru bubnu d a frekvenci otáčení N rovna

$$\Delta p = 2 \pi^2 N^2 d \rho \Delta h. \quad (3-51)$$

Filtrační odstředivky mají tuhý děrovaný buben, pokrytý případně jemnějším sítím nebo tkaninovou plátkou. Filtrát odstřikuje děrovaným bubnem a je sbírán ze skříně okolo vnější strany bubnu. Filtrační odstředivka velmi často pracuje v přetřžitém provozu avšak může běžet bez zastavování, je-li zajištěno průběžné vynášení koláče z bubnu. To se dá buďto kontinuálním vyhrabováním šnekem nebo periodickým vyhazováním vrstvy koláče pístem.



V praxi procesních technologií se filtrační odstředivky používají nejčastěji pro oddělování hrubších krystalů od matečného louhu (např. tradičně v cukrovarech).

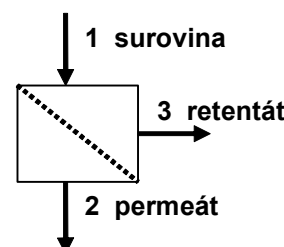
Periodické odstředování je dobře známé z odstředivek na prádlo. V těch se prací voda vlivem odstředivé síly pohybuje k obvodu bubnu a zde se od tkaniny kapky odtrhnou, a dokonce se odtáhne voda i z větších kapilár, ve kterých se v běžném gravitačním poli udrží.

Membránové dělení

Většina procesů přenosu hmoty v živé přírodě je zprostředkována buněčnými membránami, propouštějícími specificky jen některé chemické látky. Pokud membrány jeden typ látek zcela nepropouští – jako je to obdobné jako u koláčové filtrace. Zadržovaná látka zde ale zůstává jako složka tekutiny – netvoří koláč.

Přírodní membrány jsou velmi tenké a procesy jsou poměrně pomalé, takže technické řešení umělých membránových procesů postupovalo velmi pozvolna s vývojem nových materiálů a zařízení.

První výrazná technologie, ve které se umělé membrány uplatnily, byla dialýza krve – hemodialýza: tenké celulózoové membrány propouštějí ionty a malé molekuly, zatímco již molekuly na úrovni velikosti bílkovin a větší částice neprojdou. Tak se vytvořila umělá ledvina – dialyzační jednotka, která dovolila periodicky odstraňovat z krve přebytečné soli a rozkladné produkty a umožnila tím přežití osob s nedostatečnými ledvinami.



Obr. 3.49. jednoduchý membránový proces

□ Proudění látek při membránových procesech

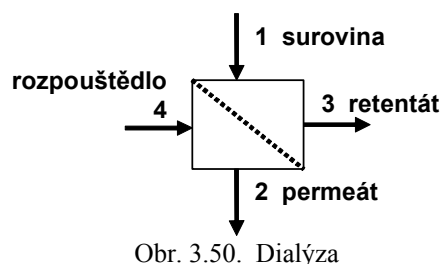
Ze vstupní suroviny jisté složky procházejí přes membránu do **permeátu** (prostoupivší), zatímco zbytek na straně suroviny nazýváme **retentát** (zadržený). Při práci s kapalinami obsahuje surovina převážně rozpouštědlo, které obsahuje nějakou složku neprocházející membránou a případně i nějakou složku pro niž je membrána propustná. Filtraci je velmi podobný případ, kdy se snažíme získat maximum čistého permeátu (podobně jako filtrát) a neprocházející látku ponechat v retentátu (obdobně jako filtrační koláč). Odlučujeme-li částice větší než $0,1\ \mu\text{m}$; (např. nejmenší bakterie *Pseudomonas* $0,3\ \mu\text{m}$), mluvíme o **mikrofiltraci**, pro nanometrické částice (makromolekuly, viry) mluvíme o **ultrafiltraci** nebo též **nanofiltraci**. Z bilančního hlediska je proces podobný filtraci, průtok membránou (permeace) je dosti pomalý i při vysokých tlakových rozdílech. Také se netvoří zpravidla filtrační koláč – pokud malé částice neulpí na membráně, zůstávají suspendovány v retentátu, takže klíčový odpor proti toku tekutiny je uvnitř přepážky - membrány. Ve speciálních případech, daných vlastnostmi materiálu membrány, neprojdou membránou ani některé malé molekuly nebo ionty určitého náboje. Některé membrány propouštějí jen určitý typ molekul plynu a dají se použít k dělení plynů. Při **pervaporaci** je na jedné straně membrány plyn a přecházející molekuly mění v membráně svou fázi z kapaliny na páru nebo obráceně.

Existuje i mnoho případů neideálních membránových procesů, při kterých se částečně dělí i dvě složky, které obě membránou procházejí, liší se však rychlostí pohybu. Zařízením jde o membrány, typově toto dělení spíše patří k dělení vlivem povrchových jevů, které pojednáváme v jiné kapitole.

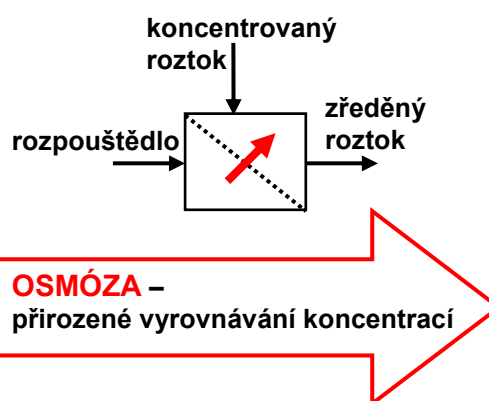
□ Hnací síla pohybu látky přes membránu

Samovolná difuze přes membránu je spojena s rozdílem aktivity prostupující látky v prostorech, oddělených membránou. Příslušnému ději říkáme **osmóza**. Zjednodušeně řečeno, propouští-li membrána **rozpuštěnou látku**, bude tato složka samovolně pronikat membránou na stranu menší koncentrace. Na tomto principu probíhá **dialýza**, kdy na straně permeátu necháme proudit větší množství rozpouštědla, kterým rozpuštěnou látku odplavujeme; na straně retentátu zůstávají částice, které membrána nepropustí.

Zajímavý případ je když membrána propouští **jen rozpouštědlo** – to se bude samovolně pohybovat na stranu vyšší koncentrace rozpuštěné látky. Abychom tento pohyb zastavili musíme vynaložit protisměru tlak, kterému říkáme **osmotický tlak** (je jednou z koligativních vlastností – závisí tedy na počtu molekul rozpuštěné látky v daném objemu). Pokud budeme působit vyšším tlakem v protisměru,



Obr. 3.50. Dialýza



Obr.3.51. Principy osmózy a reverzní osmózy (membrána propouští jen rozpouštědlo)

podají se nám membránou obráceně protlačovat z koncentrovaného roztoku jen rozpouštědlo. To je významnou operací, kterou nazýváme **reverzní osmóza**.

Reverzní osmózou a je možno např. odsolovat mořskou vodu nebo v laboratoři získávat z vodovodní vody vodu deionizovanou. Kompletní automatizovaná jednotka rozměru jednoho automobilního kontejneru odsoluje asi 100 m³/den vody.

Hnací sílu můžeme vyjádřit různě. Většinou ji můžeme vyjádřit působícím rozdílem Δp vnějších tlaků, případně korigovaných o tlak osmotický. U dialýzy to je rozdíl (aktivit), což můžeme vyjádřit např. jako rozdíl koncentrací nebo opět parciálních tlaků.

Zvláštním případem je **elektroosmóza**, kdy pohyb iontů přes membránu je vyvoláván vnějším elektrickým polem. Pomocí elektroosmózy s použitím membrány, propouštějící jen kationty, a membrány, propouštějící jen anionty, se dá rozdělit sůl na kyselinu a zásadu. Membrána při membránové elektrolýze také účinně zabraňuje směšování produktů z katodového a anodového prostoru a jejich následným nežádoucím reakcím.

□ Membránová zařízení

Především je důležité dimenzování zařízení. **Látkové množství** n /(kmol) které se přeneso do permeátu, při zadané hnací síle procesu je úměrné **času** t . **Tok látky** n' /(kmol s⁻¹) je podle toho

$$n' \equiv \frac{\Delta n}{\Delta t}$$

a lze očekávat, že je přímo úměrný **ploše** S membrány. Je účelné proto zavést **intenzitu látkového toku permeátu**

$$j_n \equiv \frac{\Delta n}{\Delta S \Delta t} \quad /(\text{kmol m}^{-2} \text{s}^{-1}) \quad (3-52)$$

která je takovém případě nezávislá na čase a velikosti plochy membrány. Dá se očekávat, že množství přenesené látky bude úměrné hnací síle procesu to jest např. rozdílu aktivit nebo fugacit složky vně membrány. Zjednodušeně to můžeme vyjádřit odchylkou Δp parciálních tlaků od stavu, v němž k toku nedochází. Potom je účelné zavést **průchodnost membrány** T_{np} (transmisibilitu) jako

$$T_{np} \equiv \frac{\Delta n}{\Delta S \Delta t \Delta p} \quad /(\text{kmol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}). \quad (3-53)$$

Propustnost je vlastností membrány, závisující na tloušťce membrány a na materiálu membrány; u tenkých membrán se mohou uplatnit povrchové vlastnosti materiálu, ale běžně předpokládáme, že s tloušťkou δ /(m) membrány roste její odpor úměrně, a zbývá pak jen jediná vlastnost, závisující na samotném materiálu, **propustnost materiálu** neboli **permeabilita**

$$P_{np} \equiv T_{np} \delta \quad /(\text{kmol m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}). \quad (3-54)$$

Permeabilita je vlastnost příbuzná známé difuzivitě D . U difuzivity membrány se hnací síla vyjadřuje obtížně zjistitelnou změnou koncentrací Δc uvnitř membrány, kdežto u permeability využíváme snáze měřitelné vnější koncentrace, vyjádřené pomocí Δp .

Celkové látkové množství prošlé membránou dostaneme příslušnou integrací avšak při konstantních vlastnostech membrány a konstantní hnací síle je vyjadřujeme pomocí některé z uvedených veličin jako

$$n = T_{np} S t \Delta p = P_{np} S t \frac{\Delta p}{\delta} = D S t \frac{\Delta c}{\delta} \quad (3-55)$$

a pro ustálený proces např.

$$n' = P_{np} S \frac{\Delta p}{\delta}. \quad (3-56)$$

Indexem n u permeability jsme zde vyjádřili skutečnost, že přenos charakterizujeme látkovým množstvím; jinak se také někdy charakterizuje hmotností m nebo objemem V ; podobně index p upozorňuje na to, že hnací síla je vyjádřena pomocí rozdílu tlaků. Různé membránové technologie mají zažitá konvenční vyjádření permeabilit a transmisibilit s použitím různě vyjádřené hnací síly,

v některých případech dokonce v jednotkách nespádajících do soustavy SI. Je na to zapotřebí dát pozor při dosazování do výpočtových vztahů!

Při vývoji nových membrán je požadavkem:

- vysoká selektivita – které látky membrána propustí,
- vysoká permeabilita – jak snadno se látka pohybuje membránou
- malá tloušťka – zvýšení průchodnosti
- celková plocha – zvýšení průtoku.

Umělé membrány jsou většinou na bázi polymerů, porézní keramiky nebo porézních kovů. Někdy jde o složité kompozitní materiály s nosnou maticí a s odlišnými vrstvami na povrchu. Jejich vývoj tedy zasahuje do celého spektra materiálového inženýrství.

Spolu s vývojem membrán pro dělení látek se vyvíjejí i další tenkostěnné materiály se specifickou propustností (či nepropustností) pro využití v obalové technice nebo jako antikoroziní nátěry.

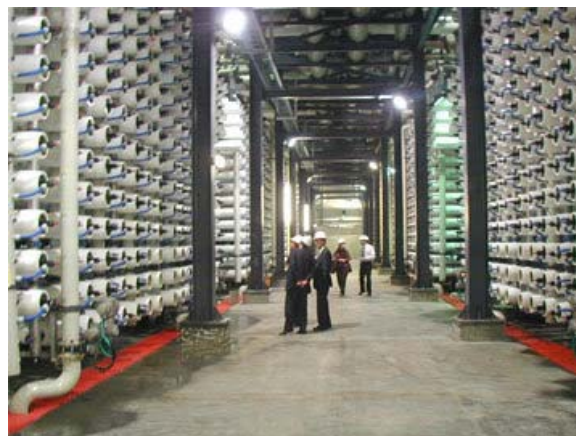
Např. materiály typu „goretex“ pro textilní a obuvnický průmysl propouštějí vodní páru a vzduch a nepropouštějí vodu.

Je zřejmé, že čím je membrána tenčí, tím propustí při dané hnací síle více látky. Na druhé straně u tenké membrány více hrozí vady („fouling“); větší póry, které propouštějí i nežádoucí složku. Na tenkou membránu, i když je podepírána, také nemůžeme vložit příliš velký tlak aby nedošlo k protržení. Rovněž je nutno pečlivě odstranit složky, které by se mohly na membránách usazovat a blokovat jejich průchodnost.

Membrány ve formě folie jsou často skládány do vrstev ...-membrána–permeát–membrána–retentát–membrána–permeát–... případně je celá tato sestava stočena do roličky. V poslední době je snaha formovat membránu do tenkých trubic (dutá vlákna) a membránové zařízení sestává z paralelního svazku, umístěného v nádobě pro permeát. Např. separátory Permasep vytvářejí membránovou plochu 20 000 m² svazkem 50 milionů polyesterových dutých vláken o vnitřním průměru 18 μm a tloušťce stěny 14 μm.

Klíčovým problémem vždy zůstává zatěsnění rozvodu suroviny i sběru permeátu a retentátu.

Membránová zařízení zvyšují postupně svoji spolehlivost, snižují investiční náklady a náklady na údržbu, přitom provozní náklady jsou ve srovnání s jinými stejně účinnými dělicími metodami velmi nízké. Proto jde o technologii, která bude stále významněji využívána.



Obr. 3.52. Membránové jednotky pro odsolování 320 000 m³/den vody (Israel)



□ Pojmy k zapamatování

Třídění na sítích, nadsítný podíl, podsítný podíl, síťová analýza

Distribuce velikosti, distributivní a kumulativní graf

Koláčová filtrace, filtrační přepážka, filtrát, filtrační koláč, promývání

Nuč, kalolis, vakuový bubnový filtr, filtrační odstředivka

Membrány, dialýza, permeát, retentát

Osmotický tlak, reverzní osmóza, elektroosmóza

Průchodnost membrány – transmisibilita, propustnost – permeabilita



Příklady

Příklad 3.4

Filtrace na nuči za konstantního tlaku

Vodná suspenze pevné látky se filtruje v tlakové nuči 1 hodinu při konstantním rozdílu tlaků a teplotě 7,5°C. Filtrační koláč se promývá při teplotě 20°C za jinak stejných podmínek jako při filtraci. Promývá se vodou v množství 20 obj.% z množství filtrátu. Příprava nuče pro novou filtraci trvá 20 minut. Při pokusné filtraci bylo získáno za 8 minut 30 litrů a za 18 minut 50 litrů filtrátu (podmínky stejné jako při filtraci na nuči). Zjistěte kolik m³ filtrátu se produkuje za den.

Postup: Jde o filtraci při konstantním rozdílu tlaku. Charakteristika filtrační nuče je dána pokusnou filtrací, ze které určíme konstanty v rovnici filtrace. Poté vypočteme objem filtrátu v jednom cyklu. Následuje výpočet doby cyklu a množství promývací kapaliny. Protože filtrace a promývání probíhají při různých teplotách, je třeba přepočítat konstanty v rovnici filtrace na teplotu promývání. Pak vypočteme dobu promývání a dobu celého filtračního cyklu. Množství filtrátu určíme ze součinu počtu cyklů za den a objemu filtrátu v jenom cyklu.

Výpočet:

Integrovaná rovnice filtrace (3-48b) při konstantním rozdílu tlaků:

$$\begin{aligned} q_F^2 + 2q_M q_F - 2K\tau_F &= 0 \\ V_F^2 + 2q_M S V_F - 2KS^2 \tau_F &= 0 \\ A = 2q_M S; B = 2KS^2 \end{aligned}$$

Vyjádřeno v objemech:

Z pokusné filtrace stanovíme konstanty filtru A a B :

2 pokusy = 2 rovnice, veličiny dosazujeme v [m³] a [s].

$$\begin{aligned} (30 \cdot 10^{-3})^2 + A \cdot 30 \cdot 10^{-3} - B \cdot 8 \cdot 60 &= 0 \\ (50 \cdot 10^{-3})^2 + A \cdot 50 \cdot 10^{-3} - B \cdot 18 \cdot 60 &= 0 \end{aligned}$$

$$A = 2.71 \cdot 10^{-2}; B = 3.571 \cdot 10^{-6}$$

Objem filtrátu: $\tau_F = 1h = 3600s$, $V_F^2 + AV_F - B\tau_F = 0$, fyzikální smysl má pouze pozitivní

kořen rovnice: $V_F = 0.1006 \text{ m}^3$

Objem promývací kapaliny: $V_P = V_F \cdot 0.2 = 0.1006 \cdot 0.2 = 0.0201 \text{ m}^3$

Doba promývání: promývání koláče probíhá při jiné teplotě než samotná filtrace, tzn. konstanty A a B získané pro filtraci je nutné přepočítat na teplotu promývání.

$$\text{Rovnice promývání: } q_P(q_F - q_M) - K\tau_P = 0; q_M = \frac{R_F}{\beta \eta}; K = \frac{\Delta P}{\beta \eta}$$

Protože odpor filtrační přepážky R_P , tlaková ztráta filtru ΔP a modifikovaný odpor filtračního koláče β jsou na teplotě prakticky nezávislé, můžeme si dovolit porovnat konstanty pro filtraci a promývání pouze s viskozitou kapalin při teplotách promývání a filtrace:

$$\frac{A_F}{A_P} = \frac{2Sq_{MF}}{Sq_{MP}} = \frac{2\frac{R_F}{\beta \eta_F}}{\frac{R_P}{\beta \eta_P}} = \frac{2\mu_P}{\mu_F}; \frac{B_F}{B_P} = \frac{2K_F S^2}{K_P S^2} = \frac{2\frac{\Delta P}{\beta \eta_F}}{\frac{\Delta P}{\beta \eta_P}} = \frac{2\mu_P}{\mu_F}, \text{ pak}$$

$$A_p = \frac{A_{F\mu F}}{2\mu_F} = \frac{0.0271 + 0.0014072}{2 \cdot 0.001002} = 0.01906; B_p = \frac{B_{F\mu F}}{2\mu_F} = \frac{3.571 \cdot 10^{-6} + 0.0014072}{2 \cdot 0.001002} = 2.508 \cdot 10^{-6}$$

$$\text{Čas promývání: } \tau_p = \frac{V_F(V_F + A_F)}{B_F} = \frac{0.0201(0.1006 + 0.01906)}{2.508 \cdot 10^{-6}} = 960.5s$$

Celková doba jednoho filtračního cyklu je pak:

$$\tau_c = \tau_F + \tau_p + \tau_z = 1h + 960.5s + 20min = 3600 + 960.5 + 1200 = 5760.5s$$

Počet cyklů za den je pak:

$$n_c = \frac{24 \cdot 60 \cdot 60}{5760.5} = 14.998 \sim 15 \text{ cyklů za den.}$$

Množství vyprodukovaného filtrátu je pak:

$$V_{Ftotal} = V_F \cdot n_c = 0.1006 \cdot 15 = 1.5093m^3$$

Odpověď: Za jeden den se na nuči vyprodukuje 1.5093 m³ filtrátu.

3.6. Uvádění pevných látek do styku s tekutinou



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- vyjmenovat obvyklé cíle kontaktování pevných látek a tekutin
- popsat principy suspenzačního míchání, fluidace, mletí a drcení
- charakterizovat hlavní typy míchadel a jejich použitelnost
- vysvětlit chování částic při různých rychlostech tekutiny při fluidaci



Výklad

Procesem stejně důležitým jako oddělování pevných částic z tekutiny je uvádění částice do co nejlepšího styku s kapalinou. Tekutiny kontaktujeme s pevnou fází s různými cíli:

- rozpouštění a krystalizace pevných látek
- loužení pevných látek (rozpouštění vybraných složek)
- přenos tepla mezi tekutinou a nepohyblivou vrstvou regenerátoru tepla,
- přenos tepla mezi teplotonosnou tekutinou a obtékaným, příp. fluidovaným zrnitým materiálem,
- zachycování částecek suspenze v loži hloubkového filtru,
- zachycování některé složky tekutiny (větší molekuly) na povrchu sorbentu,
- zachycování některé složky tekutiny (menší molekuly) v pórech molekulového síta,
- dočasné zachycování molekul tekutiny na povrchu heterogenního katalyzátoru,
- heterogenní reaktory s přítomností pevné fáze v tekutině.

V zásadě existují následující typy kontaktování: buďto jde proudění tekutiny ložem pevným, nebo o pohyb suspendovaných částic v tekutině. **Pevné lože** je buďto vytvořeno **vrstvou** částic (zrna, tablety), které při průchodu tekutiny zůstávají nepohyblivé (podmínky jsme si ujasnili v kapitole o usazování) nebo jde o **monolitické lože** bloku materiálu, ve kterém jsou vytvořeny zhruba stejně velké kanálky. V takových případech se protékající tekutina dosti rovnoměrně rozděluje po celé šířce lože a povrch lože je rovnoměrně obtékán prakticky jednosměrným **pístovým tokem** (od vstupu k výstupu bez výrazného zpětného promíchávání).

Příkladem sypané vrstvy je třeba pískový filtr v úpravě pitné vody, drť aktivního uhlí ve filtru plynové masky nebo tablety heterogenního katalyzátoru. Monolitické lože může být vytvářeno ze slinutých zrnitých částic (keramika, kov) nebo spojením vláknitých částic (papír, plst, tkaniny).

Suspendované částice se udrží ve vznosu, pokud je vyvozováno dosti rychlé proudění tekutiny. K tomuto cíli se používá buďto **suspendace** (mechanickým mícháním) - nebo **fluidace** (vzestupného proudění tekutiny - pro obvyklejší případ částic vyšší hustoty než má tekutina). Jde zde o prakticky **dokonalé míchání**, při němž tekutina má v celém objemu stejnou koncentraci a částice jsou po prostoru rozmístěny bez ohledu na to kdy a jak byly dovnitř vneseny. Výhodou fluidního lože je, že se z prostoru lože snadno dají částice průběžně odvádět a nové nebo regenerované vracet zpět.

Příkladem takové fluidní vrstvy je třeba vločkový mrak v úpravě vody nebo použití práškových katalyzátorů třeba pro krakování, hydrogenaci nebo Fischer-Tropschovu syntézu.

Suspendace

Suspendaci bráníme usazování, což má v procesních technologiích za cíl **uvedení částic do vznosu** aby probíhaly rychleji procesy přenosu tepla a hmoty.

V domácnosti třeba vyluhování (čaje, kávy, hovězího masa, praní prádla), ohřev (krupice, nudle), rozpouštění (cukr, prací prášky).

V materiálových technologiích může být cílem samotná suspenze. (např. brusná pasta, nátěrová hmota, pudink). Suspendaci zajišťujeme **mícháním**; obecně je zapotřebí, aby vyvolávané vzestupné proudění mělo větší rychlost, než je rychlost pádová. To znamená, že obvodová rychlost míchadla by měla být značně větší než pádová rychlost,

$$\omega r \equiv \pi N d > u_p.$$

Moc vysoká rychlost by ale obráceně mohla vést k odstředování těžších částic nebo dostředování lehčích. Pro suspendaci se také hodí přesypání materiálu v ležaté rotující nádobě (rotační sušárna, cementářská pec, míchačka na maltu, automatická pračka). Zvláštním případem suspendace je uvádění do vznosu proudem tekutiny – **fluidace**. Na uvedených příkladech si můžeme uvědomit, že pro účinný styk dispergované a spojité fáze je výhodné, když suspendace i usazování probíhají současně, případně střídavě.

Můžeme-li volit velikost částic, pak si je třeba uvědomit, že u jemnějších částic usnadňujeme suspendaci, ale zhoršujeme usazování. Kvalitativní skok se odehrává na přechodu z mikrorozměrů (nad 1 μm) k nanorozměrům (pod 1 μm – částice nepozorovatelné optickým mikroskopem), kde se také síly tíže stávají zanedbatelnými vůči koloidním silám mezi povrchy částic.

I v případě sdílení tepla, hmoty a chemické reakce musíme uvažovat, zda jsou výhodnější větší částice, jejichž povrch je při pádu intenzivněji oplachován vnější tekutinou, nebo drobnější nesedimentující částice s velkým úhrnným povrchem, odkázané však při pomalé relativní rychlosti vůči tekutině prakticky jen na přenos tepla vedením a hmoty difuzí.

Sedimentaci se snažíme také co možno potlačit, pokud žádoucím výsledkem je **disperzní materiál**. Jsou to například nátěrové hmoty, mazadla, latexy, mléčné výrobky, kosmetické krémy a jiné suspenze a emulze. Zde se do jisté míry potkávají problémy pevných a tekutých částic. Aby byly disperze stabilní, prakticky nesedimentující, je výhodné mít spíše menší částice (což vytváříme homogenizací, egalizací). K udržení rozestupů mezi koloidními částicemi pak stačí slabé mezimolekulární síly, které se dají podpořit přísadami některých činidel (emulgátory). Při vytváření malých částic (dispergaci) je třeba vynaložit jistou **povrchovou energii**, kterou lze vypočítat jako součin (σS) povrchového napětí σ a vzniklé plochy S .

Pro vodu je $\sigma=0,07$ N/m, takže k rozbití 1 kg vody na milimetrové kapky (plocha 6 m^2) je potřeba poměrně malé energie 0,4 J, když by částice měly mít rozměr $1 \mu\text{m}$ (plocha 6000 m^2), pak by již šlo o významnou energii 400 J. Vytváření nanometrických částic vyžaduje již zvláštní postupy.

Pro zmenšení pevných částic používáme techniky **mletí a drcení**. Užitečná energie, potřebná na vytvoření nového povrchu pevného materiálu je podstatně vyšší než u tekutých částic. Ve skutečnosti se v mlýnech a drtičích je jen část energie využita na drcení (normálový tlak trvalý nebo v jednotlivých rázech), štípání (místní normálová síla) nebo roztírání (tečné napětí). Velký podíl energie se vždy neužitečně ztrácí bez mlecího účinku pouhým třením mezi částicemi mletého materiálu. Zařízení pro mletí a drcení jsou energeticky a materiálově náročná a hlučná. Síla se přenáší na částice buďto pohyblivými částmi drtiče nebo mlýna nebo se materiál mele mezi přesypávanými těžkými tvrdými mlecími prvky, např. v kulových mlýnech kovovými nebo keramickými koulemi. Při mletí hornin někdy stačí ve mlýně přesypat samotné velké kusy horniny.

Energii na **dispergaci** tekutin dodáváme např. rychle rotujícími nebo vibrujícími míchadly, rozprašováním směsi úzkými tryskami, ultrazvukem apod. Mechanický účinek může někdy vést ke kvalitativně odlišným výsledkům, zejména u disperzí nemísitelných tekutin, kde může vzniknout produkt různého typu.

Intenzivním mícháním smetany (kapky tuku ve spojitém vodném prostředí) můžeme dostat buďto šlehačku (strháváním plynu z hladiny vytvoříme třífázovou pěnu vodná fáze-tuková fáze-plynná fáze) nebo dojde k inverzi fází a vznikne máslo (kapky vodné fáze ve spojitém prostředí tuku neboli krém).

Podobné je to u mazadel nebo kosmetických výrobků.

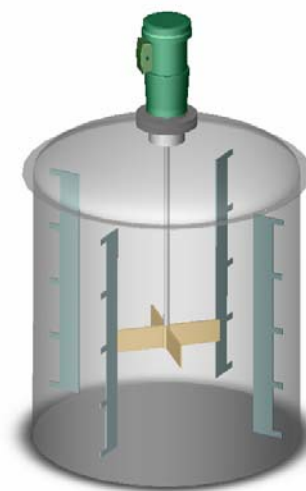
Pro dispergaci je výhodné umístit míchadlo do blízkosti fázového rozhraní, umístění míchadla do prostoru s menším zastoupením spojitě fáze se dá podpořit inverze a koalescence – např. mechanické rozbíjení pěny. Tomu může pomoci i chemické zachycení povrchově aktivních látek např. přísadou stop oleje k napěněné polární kapalině.

I když se zpravidla při vyšší rychlosti míchadla, vytvářejí jemnější disperze, existují i případy, kdy rychle rotující míchadlo začne působit jako odstředivka a fáze se v něm budou spíše separovat. V oblasti nižšího tlaku za listem míchadla (nebo oběžného kola odstředivého čerpadla) se pak mohou vytvářet a shromažďovat bubliny plynu nebo par (zejména při teplotách blízkých teplotě varu kapaliny), a jejich uvolňování bývá doprovázeno smršťováním až zánikem bubliny s akustickými efekty. Tomuto jevu říkáme **kavitace** a její mechanické rázy jsou nežádoucí nejen přímo ale i tím, že podporují korozi.

Poměr odstředivých sil k tíži je dán **Froudeovým číslem**

$$Fr \equiv \frac{\rho N^2 d}{\Delta \rho g}, \quad (3-57)$$

kteř by mělo být malé, aby nedocházelo k hromadění lehčí fáze v prostoru míchadla. Pro případ strhávání plynu od hladiny do promíchávané kapaliny je rozdíl hustot fází prakticky roven hustotě



Obr.3.53. Míchaná nádoba s rychloběžným míchadlem
Míchací ústrojí sestává z motoru, převodovky, hřídele (u uzavřených nádob procházející ucpávkou) a vlastního míchadla. Nádoba je u stěn opatřována nárazkami, které převádějí rotaci kapaliny na složitější proudění.

kapaliny; $\Delta\rho \approx \rho$. Ve válcových nádobách běžné konstrukce se souose umístěným míchadlem se dá očekávat vznik víru, strhávaného do oblasti míchadla již při $Fr > 0,1$; v nádobách s narážkami, brzdícími rotaci až při $Fr > 1$; záleží to však značně i na výšce hladiny nad míchadlem.

Míchadla

Míchání je záměrné spotřebovávání mechanické energie v tekutině na vyvození složitěho proudění, při kterém se tekutina deformuje a přeskupuje. Nejběžnější možností je použití míchacích zařízení s rotačními míchadly. Charakter proudění tekutiny se dá odvodit od průměru d (m) míchadla a frekvence otáčení N (s⁻¹) s použitím základních vlastností tekutiny ρ a μ . **Reynoldsovo číslo pro míchání** je

$$Re_M \equiv \frac{N d^2 \rho}{\mu} \quad (3-58)$$

Pro $Re_M < 10$ míchadlo pouze prohrabává laminárně se přemísťující tekutinu a proto zde používáme **pomaloběžná míchadla** složitějšího tvaru, zasahující při otáčení větší část vsádky. Pro $Re_M > 100$ se výrazně projevuje setrvačnost. Tekutina roztočená i poměrně malým **rychlloběžným míchadlem** (poměr průměru míchadla d k průměru nádoby D se volí v rozsahu $0,1 < d/D < 0,5$) je odstředivou silou rozháněna po vsádce a projevuje se i turbulence.

Sílu, která působí na lopatku míchadla, můžeme odhadnout pomocí vztahu pro obtok tělesa

$$\frac{F/S_0}{\frac{1}{2} \rho u^2} = C_D(Re). \text{ Až na násobné konstanty, závisejících na geometrických simplexech míchadla, je}$$

plocha míchadla úměrná d^2 a rychlost součinu Nd . Navíc nás u míchadla primárně nezajímá síla F , ale kroutící moment úměrný součinu Fd a příkon P , který je u rotačního systému úměrný součinu FNd .

Příkon je podstatný pro dimenzování motoru a dalších mechanických prvků míchacího ústrojí (převodovka, hřídel). Protože celý příkon je spotřebován na proudění v míchané tekutině, dává nám P také informaci, jak intenzivní je tam proudění, což je důležité pro všechny mícháním podporované procesy.

Mechanický **příkon míchadla** P (W) pro rychloběžná míchadla je tedy účelné popsat bezrozměrovým **příkonovým číslem** Po ,

$$Po \equiv \frac{P}{\rho N^3 d^5}, \quad (3-59)$$

které je funkcí Re_M . Tuto funkci $Po(Re_M)$ pro dané geometrické uspořádání nazýváme **příkonová charakteristika míchadla** a její průběh pochopitelně připomíná funkci $C_D(Re_P)$ v tom, že pro velká Reynoldsova čísla je Po prakticky konstantní (a podle typu míchadla je $0,2 < Po < 6$) a pro malá Reynoldsova čísla je zase konstantní součin $Po \times Re_M$ (podle typu míchadla je $20 < Po \times Re_M < 300$). Příkonové charakteristiky pro běžná míchadla jsou uvedeny v normách a ve firemní literatuře.

Pro běžné nízkoviskózní kapaliny v nádobách běžných provozních rozměrů se pracuje obvykle v oblasti vysokých $Re_M \gg 1000$ a otáčky míchadla volíme na základě přibližného pravidla, že intenzivní míchání nastává při **měrném příkonu** (příkonu P , vztaženém na objem V vsádky) asi $P/V = 1000 \text{ W/m}^3$; při $P/V = 2000 \text{ W/m}^3$ již bývá hladina nebezpečně bouřlivá.

V zásobních nádržích, kde se zvolna homogenizuje směs s malým kolísáním složení, se vystačí i s velmi volným mícháním jen třeba s $P/V = 50 \text{ W/m}^3$.

Pro vysoce viskózní kapaliny se volí podstatně nižší frekvence otáčení pomaloběžných míchadel, aby kapalina hrnutá míchadlem stačila obtékat kolem míchadla. Vysoké příkony zde znamenají také významnou přeměnu mechanické energie na teplo.

Mícháním lze obecně podporovat řadu různých procesů:

- homogenizaci (vyrovnávání koncentrace mísitelných nebo distribuce nemísitelných složek)
- rozpouštění
- suspendaci (uvádění částic do vznosu),
- emulgaci (rozbíjení nemísitelných kapalin na kapky),

- aeraci (štěpení bublin a rozvádění plynu po kapalině),
- sdílení tepla (vyrovnávání teplot a přestup tepla u stěn a vestaveb),
- kombinace zmíněných procesů v chemických reaktorech
- kombinace zmíněných procesů při vytváření materiálů (např. tvorba disperzí, podpora vzniku krystalů žadaného rozměru, apod.).

Fluidace

Proudí-li kapalina nebo plyn vzhůru trubicí, ve které je lože částic zrnitého materiálu, pak může nastat několik situací v závislosti na rychlosti tekutiny. Rychlost tekutiny zde hodnotíme veličinou nazývanou **mimovrstvová rychlost** u_0 /(m/s)

$$u_0 = V'/S_0 \quad (3-60)$$

což je podíl objemového průtoku tekutiny V' /(m³/s) a volného průřezu S_0 /(m²) zařízení (bez částic). Při malých rychlostech u_0 tekutina nehybným ložem částic protéká. Pokud bude vzestupné proudění kolem částice větší než její pádová rychlost u_p , dojde nepochybně k úletu částic. Rychlost vzestupného proudění kolem částic v pevném loži můžeme odhadnout pomocí porozity lože ε_0 . Volný průřez mezi částicemi bude v průměru roven $\varepsilon_0 S_0$ takže proudící tekutina zde bude mít rychlost

$$u = u_0/\varepsilon_0. \quad (3-61)$$

Ze zákonitostí usazování je zřejmé, že pokud je $u \geq u_p$, budou částice nadlehčovány a vyzvedávány. Po překročení **prahové rychlosti**

$$u_0 \approx u_p \varepsilon_0 \quad (3-62)$$

se uvede protékající zrnitý materiál do **vznosu**, kdy vytvoří načechnou **fluidní vrstvu** (fluidní lože), ve které je porozita ε přibližně rovna

$$\varepsilon \approx u_0/u_p. \quad (3-63)$$

Při dalším zvyšování průtoku tekutiny se porozita zvyšuje a při

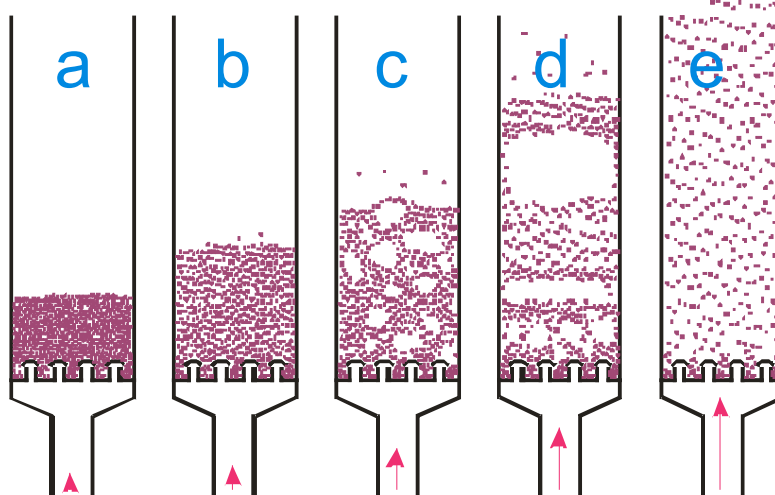
$$u_0 \approx u_p \quad (3-64)$$

se dosáhne **úletové rychlosti**.

Rozsah $v_p \varepsilon_0 < u_0 < u_p$ mezi vznosem a úletem je obvykle dosti široký abychom v těchto mezích provoz technických zařízení udrželi. Fluidní vrstva je významná zejména pro vznos částic v plynech; vznos částic v kapalinách se většinou dá zajistit snáze jednodušším mícháním.

Fluidní vrstva se chová do značné míry podobně jako kapalina, takže se s ní dá manipulovat lépe než s ležícím zrnitým materiálem. Částice jsou dosti rovnoměrně a intenzivně obtékány kapalinou nebo plynem, takže dochází k dobrému styku těchto látek, což je významné v řadě chemických reaktorů. Typickým použitím jsou **reaktory s fluidní vrstvou** pro některé reakce v plynech, katalyzované pevnými materiály ve vznosu (např. krakování uhlovodíků). Ve **fluidních sušárnách** se

z povrchu vznášejících částic (např. krystalový cukr) odpařuje proudem horkého vzduchu vlhkost. Nejrozsáhlejší aplikací jsou ohniště **fluidních elektrárenských kotlů**, kde se spaluje ve vznosu zrnité palivo, často ještě za přítomnosti mletého vápence, sloužícího pro odsíření. Vhodným rozšiřováním či



Obr. 3.54. Vrstva částic při rostoucím průtoku plynu.
a-pevné lože, b-fluidní lože, c-bublající fluidní vrstva,
d-pístitující fluidní vrstva, e-úlet

zužováním průřezu zařízení je možno účelně měnit mimovrstvovou rychlost a tím dosáhnout např. toho, že jemné částice popílku jsou odneseny z topeniště a v jiném prostoru se nechají usadit, zatímco neprohořelé částice paliva ve vrstvě setrvávají. Ze spodní části lože se dá zase odebírat kontinuálně těžší ložový popel. Fluidace se dá také využít pro **třídění částic** podle pádové rychlosti (odstraňování plev od zrna). V soustavě kapalina – zrnitý materiál se uvádění do vznosu aplikuje např. při proplachování pískových filtrů – částice šterku a písku poletující ve vznosu omílají při srážkách ze svého povrchu nánosy, které proplachová voda odnáší.

Samotné zařízení pro fluidaci je jednoduché, vyžaduje však vydatné dodávání plynu; tedy je závislé na energii, dodávané kompresory nebo dmychadly. Technické problémy fluidace se objevují zejména při návrhu velkých zařízení, kde je klíčovým bodem návrh **roštu**, kterým se do prostoru uvádí plyn a kterým naopak ani při sníženém toku plynu nepropadávají částice. Obvykle je tam soustava trubic, z nichž nad každou je umístěna malá stříška. Při nerovnoměrném zavádění plynu pod zrnitý materiál může plyn tvořit **kanály** a **mrtvé zóny**, procházet ve formě velkých bublin, **pulzovat** a také vystřelovat jednotlivé částice vysoko vzhůru nad hladinu vrstvy. Tyto jevy se však také objevují jako důsledek přirozené **nestability fluidní vrstvy** v intenzivních procesech s vysokými rychlostmi proudění.



Pojmy k zapamatování

Lože částic, monolitické lože, suspendované částice

Vznos, míchání, fluidace, disperzní materiál

Reynoldsovo a příkonové číslo pro míchání, Froudovo číslo

Pomaloběžná a rychloběžná míchadla

Fluidace, mimovrstvová rychlost, fluidace, prahová a úletová rychlost

3.7. Dělení směsí působením povrchových jevů



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat rovnováhu mezi spojitým prostředím a povrchem sorbentu
- charakterizovat proces adsorpce a jeho fáze při periodickém provozu
- rozumět principu iontoměničů, heterogenní katalýzy, chromatografie
- odlišit hloubkovou filtraci od filtrace koláčové



Výklad

Zachycování složek tekutiny na povrchu pevného materiálu

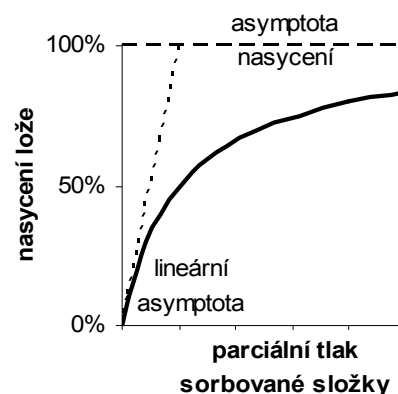
Sorbent je zpravidla pórzní materiál, který je upraven nejčastěji do **lože**, tvořeného nejběžněji vrstvou zrn nebo tablet. Méně běžnou volbou je monolitické lože nebo lože fluidní.

Obvyklou situací je, že hlavní složkou tekutiny je **nosná kapalina** nebo **nosný plyn**, jejichž molekuly se na **loži pevných částic sorbentu** nezachycují. Z tekuté směsi protékající ložem se některé (zpravidla málo zastoupené) složky – **adsorptiv** -mohou zachycovat pevněji nebo méně pevně na

povrchu částic lože. a jsou tím vůči pohybu nosné tekutiny buďto zcela zastaveny nebo alespoň zpomaleny.

Kontaktování se sorbentem je řízeno dvěma procesy: vnější proudění kapaliny a pohyb adsorptivu k povrchu.

Z hydrodynamického hlediska je podstatný tok okolo obvodové plochy částic či kanálků. Zde můžeme použít znalosti o toku porézním ložem nebo o obtoku sedimentující částice. Hlavní styčná plocha mezi částicí a tekutinou ale bývá zpravidla ukryta v pórech uvnitř pevného materiálu, kam se dostávají složky tekutiny od obvodu částic pouze pomalejší difuzí.



Podle velikosti zachycovaných částic a typu povrchových sil pojmenováváme tyto procesy různě; avšak z hlediska provozování mají tyto procesy velmi podobný popis.

Při **hloubkové filtraci** se zachycují částice suspenze buďto čistě mechanicky tím, že zapadají do menších skulin, koloidní částice (neviditelné optickým mikroskopem) se mohou zachycovat povrchu lože působením elektrických sil.

V **elektrostatických odlučovačích** tomu ještě napomáháme nasazením velmi vysokého napětí (asi 15 000 V).

Rozsáhlou oblast představuje zachycování částic molekulární velikosti na pevných površích. **Molekulová síta** (nejčastěji jílové minerály typu zeolitů) připomínají hloubkovou filtraci tím, že mají nanometrické otvory velmi rovnoměrné velikosti, do kterých „zapadají“ molekuly určitého typu, zatímco ani větší ani podstatně menší molekuly zachycovány nejsou.

U **adsorpce** naopak mohou být mezimolekulárními silami různé intenzity přidržovány na povrchu lože nebo se zde dokonce mohou zachycovat i pevnějšími chemickými vazbami spíše větší a složitější molekuly.

Obsahuje-li nosná tekutina více složek, které se v loži zachycují různě snadno, dá se adsorpce využít k dělení těchto složek. Při proudění nosné tekutiny ložem, nasyceným směsí, se složky směsi vyplavují různou rychlostí. Tímto způsobem, nazývaným **chromatografie**, lze rozdělit i vícesložkové směsi, čehož se využívá hlavně v chemické analýze.

Ve všech zmíněných procesech máme nějaký typ lože, kterým kontinuálně proudí nosná tekutina a na loži se z ní zachycuje jedna složka. Z hlediska této složky a z hlediska lože jde o proces neustálý, který končí zanesením povrchu lože. **Sorpční kapacita** (rovnovážné množství složky zachytitelné v daném loži) závisí na její aktivitě v nosné tekutině. Je tedy možno změnou teploty, tlaku anebo použitím jiné proplachového plynu, rozpouštědla nebo vhodného chemického činidla dospět k **desorpci** – složku vypudit a jednak tím **regenerovat lože**, jednak je možno dostat uvolněnou složku v koncentrovanější nebo zcela čisté formě. V některých případech je zachycovaná složka bezcenná a vrstva je levná – pak je zanesené lože odpadem.

Adsorpce

Rovnovážné množství dané látky v daném loži – **sorpční kapacita** - závisí se koncentrací v nosné tekutině dá vyjadřovat různým způsobem.

U adsorpce materiál lože nazýváme **sorbent** nebo **adsorbent** a jeho klíčovou kvantitativní vlastností je údaj o sorpční rovnováze. Sorpční rovnováha závisí na povrchových vlastnostech lože, na teplotě a na obsahu **adsorptivu** (zachycované látky) v tekutině. Pro danou teplotu je tato závislost vyjádřena většinou nelineární závislostí, kterou fyzikální chemik popisuje s lepší či horší přiléhavostí vybranou funkcí označovanou jako **adsorpční izoterma**.

Pro adsorpci plynů je nejznámější formou této funkce izoterma Langmuirova, o něco komplikovanější ale i ohebnější je izoterma BET, případně i další. Toto jsou semiempirické vztahy, většinou založené na

Obr. 3.55 Typický průběh Langmuirovy izotermy

nějaké zjednodušené fyzikální představě o ději; jejich konstanty tudíž mívají fyzikálně-chemický smysl. Pro pohodlnost výpočtů se ale často volí populární izoterma Freundlichova (mocninová funkce bez teoretického opodstatnění).

Vyjádření hlavních veličin v adsorpční izotermě se volí účelově. Obsah adsorptivu v kontinuální fázi fyzikálně-chemicky charakterizujeme u plynů parciálním tlakem, relativním molárním (nebo objemovým) zlomkem, u kapalin spíše molární koncentrací. Množství sorbované látky vyjadřujeme např. v počtech molů adsorbátu (to jest adsorptivu, zachyceného na sorbentu), vztažených na jednotku povrchové plochy sorbentu. V technické praxi se spíše přikláníme k údajům o **sorpční kapacitě**, vyjádřeném jako hmotnost adsorbátu vztažená na jednotku hmotnosti sorbentu nebo dokonce na jednotku objemu lože sorbentu. V technických úvahách to vyjadřujeme relativním hmotnostním zlomkem X , to jest kolik kg látky je zachyceno na 1 kg sorbentu.

K přepočtům těchto veličin potřebujeme znát porozitu ε (poměr volného objemu lože k celkovému objemu), hustotu částic sorbentu, případně i **měrný povrch sorbentu** (plocha aktivního povrchu vztažená na jednotku hmotnosti).

Měrný povrch sorbentů s póry nanometrové velikosti (např. aktivní uhlí, zeolity) dosahuje až hodnot $10^6 \text{ m}^2/\text{kg}$.

Při vysokých parciálních tlacích se můžeme dostat do situace, ve které už je sorbent zcela nasycen. Potom můžeme stav nasycení vztahovat k této hodnotě, jak je ukázáno na obr.3.55. Na druhé straně je i mnoho prakticky zajímavých situací, ve kterých parciální tlak složky je tak nízký, že lze předpokládat přijatelnost lineární asymptoty.

Obecně můžeme adsorpční izotermu můžeme vyjádřit pro danou teplotu například jako rovnovážnou funkci $X=X^*(Y)$ mezi X a relativním hmotnostním zlomkem Y adsorptivu v tekutině. (Pokud sorbujeme z plynné směsi, volíme jako nezávisle proměnnou často parciální tlak p_A adsorptivu místo Y , ale jinak jsou úvahy obdobné.)

Závislost adsorpční rovnováhy na teplotě vyplývá z podstaty procesu, při němž se při adsorpci molekuly adsorbátu v pórech srovnávají do organizované povrchové vrstvy s nižší energií, $\Delta H < 0$. Při adsorpci se tedy uvolňuje teplo podobně jako při kondenzaci par nebo krystalizaci kapalin. Znamená to, že při dané aktivitě adsorptivu ve spojitě fázi bude zásadně sorpční kapacita s rostoucí teplotou klesat (LeChatelierovo pravidlo).

□ Adsorpce s chemickou reakcí

Zvláštní třídu adsorpcí představují procesy, při nichž dochází na povrchu sorbentu k chemické reakci. Nejjednodušším příkladem je **chemisorpce**, při které se na povrchu sorbentu vytváří stabilní vrstva produktu reakce, probíhající mezi adsorbátem a sorbentem nebo složkou, ukotvenou na jeho povrchu.

Při **výměně iontů** na **iontoměničích** se adsorbát krátkodobě zadrží na povrchu sorbentu, kde dojde k jednoduché výměnné reakci, jejíž produkt adsorpci nepodléhá, takže se uvolňuje zpět do spojitě fáze. Typickými iontoměniči jsou **anexy**, které zachytávají složitější anionty výměnou za ion hydroxylový nebo jiný jednodušší anion. **Katexy** zase zachytávají těžší kationty výměnou např. za vodík nebo alkalický kov.

Jako iontoměniče působí i jílové minerály, díky čemuž spodní vody, vzniklé průsakem, mají v daném geologickém útvaru velmi stálé složení, do jisté míry nezávisle na kvalitě vsakované vody.

Adsorpce a desorpce je rovněž součástí řetězce procesů, odehrávajících se při **heterogenní katalýze**. **Heterogenní katalyzátor** je zpravidla sorbent, na jehož povrchu se sorpcí shromáždí ve vyšší koncentraci reaktanty, díky tomu rychleji zreagují. Výhodou je když se žádaný produkt reakce zpět uvolňuje a ponechává prostor pro pokračování reakce. Velice specifické složité katalyzované reakce organické chemie v živé přírodě se odehrávají na **enzymech**, které jsou někdy rozpustné, ale často jsou nepohyblivě zakotveny na podložce. Heterogenní katalýzou se podrobněji zabýváme na molekulární úrovni v příslušných předmětech fyzikální chemie a technickou realizací v předmětu reaktorové inženýrství.

U chemisorpce a u iontoměničů se zanesený povrch regeneruje chemickou reakcí se vhodným činidlem. Heterogenní katalyzátory musíme regenerovat jen tehdy, když se do reakční směsi dostávají katalytické jedy - látky které postupně obsazují a blokují aktivní povrch.

Hledání a úprava sorbentů, iontoměničů a katalyzátorů s velkým aktivním povrchem se specifickým chemickým chováním patří k významnému odvětví materiálového inženýrství, ve kterém lze stále očekávat zajímavý pokrok.

Adsorpční zařízení

□ Adsorpční kolony

Obvyklý typ adsorpčního procesu je neustálený. Používá pevné lože sorbentu v trubici nebo ve štíhlé věži, kudy kontinuálně protéká nosná tekutina. Zařízení označujeme jako adsorpční kolona. Předpokládáme, že:

- tekutina postupuje ložem **pístovým tokem**, což znamená, že proces probíhá v celé šířce adsorbéru stejně, koncentrace $X(x,t)$, $Y(x,t)$ pak závisí jen na vzdálenosti x od vstupu do adsorbéru a na čase t ,
- **mimovrstvová rychlost** tekutiny je u_0 , **porozita** vrstvy je ε , **rychlost postupu tekutiny** vrstvou je $u = u_0/\varepsilon_0$.
- na začátku procesu pro $t=0$ je v celém aparátu $Y(x,t) = Y_0$ a $X(x,t) = X^*(Y_0)$,
- hustota tekutiny je ρ_L hustota částic sorbentu ρ_S ,
- proudění je přiměřeně pomalé, takže v každém místě a čase můžeme předpokládat, že koncentrace $X(x,t)$ a $Y(x,t)$ jsou v **rovnováze**,
- obsah adsorptivu ve vstupní tekutině označme $Y(0,t) = Y_1(t)$.

Typické případy jsou:

1. **adsorpce**, vycházející s nízkého – nejčastěji nulového Y_0 a uvádějící do lože tekutinu s vyšší koncentrací $Y_1 = \text{konst.}$ V loži dochází k rovnováze a zachycené množství můžeme charakterizovat relativní koncentrací $X_1 = X^*(Y_1)$. V jednotce objemu lože je hmotnost tekutiny rovna $\varepsilon \rho_F$ hmotnost částic $(1-\varepsilon) \rho_S$, a akumulované množství sorbované látky v jednotce objemu nasyceného lože je tedy $[\varepsilon \rho_F Y_1 + (1-\varepsilon) \rho_S X_1]$. Lože se postupně zaplňuje adsorbtem a jestliže mimovrstvová rychlost tekutiny je u_0 , rychlost postup čela nasyceného lože je

$$u_1 = \frac{u_0}{\varepsilon + (1-\varepsilon) \frac{\rho_S}{\rho_F} \frac{[X^*(Y_1) - X^*(Y_0)]}{Y_1 - Y_0}}$$

V případě, že pracujeme při nižších koncentracích, kde lze předpokládat jednoduchou lineární sorpční rovnováhu, zjednoduší se to na

$$u_1 = \frac{u_0}{\varepsilon + (1-\varepsilon) \frac{\rho_S}{\rho_F} k} \quad \text{pro } X^* = k Y.$$

Čelo dosáhne konce délky L adsorpční vrstvy za čas

$$t_1 = \frac{L}{u_1}$$

a tím je adsorpce ukončena. Ve skutečnosti není rychlost přenosu látky mezi tekutinou a sorbentem nekonečně rychlá a bývají tam i další neidealities, takže čelo adsorpční vlny není ostré, avšak rychlost jejího postupu to neovlivní. Sledujeme-li rozložení adsorbované látky v adsorpční koloně, můžeme tam pozorovat **adsorpční frontu**. Sledujeme-li výstup látky z kolony v čase, objeví se tam okolo času t_1 **průnik** (průraz).

2. **vyplachování vrstvy** čistou tekutinou, např. po zpětném snížení koncentrace z Y_1 na Y_0 . Snadno se dá odvodit, že rychlost postupu čela vypláchnuté vrstvy je shodná jako výše uvedená rychlost postupu vrstvy u_1 .

3. **chromatografie** využívá rozdílné rychlosti postupu látek s odlišným poměrem X^*/Y . Pro nízké koncentrace je tento poměr téměř nezávislý na koncentraci. Jestliže vneseme nějakou směs pulsně do proudu nosné tekutiny (kapalinová nebo plynová chromatografie), objeví se na výstupu z lože (chromatografické kolony) jednotlivé její složky v různých časech t_1 . Tento čas i velikost výstupního

„píku“, indikovaného vhodným detektorem, můžeme experimentálně zjistit pro danou chromatografickou kolonu při daném průtoku vnesením známého množství čisté látky. K indikovanému množství vystupující látky můžeme tedy podle signálu detektoru podle doby průchodu kolonou přiřadit kvalitativní složení nástřiku a podle výšky píků i kvantitativní množství jednotlivých složek.

□ Adsorbéry s pohyblivým ložem

Jinou možností je použít míchané adsorbéry, ve kterých se tekutina adsorbuje do pohybujících se částic sorbentu. Míchání může být zajištěno mechanickými míchadly, proudem samotné tekutiny fluidovanou vrstvou částic sorbentu nebo pomocnou tekutinou, např. promícháváním suspenze sorbentu v kapalině airliftem pomocí plynu. Pokud je takové zařízení provozováno vsádkově, stoupá nasycení současně ve všech částicích sorbentu. Takový proces se dá kontinualizovat, pokud průběžně odebíráme z lože částice sorbentu a přivádíme částice regenerované. Mnoho zařízení podobného typu se používá i tam, kde je adsorpce jen jedním krokem, sloužícím pro uvedení tekutiny do styku s částicemi, například v reaktorech s heterogenními katalyzátory.

□ Regenerace sorbentů

Samotným vyplachováním dostaneme do tekutiny adsorbátů v nízké koncentraci. Můžeme však vyplachování zlepšit posunem sorpční rovnováhy zvýšením teploty, nebo snížením celkového nebo parciálního tlaku. Klasickým příkladem je odstranění nepolárního adsorbátu pomocí vodní páry. Pára zvyšuje teplotu a svou přítomností snižuje parciální tlak sorbované látky nad vrstvou. Výhodné je to tehdy, kdy adsorbát je za nižších teplot látka, nerozpustná ve vodě. Po kondenzaci páry se nepolární složka vydělí jako čistá kapalina. Střídání adsorpce a desorpce se dá využít k získávání čistých látek nejlépe s použitím proměnného tlaku.

□ Adsorpce s pohupujícím se tlakem (PSA)

Tento postup, vhodný pro adsorpci z plynů, je obecně nazýván technikou **PSA (pressure swing adsorption)** případně **VSA (vacuum swing adsorption)**. Sorbent podrobíme styku se směsí plynů při vyšším tlaku, kdy se některá složka plynu sorbentem zachytí. Po nasycení tuto složku desorbujeme do jiného prostoru s nižším tlakem. Používáme to pro dělení plynů vysoko nad jejich kritickou teplotou, a používáme k tomu molekulová síta. Ta mají poměrně malou sorpční kapacitu, takže jsou velmi rychle nasycována. Typická průmyslová zařízení pracují s desítkami tun molekulových sít, umístěných v baterii věží. Nasycení se odehraje během několika minut, takže proces zvyšování a snižování tlaku vyžaduje automatické udržování přesného časového režimu přepínání jednotlivých proudů s použitím několika věží, v nichž probíhají jednotlivé etapy procesu je možno dosáhnout téměř plynulého průtoku vstupního plynu a vystupujících rozdělených proudů. Vhodným recyklem se někdy vrací nedokonale oddělené směsi, čímž se dá nakonec dosáhnout vysoké čistoty produktů.

Hloubková filtrace

Hloubková filtrace zachycuje částice, které jsou menší než póry filtrační přepážky. Podobně jako u adsorpce by se dala určit kapacita filtrační vrstvy a doba průniku t_1 . Příkladem hloubkové filtrace je přeměna povrchové vody na pramenitou během průchodu vrstvou zeminy, podobný proces se provádí v úpravách vody na pískových filtrech. Filtry se postupně zanášejí, někdy se dokonce i snižuje průchodnost tekutiny (zvyšuje se hydraulický odpor). Pro zachování funkčnosti se musejí periodicky pískové filtry regenerovat prudkým propláchnutím, při němž se uvedou částice do vzhledu a vrstva nečistoty se omele a odplaví. Papírové filtry ve vysavačích působí jednak jako běžná filtrační přepážka pro koláčovou filtraci větších částic, jednak se na vláknech papíru zachycují hloubkově mikroskopické částice např. mikroorganismy. Podobně jako papírové filtry vzduchu pro automobilní motory, je nutno je pro zachování funkčnosti po zanesení měnit.

Částice se dají s výhodou zachycovat na vlhkých površích. Olejové filtry vzduchu u traktorů mají poměrně řídkou kovovou výplň smáčenou prokapávajícím olejem, do něhož se prachové částice

zachycují. Podobně působí novější typy vysavačů prachu, zachycujících nečistotu do vody. Je zde kombinováno usazování jako v proudovém usazováku (cyklon) s využitím vodní vrstvy. Ve velkém měřítku se mokré odlučování používá při odstraňování úletu jemného prachu z průmyslových aparátů, např. odprašky z vysokých pecí nebo oceláren. Kapalina v pračkách plynu může být rozstříkována do plynu nejrůznějším způsobem: sprchami, točícími se rotory, může být i strhávána proudem plynu v zúženém potrubí (Venturiho pračky).

Využití povrchově aktivních látek

Zachycování částic na povrchu jiné fáze a jejich uvolňování se může ovlivnit přítomností povrchově aktivních látek – **tenzidů**. Každému je známo uvolňování adsorbovaných mastných částic „špíny“ do vody a na její napěněný povrch pomocí mýdla a saponátů.

Výběrem tenzidů můžeme buďto udržet disperzi nemísitelných látek, nebo podpořit její koalesenci a usazování. Zvláštním případem je **flotace**, při níž se dosáhne toho, že ve směsi chemicky různých pevných částic se jen některé smáčejí. Probubláváním suspenze rozemleté horniny je tak možno zachytit na bublinky a vynést k hladině částičky rudy, zatímco hlušina zůstane u dna.



Pojmy k zapamatování

Adsorpce, desorpce, chemisorpce, iontoměniče, molekulová síta, PSA, VSA

Adsorpční izoterma, sorpční kapacita, měrný povrch. Adsorpční front, průnik (průraz), chromatografie. Hlubková filtrace

Flotace

4. SDÍLENÍ TEPLA

4.1. Teplo a mechanismus jeho přenosu



Čas ke studiu: xx hodin



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- vymezit polohu sdílení tepla v bilanci energie
- popsat typické zdroje tepla
- vymezit vztahy mezi teplem a teplotou
- rozložit tři základní mechanismy přenosu tepla



Výklad

Formy energie

Setkáváme se s řadou forem energie, které se mohou podle termodynamických zákonů na sebe přeměňovat a mohou se různými mechanismy přemísťovat v prostoru, zaujímaném nějakou hmotou, a mohou se i přenášet z jednoho prostoru do druhého.

V procesních technologiích připadají v úvahu především následující typy energie:

Energie	mechanická	potenciální
		kinetická
		objemová

tepelná zjevná

skupenská
chemická

elektrická

Obvykle se daří rozdělit systém na bilanční podsystemy, ve kterých se ve sledovaném bilančním období výrazně mění jen některý typ energie. Provedme orientační srovnání významu různých druhů energie.

Potenciální energie 1 kg, vynesného na střešinu 13-poschodové budovy (40 m) je $mgh=392$ J

Kinetická energie 1 kg při rychlosti 100 km/h je $mv^2/2=386$ J. Těleso vržené vzhůru touto rychlostí by mělo doletět skoro do výšky 40 m; tuto rychlost by zase mělo zhruba mít těleso volně spuštěné z této výšky

Tlaková energie 1 kg vody, zaujímající objem $V_1 = m/\rho$ vtlačené do prostoru o tlaku zvýšeném o $\Delta p = 400\,000$ Pa je $\Delta p V_1 = 400$ J. Toto zvýšení tlaku potřebujeme také, chceme-li čerpat kapalinu do výšky asi 40 m. Stejnou energii potřebujeme, abychom tam vyhnali 1 dm³ vody stlačeným vzduchem; toho vzduchu musíme pro izotermní stlačení vzít 5 dm³.

Vzájemnými přeměnami potenciální a kinetické energie se zabývá mechanika. Pro tekutiny přistupuje energie objemová a problémy řeší mechanika kontinua; jejím základním bilančním vztahem je Bernoulliho rovnice.

Tepelná energie se mění v reálných procesech podstatně více.

Zjevné teplo: k ohřevu 1 kg vody o 1 K je zapotřebí asi 4 200 J (tato hodnota mírně závisí na teplotě).

Skupenské teplo: k roztavení 1 kg ledu je zapotřebí asi 330 000 J – tedy 330 kJ, k odpaření 1 kg vody dokonce asi 2 300 kJ.

Chemické teplo: slučovací teplo 1 kg vody z prvků je 13 400 kJ. Spálením 1 kg uhlí se uvolní asi 30 000 kJ.

Srovnáním s mechanickou energií se nám ozřejmí důvod, proč v termochemických výpočtech je možno potenciální a kinetickou energii bez významné chyby zanedbávat.

Podobně zanedbáváme změny hmotnosti při obvyklých procesech; při spálení 1 kg uhlí se totiž podle rovnice $E=mc^2$ v bilanci hmotnosti ztratí jen prakticky nezměřitelné množství 0,0000003 g hmotnosti.

Proto zjednodušeně říkáme, že se fyzikálně chemickými procesy uvolňuje skrytá (latentní) energie.

Tlakovou energii však fyzikální chemik musí respektovat tehdy, když v procesu vystupují plyny nebo páry. Aby bylo jasné vymezeno, která část měnící se energie jde na účet samotného tepla a která jde na účet změny tlaku, zavedla termodynamika jednoznačně definované pojmy **vnitřní energie** a **enthalpie**. Pro chemickou praxi, kde se většina procesů odehrává za konstantního tlaku, je změna tepelné energie vyjádřena právě jen změnou enthalpie.

Elektrickou energii můžeme degradovat snadno na energii tepelnou; nejčastěji jde o elektrický odporový ohřev. Množství přeměněné energie za čas se vyjadřuje výkonem ve wattech. Ohřev tělesem o výkonu 1 kW dodává 1 000 J za 1 s.

Teplo a teplota, tepelná kapacita, měrná tepelná kapacita

V této kapitole se budeme věnovat sdílení tepla, kdy tou formou energie, která se v systému významně přenáší, je právě teplo – tedy energie, spojená se změnami teploty.

Teplo Q je forma energie; základní jednotkou je 1 J = 1 Ws = 1 kg m²s⁻²; často je používán 1 kJ=10³ J a další násobné jednotky MJ, GJ, někdy i 1 kWh= 3600 kJ.

Ve starší literatuře najdeme dnes opuštěné jednotky kalorie: 1 cal=4,184 J, kilokalorie (neboli velká kalorie): 1 kcal=4,184 kJ je množství tepla potřebné k ohřátí 1 kg vody o 1 K (přesně z 14,5°C na 15,5°C), British Thermal Unit: 1 BTU=1,055 kJ je množství tepla, potřebné k ohřátí 1 libry vody o 1 Fahrenheitův stupeň.

Jakožto energie je teplo veličinou extenzivní, bilancovatelnou.

Tepelný tok Q' je teplo přenesené za jednotku času

$$Q' = \frac{dQ}{dt} \quad (4-1)$$

Má rozměr výkonu a měří se ve wattech [1 W= 1 J/s].

Teplota T je jistým výrazem tepelné energie. Člověk pocit teploty v jistém rozmezí vnímá, pro její měření zavedl objektivní metody a prakticky používanou Celsiovu teploměrnou stupnici (v anglofonních zemích Fahrenheitovu stupnici) a pro vědecké účely racionálnější stupnici Kelvinovu. Teplota je základní stavovou proměnnou. Je to veličina intenzivní (nezáleží na celkové hmotnosti materiálu, v níž ji sledujeme). Při dosažení **tepelné rovnováhy** je teplota konstantní, což umožňuje snadno porovnávat teplotu s údajem teploměrného přístroje.

Ke zvýšení teploty nějakého objektu o ΔT je třeba dodat určitou tepelnou energii ΔQ . Poměr $\Delta Q/\Delta T$ málo závisí jak na ΔT tak i na T a někdy se nazývá **tepelná kapacita** tohoto objektu. Užitečnější veličinou je intenzivní veličina, ve které se uvažuje homogenní objekt o hmotnosti m , tvořený jediným materiálem. Touto intenzivní veličinou je **měrná tepelná kapacita** (ve starší literatuře nazývaná též měrné teplo nebo specifické teplo):

$$c_p = \frac{\Delta Q}{m \Delta T} \quad /(\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}) \quad (4-2)$$

Termodynamicky korektní definice se odvozuje od intenzivních energetických veličin H (enthalpie), U (vnitřní energie), vztažených na 1 mol (píšeme pak většinou C_p s velkým „C“), a rozeznává tepelnou kapacitu při konstantním tlaku

$$C_p = \left. \frac{\partial H}{\partial T} \right|_p \quad /(\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1}) \quad (4-3)$$

a při konstantním objemu

$$C_v = \left. \frac{\partial U}{\partial T} \right|_v \quad /(\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1}) \quad (4-4)$$

Tato definice, užívaná fyzikálními chemiky, však je použitelná výhradně pro chemicky definované látky. Pro ideální plyny platí jednoduchý vztah $C_v = C_p - R$, pro kondenzovanou fázi (kapaliny a pevné látky) je $C_v \approx C_p$.

V technické praxi, kde připadají v úvahu i obecné materiály, je lépe vztahovat teplo k hmotnosti. Takovou enthalpii značíme h (i když někde najdeme také H , i...) - v každém případě proto doporučujeme v technických výpočtech pečlivě sledovat, jak je uváděná měrná tepelná kapacita definována a v jakých jednotkách se číselně vyjadřuje. Slovo "měrná" se také v textech někdy (ne příliš šťastně) vynechává.

Měrná tepelná kapacita je stavová materiálová vlastnost, mírně závislá na teplotě. Přesnou závislost na teplotě je nutno uvažovat při termochemických výpočtech, ve kterých se pohybujeme daleko od standardních teplot. V technických úvahách stačí většinou odhady, založené na nějaké střední, průměrné měrné tepelné kapacitě c_p $/(\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1})$. Staré jednotky tepelné energie byly zvoleny tak, aby tepelná kapacita vody při 15°C byla právě $c_p = 1 \text{ cal g}^{-1}\text{K}^{-1} = 1 \text{ kcal kg}^{-1}\text{K}^{-1} = 1 \text{ BTU lb}^{-1}\text{F}^{-1}$. Typické hodnoty c_p leží, bez ohledu na skupenství, v poměrně úzkém rozsahu, jak je vidět v tabulce 4.1..

Tab.4.1. Přibližné hodnoty vlastností látek, důležité při přenosu tepla

látky	c_p kJ kg ⁻¹ K ⁻¹	λ W m ⁻¹ K ⁻¹	a = $\lambda/(\rho \cdot c_p)$ m ² s ⁻¹	ρ kgm ⁻³	μ mPa s	ν = μ/ρ m ² s ⁻¹	Δh_{vyp} kJ/kg	$\Delta h_{tání}$ kJ/kg	Pr = $\mu c_p/\lambda$ 1
voda	4,2	0,6	0,15*10 ⁻⁶	1000	1	1*10 ⁻⁶	2260	334	7
led	2	2	10 ⁻⁶	900	-	-	-	334	-
vodní pára	2	0,02	20*10 ⁻⁶	0,6	0,010	20*10 ⁻⁶	2260	-	1
vzduch, plyny (STP)	1	0,03	20*10 ⁻⁶	1,2	0,020	20*10 ⁻⁶	-	-	0,7
uhlovodíky methan (g)	2	0,05	30*10 ⁻⁶	0,7	0,010	5*10 ⁻⁶	500	-	0,5
hexan (l)	2	0,1	0,08*10 ⁻⁶	600	0,3	0,4*10 ⁻⁶	300	150	5
ocel ^(L) roztavená	0,45	40	10*10 ⁻⁶	7800	^(L) 5	^(L) 0,6*10 ⁻⁶	-	220	^(L) 0,06
hliník	0,9	200	100*10 ⁻⁶	2300	-	-	-	-	-
polymery	1-2	0,1-0,2	0,1*10 ⁻⁶	1000	0,5-∞	0,5*10 ⁻⁶ -∞	-	-	5 - ∞
kámen, sklo, keramika	0,8-1	0,5	0,2*10 ⁻⁶	2600	-	-	-	-	-
korek	0,2	0,04	0,6*10 ⁻⁶	300	-	-	-	-	-

Tepelné výpočty, bilance tepla

Tepelné výpočty jsou vždy založeny na řešení tepelných bilancí. V některých případech přistupuje i předpoklad rovnováhy. Hlavní počet tepelných úloh v chemickém inženýrství je spojen i s posouzením rychlosti procesu a s tím souvisejícím dimenzováním aparátů pro daný výkon nebo jinak zadaný účinek.

□ Zdroj tepla

V řadě případů známe **zdroj tepla** a zajímá nás, jak tento zdroj působí na **příjemce tepla**.

1. Zdrojem tepla může být **elektrický ohřev**. Známe-li jeho tepelný výkon P /(W) a realizujeme-li tento výkon v materiálu o hmotnosti m /(kg) a měrné tepelné kapacitě c_p /(J kg⁻¹K⁻¹), majícím tedy tepelnou kapacitu $m c_p$, pak rychlost akumulace tepelné energie se rovná vstupu a rychlost ohřevu je tedy

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P}{m c_p} \quad (4-5)$$

Jestliže ohříváním objemem materiál protéká objemovým průtokem

$$V' = \frac{dV}{dt} \quad (4-6)$$

pak výstup energie rovná se vstupu a ohřátí materiálu je

$$\Delta T = \frac{P}{\rho c_p V'} \quad (4-7)$$

(Domácí tepelné spotřebiče mají zpravidla výkon 0,5-2 kW, grily, vyžadující zvláštní elektrický přívod až 4 kW. Speciální těžké laboratorní pece až 100 kW.)

Teplota elektrického topného elementu závisí na odvodu tepla. Pokud odvodu tepla zabráníme, teplota roste a, pokud není zařízení opatřeno tepelnou pojistkou, dojde časem k přepálení topného tělesa nebo k požáru.

Ve výpočtech, založených na bilancích obvykle přičítáme celému systému jedinou teplotu. Tato bilanční teplota je v uzavřeném systému rovna teplotě, na které by se systém ustálil, kdyby byl od daného okamžiku izolován (případně pro zrychlení procesu promíchán). Tato **průměrná teplota** by se dala definovat integrálem přes objem V systému

$$T_{stř} = \frac{\int \rho c_p T dV}{\int \rho c_p dV}. \quad (4-8)$$

V průtočných systémech by to byla **střední směsná teplota**, kterou by nabyla tekutina protékající daným průřezem S po zachycení do nádoby a dokonalém promíchání. Tu získáme integrací

$$T_{směs} = \frac{\int \rho c_p T \vec{u} \cdot d\vec{S}}{\int \rho c_p \vec{u} \cdot d\vec{S}}, \quad (4-9)$$

ve které rychlost u a element plochy dS jsou vektory.

2. Zdrojem tepla je **chemická reakce** (obvykle hoření). Spalné teplo paliv, vztažené na jednotku hmotnosti se označuje je Q_{daf} , pro obvyklá skupenství spalných produktů (voda ve formě par) je využitelné teplo o něco nižší a označuje se jako výhřevnost Q_r /(kJ kg^{-1}). Např. při spalování paliva rychlostí $\dot{m}_p$ /(kg h^{-1}) je tepelný výkon

$$P[\text{W}] = \frac{\dot{m}_p [\text{kg h}^{-1}] Q_r [\text{kJ kg}^{-1}]}{3,6}. \quad (4-10)$$

(Výhřevnost uhlí bývá 20-30 MJ kg^{-1} . Někdy se teplo přepočítává na tuny měrného paliva, za které se bere antracit s výhřevností 1 t.m.p. = 29 307,6 MJ)

U pomalejších chemických reakcí je množství vydávaného nebo spotřebovávaného tepla značně závislé na složení reakční směsi, na aktuální teplotě, na fázovém složení reakční směsi a na přítomnosti katalyzátorů a těmito problémy se zabývají kapitoly reaktorového inženýrství, věnované neizotermním procesům.

Jestliže předpokládáme, že všechno teplo se využije jenom na ohřátí produktů reakce, dostaneme **teoretickou teplotu plamene** (při hoření na vzduchu musíme započítat i ohřátí inertního dusíku apod.). V praxi je možno zvýšení teploty plamene dosáhnout zmenšením hmotnosti spalin (použití kyslíku místo vzduchu jako oxidovadla a co možno pracovat se stechiometrickým poměrem oxidovadlo-palivo) nebo předežhátím vstupních proudů (vysoké pece).

3. Zdrojem tepla je **tepelné záření** (sálání, tepelná radiace). Tepelné záření, dopadající na sledovaný povrch, je v případě černého povrchu zcela pohlcované. Jeho množství závisí na teplotě zdroje a na prostorovém úhlu, ve kterém je zdroj z plochy S /(m^2) povrchu vidět. Jestliže zdroj o teplotě T_R obklopuje (bez ohledu na vzdálenost) celý prostor okolo dané plochy, pak **intenzita tepelného toku** q /(W m^{-2}) který se z něj pohltí do kolmo orientované plochy

$$q = \frac{Q'}{S} \quad (4-11)$$

je

$$q = \sigma e T_R^4 \quad (4-12)$$

kde Stefan-Boltzmannova konstanta je $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ a e je pro černou plochu rovno 1, pro zrcadlovou plochu je blízké nule. Vzhledem k vysoké mocnině u teploty se záření tepla obvykle výrazně projevuje až při vysokých teplotách zářiče. Tepelné záření je hlavním mechanismem přenosu tepla přes vakuum. Tepelné záření také prochází volně vzduchem protože pro jednoatomové a souměrné dvouatomové plyny je e prakticky nulové. Víceatomové plyny jsou schopny teplo pohlcovat a vyzařovat, díky čemuž teplo se přenáší i ze spalných plynů (CO_2 , H_2O) do stěn zařízení. Víceatomové plyny také v ovzduší zdržují přenos tepla podobně jako vrstva skla - proto jsou označovány jako skleníkové (vedle H_2O je to CO_2 , CH_4 , O_3 , NO_x , aj.).

(Slunce ve dne zaujímá asi 0,0011 % oblohy a má teplotu okolo 6000 K; tepelný přítok směrem k Zemi odtud je za jasného počasí 1,35 kW na 1 m^2 kolmo orientované plochy; do zbytku oblohy, jemuž lze přiříst teplotu 0°K, však je podle aktuální teploty zemského povrchu zpět ve dne i v noci vyzařováno okolo 0,4 kW/ m^2 . Přívod i odvod tepla je zpomalován mračky a skleníkovými plyny, které navíc propouštějí vysokoenergetické záření ze Slunce snáze než slabší vyzařování Země. Na kolísání teploty povrchu Země má klíčový význam především dynamická rovnováha kolísání doby osvitu: den-noc a

oměru tohoto osvitu: zima-léto. Navíc, menší sluneční ohřev v polárních oblastech souvisí s úhlem, pod kterým paprsek na povrch Země dopadá.)

4. Vratná přeměna teplo - mechanická energie

K vratné přeměně tepla musíme přihlížet tam, kde se výrazně mění tlak a objem plynů a par. Při tom se mění součin tlaku a objemu pV a část vnitřní energie přechází na teplo. Tímto způsobený teplotní rozdíl ΔT se dá odhadnout jako

$$\Delta T = \frac{\Delta p}{\rho c_p} ; \quad (4-13)$$

je-li to významné, musíme pro úvahy použít exaktních instrumentů termodynamiky. Vratná přeměna se týká **tepelných strojů**, ke kterým řadíme stroje pro přeměnu tepelné energie na práci (Carnotův cyklus), ve kterých se získává mechanická energie při přenosu tepla z teplejšího zásobníku do chladnějšího. Dnes je hlavní aplikace v oblasti parních turbín. Dále pak **tepelná čerpadla**, ve kterých se obráceně dodáváním mechanické energie přenáší teplo z chladnějšího prostoru do teplejšího. V procesním inženýrství se tepelná čerpadla uplatňují ve dvou hlavních aplikacích: jako stroje pro hluboké chlazení (zkapalňování plynů, lednice atd.) a jako stroje pro zvyšování enthalpie par a plynů, užívaných při ohřevu (například zvyšování teploty nízkoenergetické brýdové páry stlačením). Získaná tepelná energie se dá vypočítat jako rozdíl mezi energií na izozermní a adiabatické stlačení (viz kompresory).

5. Nevratná přeměna mechanické energie na teplo

Přestože jsme ukazovali, že změny mechanické energie jsou v tepelných procesech zpravidla méně významné, existují situace, kde s nimi musíme počítat. Při nevratné změně energie třením například při brzdění celou kinetickou energii vozidla přeměníme na teplo lokalizované v malém prostoru brzdy a částečně na běhounu pneumatiky. Vznik teploty je zde velmi významný. Na hnětení viskózních a plastických materiálů potřebujeme také velké množství energie, přeměňované nevratně na teplo. Hnětení bývá při tavení polymerů ve zpracovatelských strojích často hlavním zdrojem tepla.

6. Zjevné teplo teplotního média

Nejběžnější způsob sdílení tepla v procesních technologiích využívá chlazení jednoho proudu k ohřevu druhého proudu. Někdy je možno množství tepla přinášeného teplotním médiem vypočítat z bilance známého vstupu a výstupu. Je nutno znát měrnou tepelnou kapacitu c_{PA} média A, při vsádkovém uspořádání dále jeho hmotnost m_A , jeho, měrné enthalpie h_{1A} počáteční a konečnou h_{2A} . Při kontinuálním procesu bilancujeme zpravidla časovou jednotku, takže nás zajímá hmotnostní průtok m'_A teplotního média; enthalpie h_{1A} a h_{2A} odpovídají pak vstupu a výstupu.

$$Q = m_A (h_{1A} - h_{2A}), \quad (4-14)$$

a protože v tomto konkrétním případě jde enthalpie pouze na účet zjevného tepla, tak platí

$$Q = m_A c_{PA} (T_{1A} - T_{2A}) \quad (4-15)$$

kde T_{1A} je teplota počáteční a T_{2A} konečná. Pokud je v materiálu teplota rozložena nerovnoměrně, musíme za tyto teploty brát průměrné teploty podle vzorce (4-8).

Rychlost předávání tepla z průtočného systému se vypočítá jako

$$Q' = m'_A (h_{1A} - h_{2A}) \quad (4-16)$$

a obdobně

$$Q' = m'_A c_{PA} (T_{1A} - T_{2A}), \quad (4-17)$$

kde T_{1A} je teplota na přítoku a T_{2A} na odtoku. Pokud je v materiálu teplota rozložena nerovnoměrně, musíme za tyto teploty brát střední směšné teploty podle vzorce (4-9).

Tímto způsobem se například určuje množství tepla dodávané horkovodem do budov na základě měřeného průtoku a teplot. Postup je nepoužitelný nebo přinejmenším nepřesný když se pracuje s velkým, špatně měřitelným, množstvím teplotního média kdy teplotní rozdíl je nepatrný a tudíž jeho měření je zatíženo velkou chybou, pokud je to vůbec měřitelné (například měřením průtoku a změny teploty potoka nelze dobře určit rychlost chlazení ponořené lahve piva).

7. Skupenské teplo teplotonosného media

Dalším velmi běžným způsobem ohřevu je například ohřev kondenzující parou. Platí zde vztahy (12) nebo (14). V jednoduchém základním případě probíhá děj při teplotě varu kdy rozdíl enthalpií je přímo roven výparnému teplu

$$(h_{1A} - h_{2A}) = r_{\text{výp}} = \Delta h_{\text{výp}} = -\Delta h_{\text{kond}} \quad (4-18)$$

V technických úvahách výparnou enthalpii $\Delta h_{\text{výp}}$ (teplo, které je třeba dodat k odpaření 1 kg látky) označujeme jednoduše jako **výparné teplo** $r_{\text{výp}}$. Pak můžeme psát

$$Q = m_A r_{\text{výp}} \quad (4-19)$$

nebo

$$Q' = m'_A r_{\text{výp}} \quad (4-20)$$

Pro vodu při 100°C je výparné teplo $r_{\text{výp}} = 2257 \text{ kJ kg}^{-1}$.

Var při vyšších teplotách a tlacích přeměňuje kapalinu na páru s větší hustotou – podobnější kapalině. Proto s růstem teploty a tlaku výparné teplo klesá. V okamžiku kdy hustota páry dosáhne hustoty kapaliny, nepotřebuje již přeměna žádnou energii. Těmto podmínkám říkáme kritická teplota, kritický tlak, dohromady kritický bod.

Je běžné, že spotřeba tepla, dodávaného parou se měří přímo pomocí množství zkondenzované kapaliny. Existují ale také např. měření, ve kterých se chladí ledem při teplotě tání a množství tepla se počítá z množství vzniklé vody. Skupenské teplo tání ledu při 0°C je $r_{\text{tání}} = 334 \text{ kJ kg}^{-1}$.

□ Příjem tepla

Energie, uvolněná tepelným zdrojem se projeví u příjemce vzrůstem enthalpie. Ponecháme stranou případy, kdy významným projevem této změny je změna tlaku (energetická pára). V případech, které počítáme ke sdílení tepla je nejvýznamnějším projevem změny enthalpie změna teploty, nebo změna skupenství nebo chemická reakce. Tento vzrůst je při přijetí tepla Q dán vztahem

$$Q = m_B (h_{2B} - h_{1B}), \quad (4-21)$$

nebo v průtočné soustavě

$$Q' = m'_B (h_{2B} - h_{1B}). \quad (4-22)$$

Velmi obvyklým případem je, že se všechna enthalpie projeví zvýšením teploty takže

$$Q = m_B c_{PB} (T_{2B} - T_{1B}) \quad (4-23)$$

nebo

$$Q' = m'_B c_{PB} (T_{2B} - T_{1B}). \quad (4-24)$$

Nejběžnější způsob sdílení tepla v procesních technologiích využívá chlazení jednoho proudu k ohřevu druhého proudu. Potom jednoduše

$$m_B c_{PB} (T_{2B} - T_{1B}) = m_A c_{PA} (T_{1A} - T_{2A}), \quad (4-25)$$

což je nejběžnější rovnice sdílení tepla.

V případě odparek, kondenzátorů, vymrazovačů apod. se enthalpie příjemce vnese hlavně do enthalpie fázové přeměny. Soustředíme-li se na hlavní fázi příjmu tepla, kdy je již dosaženo teploty fázové přeměny a při tom ještě není fáze přeměněna úplně, pak množství přeměněné látky je právě

$$m_B = Q / \Delta h_{B,\text{fáz}}. \quad (4-26)$$

V takovém případě můžeme množství tepla stanovit třeba měřením hmotnosti odpařené vody, roztaveného ledu, zkondenzované páry.

□ Rovnováha sdílení tepla; měření teploty

Systémy v tepelném kontaktu se dostanou do **rovnováhy** tehdy, když se teploty v nich vyrovnají. To umožňuje určení teploty porovnáním se zařízením, na jehož teplotě závisí jednoznačným způsobem nějaká snadno měřitelná vlastnost (**teploměry**). U klasických teploměrů je to objemová roztažnost kapaliny, objemové roztažnosti plynů využívají plynové teploměry pro velmi nízké teploty, relativně menší teplotní roztažnost pevných látek se dá sledovat pomocí deformace dvojice pásků různých kovů (bimetal). Pohodlné měření a přenos dat umožňují různá elektrická měření, založená nejčastěji na růstu elektrického odporu s teplotou (odporové teploměry, termistory), nebo na termoelektrickém jevu – elektrického napětí, vzniklého na styku dvou různých kovů,

měnícího se s teplotou (termočlánky). Vysoké teploty se sledují pomocí vyzařované sálavé energie (pyrometry), poměrně nákladným zařízením termovizní kamery se dá sejmut i podstatně slabší záření a získat obraz povrchové teploty těles. Při experimentálním studiu soustav, ve kterých probíhá sdílení tepla, takže teplota se mění s místem a časem, je nutno volit způsob měření teploty, při kterém teplotní čidlo má z hlediska prostorové nerovnoměrnosti teplotního pole malý rozměr a z hlediska časové neustálenosti dostatečně rychlou odezvu. (Jak velký je běžný teploměr a jak dlouho se jeho údaj ustaluje? Porovnejte s jinými typy teplotních čidel.)

Sdílení tepla mezi dvěma látkami při dlouhém kontaktu v izolovaném systému

Nepochybně se nejlépe teplota měří tehdy, kdy se dostane systém do tepelné rovnováhy a teplota v obou částech se dostane na hodnotu T_2 , která se s časem a místem již nemění. Pak rovnice (23) se zjednoduší na

$$m_B c_{PB} (T_2 - T_{1B}) = m_A c_{PA} (T_{1A} - T_2), \quad (4-27)$$

což se někdy označuje jako **rovnice kalorimetrická**. Uvedením různě teplých látek A a B do kontaktu a změřením výsledné teploty můžeme snadno ze známé tepelné kapacity látky A pomocí této rovnice stanovit neznámou tepelnou kapacitu látky B. Podobně můžeme stanovit i enthalpie fázových a chemických přeměn, např. spalné teplo.

Výpočty sledující rychlost sdílení tepla

Dva objekty – objekt A o teplotě T_A a objekt B o teplotě $T_B \neq T_A$ nejsou v tepelné rovnováze a mají snahu své teploty vyrovnávat. Při tom se přenáší tepelná energie z teplejšího tělesa na chladnější. Rychlost přenosu tepla není nijak mimořádně rychlá, a proto řešení problému přenosu tepla inženýra zajímá. Obecně se mluví o třech mechanismech přenosu tepla:

- vedením (kondukcí),
- prouděním (konvekci),
- zářením (sáláním, radiací).

V každém případě **množství tepla** Q , které se přenese, závisí na **čase** t a na **ploše** S , kterou teplo prochází.

$$Q = \int Q' dt \quad (4-28)$$

V řadě případů si lze představit, že bude dokonce těmito veličinám přímo úměrná. **Intenzita tepelného toku** q $/(W m^{-2})$

$$q \equiv \frac{\Delta Q'}{\Delta S} \quad (4-29)$$

bude v takovém případě nezávislá na čase a velikosti teplosměnné plochy. Intenzita tepelného toku je obecně vektor; tok od objektu A k objektu B bude mít směr obrácený než růst teploty. I zde se dá očekávat, úměrnost mezi q_{AB} a $(T_B - T_A)$.

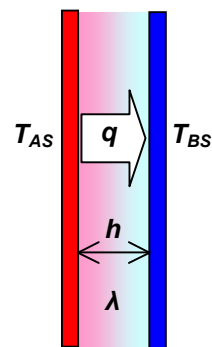
Proto je účelné definovat také **součinitel prostupu tepla** k $/(W m^{-2} K^{-1})$ jako

$$k \equiv \frac{\Delta Q}{\Delta t \Delta S \Delta T} \equiv \frac{\Delta Q'}{\Delta S \Delta T} \equiv \frac{q}{\Delta T} \quad (4-30)$$

Nejběžnější případ prostupu tepla je takový, při kterém jsou prostory A a B odděleny stěnou S. Když symbolem A označíme teplejší stranu, pak teplo postupuje nejprve z prostoru A ke stěně, mající na povrchu teplotu $T_{AS} < T_A$, odtud postupuje k druhému povrchu stěny, majícímu teplotu $T_{BS} < T_{AS}$, a odtud postupuje do prostoru B o teplotě T_B .

Vedení tepla

Budeme se zabývat nejprve tím, jak prochází teplo za ustálených podmínek stěnou. Je srozumitelné, že tento děj závisí na teplotách T_{AS} a T_{BS} ale vůbec již nezávisí na tom, jakým způsobem se těchto teplot



Obr. 4.1. Vedení tepla

vně stěny dosahuje. Tento mechanismus přenosu tepla se nazývá **vedení tepla**. Intenzita q tepelného toku od jednoho povrchu stěny ke druhému, zde závisí jenom na rozdílu teplot $T_{AS} - T_{BS}$ a na vlastnostech stěny. První důležitou vlastností stěny je tloušťka h , již je intenzita tepelného toku nepřímo úměrná. Platí tedy

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t \Delta S \Delta T} \equiv \frac{\Delta Q'}{\Delta S \Delta T} \equiv \frac{q}{\Delta T} = \frac{\lambda}{h} \quad (4-31)$$

Slovy: Množství tepla, vztažené na jednotku času, na jednotkou plochy stěny a na jednotkový teplotní rozdíl je nepřímo úměrné tloušťce stěny. Součinitel úměrnosti λ $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$ se nazývá **tepelná vodivost** a je to vlastnost materiálu.

Tepelná vodivost popisuje jeden ze tří základních přenosových jevů zprostředkovaných molekulárním pohybem (přenos hybnosti - viskozita, přenos tepla - tepelná vodivost, přenos hmoty - difuzivita)

Jak je patrné z tabulky, tepelná vodivost se pohybuje v širokém intervalu, kde na jedné straně jsou látky s vysokým λ dobré **vodiče tepla** – zejména čisté kovy, na druhé straně látky s nízkým λ , označované jako **tepelné izolanty**.

Přestup tepla

Intenzita q tepelného toku mezi prostředím A a stěnou závisí nepochybně na teplotním rozdílu $T_A - T_{AS}$, ale nezávisí pak ani na tom, jak bylo dosaženo teploty T_{AS} , ani co se odehrává ve stěně a na její druhé straně. Nezáporná veličina, vyjadřující kolik tepla se převede mezi prostředím a jeho hranicí za jednotku času jednotkovou plochou při jednotkovém teplotním rozdílu mezi prostředím a jeho hranicí se označuje jako **součinitel (koeficient) přestupu tepla** na straně A. Dá se počítat jako

$$\alpha_A \equiv \frac{q}{T_A - T_{AS}} \quad (4-32)$$

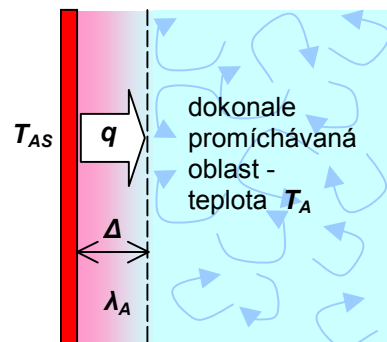
Teplota T_A je střední teplota v prostředí A, počítaná např. podle vzorce (8) v případě neprůtočného systému a podle (9) v případě průtočného systému. Kdyby prostředí A bylo nepohyblivé, pak by o hodnotě α_A rozhodovala tepelná vodivost λ_A látky A a tloušťka Δ_A vrstvy látky A, kterou musí tok tepla překonat, a bylo by

$$\alpha_A \equiv \frac{\lambda_A}{\Delta_A} \quad (4-33)$$

(Pozn.: V některých novějších pracích se doporučuje zavádět **koeficient rychlosti přestupu tepla**, definovaný jako

$$v_T \equiv \frac{\alpha_A}{\rho c_p} ;$$

výhodou této veličiny je, že má rozměr m/s a dá se tedy snadno porovnávat s rychlostí proudění nebo difuze. V inženýrské praxi se tento námět zatím příliš neujal.)



Obr. 4.2. Představa filmové teorie: rozdělení prostoru na nepohyblivou tenkou přístěnnou vrstvičku o tloušťce Δ a dobře promíchávanou oblast o konstantní teplotě

Přestup tepla prouděním - nucená konvekce

Představu o existenci nepohyblivé vrstvy můžeme přijmout i v případě proudící tekutiny A; na tomto základě je postavená **filmová teorie přestupu tepla**. Podle ní si představujeme, že v prostoru A jsou dvě oblasti: dokonale promíchávané jádro o teplotě T_A a přístěnná nepohyblivá **teplotní mezní vrstva** o tloušťce Δ_A . Nepochybně mezní vrstva bude tím tenčí, čím je proudění či míchání v prostoru A intenzivnější. Pro rozměrovou analýzu můžeme očekávat, že Δ_A závisí na charakteristickém rozměru zařízení L , na charakteristické rychlosti proudění U , na hustotě ρ_A , viskozitě μ_A , tepelné vodivosti λ_A , a na tepelné kapacitě c_{pA} . Při seskupení těchto veličin do bezrozměrových kritérií můžeme snížit počet

proměnných o 4 (díky užitým základním jednotkám kg, m, s, K). Tato kritéria se volí zpravidla jako (v definici vynecháme indexy, protože obdobně je to definováno pro prostředí B nebo další):

Nusseltovo číslo

$$Nu \equiv \frac{\alpha L}{\lambda} \equiv \frac{L}{\Delta} \quad (4-34)$$

Ernst Kraft Wilhelm Nusselt
(1882-1957)
Základní zákonitost přenosu
tepla (1915)
Filmová kondenzace páry (1916)



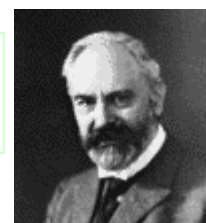
Reynoldsovo číslo

$$Re \equiv \frac{L U \rho}{\mu} \quad (4-35)$$

Prandtlovo číslo

$$Pr \equiv \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (4-36)$$

Ludwig Prandtl
(1875-1953)
Teorie mezní vrstvy 1904
teorie leteckého křídla 1918



Pro třídu podobných zařízení platí kritériální vztah

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (4-37)$$

Konkrétní tvar této funkce se dá pro některé vybrané situace vyjádřit **mocninovým vztahem**

$$Nu = A Re^a Pr^b \quad (4-38)$$

Ve kterém exponenty a a b jsou malá kladná čísla. Zabýváme-li se jen jedinou tekutinou, případně skupinou tekutin příbuzných fyzikálně chemických vlastností, pak tento vztah napovídá, že součinitel přestupu tepla se dá zvýšit především zvýšením rychlosti proudění; proto se ohřev nebo chlazení v nádobách podporuje mícháním.

Hodnota Prandtlova čísla vyjadřuje poměr mezi dosahem působení stěny na proudění a na sdílení tepla. Při vyšších Pr se vliv stěny na proudění projevuje do větší vzdálenosti, zatímco sdílení tepla se odehrává jen v tenké vrstvičce u stěny. To platí už pro vodu ($Pr \approx 5$) a pro běžné kapaliny. Zvláště vysoká Prandtlova čísla můžeme čekat u kapaliny s vysokou viskozitou. Pro tyto případy lze exaktním řešením příslušných rovnic pohybu a sdílení tepla nalézt, že $b=1/3$. Pro plyny existuje analogie mezi šířením pohybu a tepla, $Pr \approx 1$. Teplo se šíří rychleji v tekutých kovech kde $Pr \ll 1$.

Obecným výsledkem řešení pro vyšší hodnoty Prandtlových čísel, kdy sdílení tepla se odehrává těsně u stěny, je

$$\begin{aligned} a=1/3, \quad b=1/3 & \text{ pro proudění v trubce, pro laminární proudění, } Pr \geq 1, \\ a=1/2, \quad b=1/3 & \text{ pro nátok tekutiny na stěnu, } Pr \geq 1, \\ b=1/3 & \text{ pro laminární podvrstvu turbulentního proudění, } Pr \geq 1. \end{aligned}$$

Avšak i naměřená data pro složitější situace se dají vyjádřit vzorcem (38), užívajícím např.

$$\begin{aligned} a=2/3, \quad b=1/3 & \text{ pro stěnu nádoby s rychloběžným míchadlem,} \\ a=0,8; \quad b=0,4 & \text{ v jedné z nejobvyklejších korelací dat pro turbulentní proudění v trubce.} \end{aligned}$$

Jinou hodnotu b předpovídá další jednoduchá **penetrační teorie přestupu tepla**. U ní se nedělí prostor, ale čas: Předpokládá se, že po určitý čas t_A se teplo šíří od stěny jako v nepohyblivém prostředí; po této době přijde vír, který mžikově stěnu omyje a zhomogenizuje teplotu v celém prostoru. Dá se předpokládat, že čas t_A závisí pouze na proudění, takže $t_A = L/U f(Re)$. Spojíme-li to s nejjednodušším řešením neustáleného vedení tepla, podle kterého

$$Nu = A (Re Pr)^{1/2} \left(\frac{L}{U t_A} \right)^{1/2}, \quad (4-39)$$

vychází exponent $b=1/2$.

Protože turbulentní víry se mění jak v prostoru tak v čase, není překvapením, že obě dvě teorie mohou být oprávněné a z experimentů se sdílením tepla se obvykle dostaneme někde mezi ně:

$$1/3 \leq b \leq 1/2 \text{ pro turbulentní proudění.}$$

Penetrační teorie dobře vystihuje i případ mechanicky stírané stěny, kde je doba t_A nepřímo úměrná obvodové rychlosti stěrky (míchadla) U , takže lze očekávat

$$a=1/2, \quad b=1/2 \text{ pro stíranou stěnu.}$$

Pro tekuté kovy s $Pr \ll 1$ je sdílení tepla závislé málo na proudění u stěny a závisí hlavně na době zdržení kovu v teplosměnném prostoru, takže také můžeme aplikovat představu vedení tepla po dobu L/U a vychází stejně

$$a=1/2, b=1/2 \text{ pro } Pr \ll 1.$$

Analogie mezi šířením pohybu a tepla u plynů, u nichž $Pr \approx 1$, vedla k pokusům nalézt obecnější závislost mezi Nusseltovým číslem a odporovým součinitelem při proudění. Poměrně dobře vyhovuje v řadě případů Colburnova analgie, podle které (po zahrnutí obvyklého vlivu Pr) vychází

$$\frac{Nu}{Re Pr^{1/3}} \approx \frac{\lambda}{8} \quad (4-40)$$

Pozor, v tomto vztahu symbol λ označuje součinitel tření v proudící kapalině, se kterým jsme se setkali při výpočtech potrubí !!!

Násobný koeficient A , objevující se ve vztahu (38) je konstantou pro podobné situace sdílení tepla. Pokud budeme sledovat širší třídu problémů, pak se do této veličiny promítnou změny geometrických tvarů; obvykle připojujeme závislost na příslušných geometrických simplexech, nejraději pro počítání pohodlnou závislost mocninovou. Případně bývají přidávána další kritéria, doplňující vlivy změn fyzikálních vlastností (hlavně viskozity) s teplotou. Příslušné vzorce s podrobnými údaji o mezích platnosti jsou shrnuty v řadě příruček a jsou i zahrnuty v softwarových produktech pro podporu výpočtů sdílení tepla.

Při používání těchto vztahů je třeba si v první řadě ujasnit, jak byly zvoleny jednotlivé veličiny; např. pro míchání se nejčastěji dosazuje do Re průměr míchadla a do Nu u plášťované nádoby průměr nádoby, u nádoby s hadem průměr trubek hadu. V původních zdrojích narazíme na značnou nejednotnost při bezrozměrové interpretaci dat a ani různé učebnice a příručky se neshodují na nějakém univerzálním jednotícím hledisku.

Nucenou konvekci můžeme podpořit vyvoláním intenzivního proudění tekutiny zmenšením průtočného průřezu nebo nastavením překážek podporujících turbulenci do proudu, což klade zvýšený nárok na čerpání. Nejběžnější intenzifikace sdílení tepla (známá rovněž z kuchyňské praxe) je míchání – tedy záměrné dodávání mechanické energie, která se v daném prostoru maří vířením a třením.

Volná (přirozená) konvekce

Při přirozené konvekci není proudění u teplosměnné plochy vyvoláváno vzdáleným zdrojem (obvykle čerpadlem či míchadlem, vnějším tlakovým nebo hydrostatickým vlivem), ale je vyvoláváno hydrostatickou silou, vznikající přímo u teplosměnné plochy díky teplotním změnám hustoty tekutiny. V takovém případě nemáme k dispozici informaci o rychlosti U , kterou bychom dosadili do Reynoldsova čísla. Rychlost, vyvozenou příslušnou změnou hustoty můžeme zhruba odhadnout z hydrostatické síly, působící na kapalinu v přístěnné vrstvě. Je-li hustota kapalina u stěny o $\Delta\rho$ odlišná od hustoty v jádře kapaliny, vzniká tam síla vznosu úměrná $\Delta\rho g L^2 \Delta$, která bude vyrovnávána silou tření na ploše stěny úměrné součinu $\mu (U/\Delta) L^2$. Rychlost bude tedy úměrná

$U \sim \Delta\rho g \Delta^2 / \mu$. Reynoldsovo číslo tedy je úměrné známým veličinám podle vztahu

$$\frac{U L \rho}{\mu} \sim \frac{\Delta\rho g \Delta^2 L \rho}{\mu^2} \sim \frac{\Delta\rho \rho g L^3}{\mu^2} \frac{1}{Nu^2}$$

Objevuje se zde nová bezrozměrová skupina, charakterizující volnou konvekci a nazýváme ji podle významného německého inženýra **Grashofovo číslo**:

$$Gr \equiv \frac{\Delta\rho \rho g L^3}{\mu^2} \equiv \frac{\beta \Delta T g L^3}{\nu^2}; \quad (4-41)$$

obvyklejší druhý zápis využívá zhruba lineární závislosti změny hustoty na změně teploty,

používá součinitel objemové roztažnosti $\beta \equiv (-\Delta\rho/\Delta T)/\rho$ a kinematickou viskozitu $\nu \equiv \mu/\rho$. Pro třídu geometricky podobných uspořádání platí kritériální vztah

$$Nu = f(Gr, Pr)$$



Franz Grashof

(4-42)

Konkrétní tvar této funkce se dá pro některé vybrané situace obecně vyjádřit **mocninovým vztahem**

$$Nu = A Gr^a Pr^b,$$

ve kterém je dokonce ve většině případů $a=b$, takže se dá jednodušeji psát

$$Nu = A (Gr Pr)^a, \quad (4-43)$$

a konkrétně

$$a=1/4 \text{ pro pomalé laminární volné proudění při } Gr Pr < 10^8,$$

$$a=1/3 \text{ při } Gr Pr > 10^8.$$

Někdy se speciálně pojmenovává Rayleighovo číslo $Ra \equiv Gr Pr$.

Vzhledem k tomu, že většina kapalin i plynů zmenšuje svou hustotu při vzrůstu teploty, je volná konvekce významná při ohřevu zdola a při chlazení shora a v každém případě z boku.

Významně se v přírodě projevuje volná konvekce i ve studené vodě, kdy se voda s nejvyšší hustotou při 4°C drží u dna, díky čemuž vodní plochy zamrzají od hladiny a ponechávají prostor pro živé organizmy.

Mrazicí boxy v obchodech jsou otevřené nahoře. Studený suchý vzduch se v nich drží i dna a zejména pokud se víkem omezí průvan - nucená konvekce, jsou ztráty malé.

Volná konvekce, způsobená dílem rozdíly teplot, dílem rozdíly koncentrací způsobují kolísání počasí; stoupání lehčího teplého vzduchu nasyceného vodní parou v teplých oblastech vyvolává atmosférické proudění – vítr; těžší chladná voda se zvýšeným obsahem soli pod polárním ledem je důležitou hnací silou mořských proudů.

Přechod mezi volnou a nucenou konvekcí představuje komínový tah. U jednoduchých topenišť je pod sloupcem teplých spalín v komíně nižší tlak než v okolním vzduchu. Proto spaliny stoupají vzhůru a na jejich místo vniká do topeniště vzduch. Avšak v tomto případě není rozhodující rozdíl hustot přímo v místě výměny tepla – komínový tah zde působí jako čerpadlo. Tlaková ztráta v energetických kotlích, zejména při fluidním spalování a při chemickém ošetření paliv, se zdaleka nedá krýt komínovým tahem, takže plyn je proháněn přes topeniště mocnými ventilátory.

Na příkladu volné konvekce je možno ukázat i vznik disipativních struktur. Pokud si představíme kapalinu mezi rovnoběžnými deskami – dolní teplejší a horní chladnější, pak ze symetrie plyne, že se vytvoří homogenní teplotní pole, ve kterém se bude teplo šířit prostým vedením. Jakákoliv sebenepatrnější porucha však způsobí, že začne v některých místech klesat těžší tekutina dolů a jinde stoupat lehčí tekutina vzhůru (Rayleigh-Benardova nestabilita). Je pozoruhodné, že toto proudění se samoorganizuje a vznikne poměrně stálá disipativní struktura s jednotlivými celami, v půdorysu šestiúhelníkovými a téměř identicky velikými, v nichž tekutina cirkuluje.

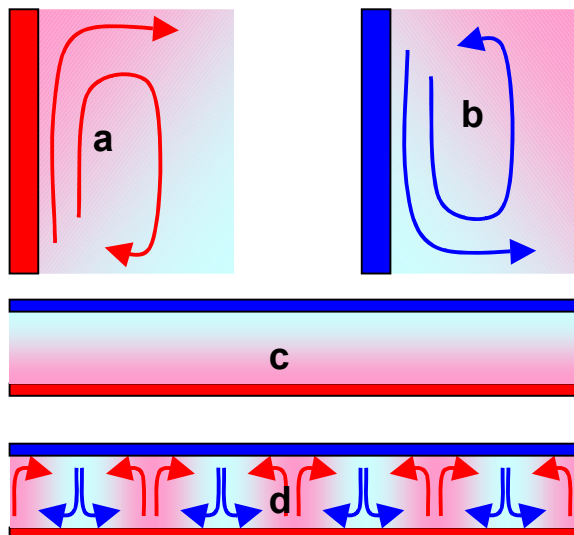
Součinitel prostupu tepla

Prostup tepla z jednoho prostředí do druhého se odehrává v řadě případů přes pevnou stěnu. Pak na prostupu tepla z prostředí A do B

$$q = k (T_A - T_B) \quad (4-44)$$

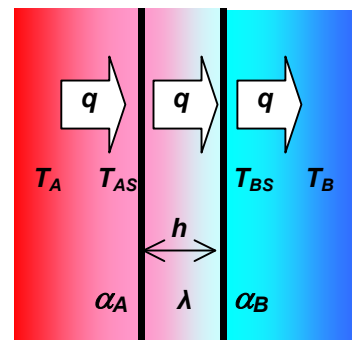
se podílí:

- přestup do stěny na straně prostředí A



Obr. 4.3. Volná konvekce

- a – u teplé stěny, b – u studené stěny
- c – nestabilní stav při ohřevu zdola,
- d – disipativní struktura při ohřevu zdola



Obr. 4.4. Prostup tepla stěnou
Sčítání odporů

$$q = \alpha_A (T_A - T_{AS}), \quad (4-45)$$

- vedení stěnou

$$q = \frac{\lambda (T_{AS} - T_{BS})}{h}, \quad (4-46)$$

- přestup do stěny na straně prostředí B,

$$q = \alpha_B (T_{BS} - T_B). \quad (4-47)$$

□ Rovinná stěna

Spojením vztahů (4-44)-(4-47) můžeme pro sdílení tepla přes rovinnou stěnu eliminovat neznámé T_{AS} , T_{BS} i q , čímž dostaneme vztah pro výpočet k , příslušejícího dané situaci.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_A} + \sum \frac{h_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_B}}. \quad (4-48)$$

Zavedením sumy do tohoto vzorce jsme umožnili počítat i s případem, že přepážka mezi tekutinami je složena z více vrstev ($i > 1$). Příkladem je stěna s izolační vrstvou nebo s nánosem pevné usazeniny. V součtu jmenovatele vztahu (4-45) se nejvíce uplatňuje největší člen, z hodnot $1/\alpha_A$, $1/\alpha_B$, h_i/λ_i . Tyto veličiny můžeme chápat jako za sebe zařazené odpory vedení tepla a zacházet s nimi podobně, jak zachází Kirchhoffovy zákony s odpory elektrickými. O rychlosti sdílení tepla v případě **za sebe** řazených odporů rozhoduje především **největší odpor**.

Méně často se řeší úloha kdy stěna a prostředí okolo ní mění své vlastnosti místo od místa. Pak jsou odpory sdílení tepla řazeny **vedle sebe**.

Příkladem je únik tepla z reaktoru izolovanou a neizolovanou částí stěny, nebo třeba také únik tepla z místnosti zdí, oknem a kovovým okenním rámem.

V takovém případě o rychlosti pohybu tepla rozhoduje **menší odpor**, tedy část stěny s vyšší hodnotou součinu plochy a místního součinitele prostupu tepla. Sčítají se zde toky tepla jednotlivými částmi teplosměnných ploch.

$$Q' = \sum q_i S_i \quad (4-49)$$

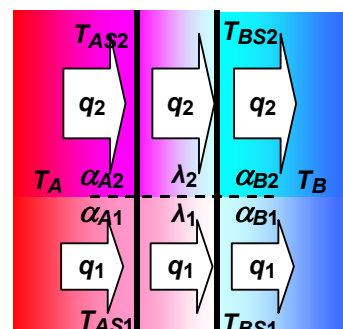
□ Válcová stěna

V technických aplikacích se velmi často setkáme s průchodem tepla přes stěnu trubky. V této aplikaci musíme respektovat skutečnost, že sice tok tepla je konstantní, ale jeho intenzita q se mění s plochou, závisící na vzdálenosti od osy. Součinitel průchodu tepla pak musíme vztáhnout k některé zvolené ploše; zvolíme-li např. vnitřní plochu S_A trubky, odpovídající poloměru r_A , definujeme

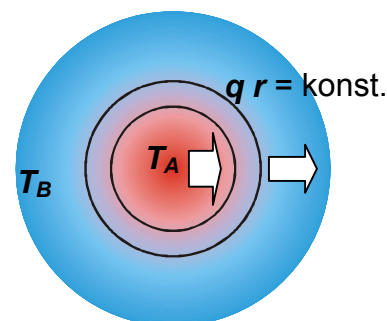
$$k_A = \frac{Q}{S_A t (T_A - T_B)}$$

Řešení příslušné diferenciální rovnice vede k výsledku

$$k_A = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_A} + \frac{r_A}{\lambda} \ln \frac{r_B}{r_A} + \frac{r_A}{\alpha_B r_B}}$$



Obr. 4.5. Prostup tepla stěnou různých vlastností. Sčítání tepelných toků



Obr. 4.6. Prostup tepla válcovou stěnou. Intenzita q tepelného toku klesá se vzdáleností od osy

a záměnou indexů dostaneme obdobný vztah pro vnější stěnu. Pro tenčí trubky však většinou vystačíme s trochu méně přesným výpočtem pomocí jednoduššího vztahu (48) s vhodně zvolenou střední plochou.

Odhad rychlosti sdílení tepla

Výpočet přestupu tepla s použitím vztahu (48) případně (49) vyžaduje znalost příslušných vlastností všech vrstev stěny a okolního prostředí v celé ploše. Někdy je možno předpokládat, že některé odpory jsou méně významné a že je tudíž stačí jen zhruba odhadnout nebo dokonce zcela zanedbat. Hrubý odhad vychází ze zkušenosti, že součinitel přestupu tepla obvykle bývá v rozsahu:

$\alpha = 10\text{--}100 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$	při volné konvekci plynů nebo nízkoviskózních kapalin
$\alpha = 10\text{--}100 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$	při nuceném laminárním proudění nebo míchání viskózních kapalin,
$\alpha = 100\text{--}1\,000 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$	při nuceném turbulentním proudění nebo míchání kapalin nebo plynů,
$\alpha = 1\,000\text{--}10\,000 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$	při varu kapalin a kondenzaci par.

Pro posouzení nezbytnosti počítat s odporem vedením ve stěně je užitečné si uvědomit, že je např.

$\lambda/h = 200\,000 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$	pro měď o tloušťce 2 mm
$\lambda/h = 3\,000 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$	pro nerezovou ocel o tloušťce 2 mm
$\lambda/h = 100 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$	pro šamot o tloušťce 10 mm
$\lambda/h = 50 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$	pro polypropylén o tloušťce 5 mm
$\lambda/h = 1 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$	pro izolační vrstvu skelné vaty o tloušťce 50 mm

Vedení tepla při rychlých změnách teploty

Prozatím jsme uvažovali případ ustáleného vedení tepla, kdy odtok tepla od tepelného zdroje se rovná přítoku tepla k příjemci tepla. Při rychlých změnách chování (teploty nebo tepelného toku zdroje nebo příjemce) dochází k akumulaci tepla v prostupovaném prostředí. V tomto případě nás zajímá rychlost šíření teplotní změny, na níž závisí, za jak dlouho dojde k novému ustálení soustavy. Postup teploty při neustáleném vedení tepla se dá charakterizovat teplotní vodivostí

$$a \equiv \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (4-50)$$

Když si představíme poloprostoru o počáteční teplotě T_0 , po **skoku teploty** na povrchu na hodnotu T_1 v okamžiku $t=0$, pak rozdělení teploty v pozdějším čase t se bude velmi přibližně dít aproximovat po zavedení tloušťky Δ teplotní mezní vrstvy lomenou čarou

$$T = T_1 - (T_1 - T_0) x/\Delta \quad \text{pro } x < \Delta \quad \text{a} \quad T = T_0 \quad \text{pro } x > \Delta.$$

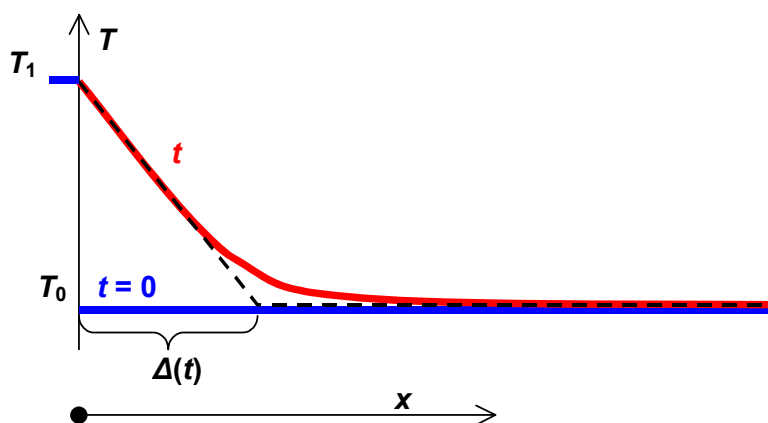
Intenzita tepelného toku do mezní vrstvy je

$$q = \lambda(T_1 - T_0)/\Delta \quad (4-51)$$

a množství akumulovaného tepla za dobu t je

$$Q = \rho c_p (T_1 - T_0) S \Delta/2 \quad (4-52)$$

Balance říká, že



Obr. 4.7. Rozdělení teplot $T(x)$ v poloprostoru $x > 0$

- teplotní skok v čase $t=0$
- v čase t po teplotním skoku
- - - - - aproximace lomenou čarou; tloušťka mezní vrstvy $\Delta(t)$

$$q = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt} = \frac{\rho c_p (T_1 - T_0)}{2} \frac{d\Delta}{dt}, \quad (4-53)$$

a spojením se vztahem pro vedení tepla vznikne diferenciální rovnice

$$\frac{\Delta}{2} \frac{d\Delta}{dt} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \equiv a, \quad (4-54)$$

jejímž řešením s podmínkou $\Delta=0$ pro $t=0$ je

$$\Delta = 2 \sqrt{a t}. \quad (4-55)$$

Je to sice jen řešení přibližné, ale je dostatečně výstižné. Na základě analýzy tohoto problému bylo zavedeno Fourierovo číslo

$$Fo \equiv \frac{a t}{L^2} \quad (4-56)$$

a obecně je možno říci, že $Fo < 1$ značí, že za čas t nepronikne teplotní odezva přes vrstvu materiálu o teplotní vodivosti a a o tloušťce L .

Tenkým hliníkovým plechem pronikne teplo velmi rychle, těžký keramický hrnek se prohřívá dlouho. Intenzita tepelného toku q v daném případě závisí na vlastnostech materiálu na rozdílu teplot a na čase a okamžitý (časově závislý) součinitel přestupu tepla je

$$\alpha = \frac{q}{T_1 - T_0} = \frac{(\lambda \rho c_p)^{1/2}}{2 t^{1/2}} \quad (4-57)$$

Při přiložení ruky na různý materiál o pokojové teplotě je množství odvedeného tepla při stejném čase úměrné veličině $(\lambda \rho c_p)^{1/2}$, podle jejíž velikosti označujeme materiály jako „na omak teplé“ nebo „studené“.

Hodnota $(\lambda \rho c_p)^{1/2}$ je např. pro korek asi $50 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ s}^{1/2}$, pro plastické hmoty $500 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ s}^{1/2}$, pro zdivo $1000 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ s}^{1/2}$, pro ocel $10000 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ s}^{1/2}$ a pro měď či hliník ještě více.

Je-li však teplota okolí vyšší než teplota lidského těla (např. v sauně nebo na osluněném povrchu), jsou kovy „na omak teplejší“ než tepelné izolanty.

Termoska drží v zimě teplo a v létě chlad. Odkud ví, kdy je léto a kdy je zima? Jakými mechanismy se zde teplo přenáší a proč bývá skleněný povrch leskle pokoven.

Uvedený odhad neustálého vedení tepla nám umožní kvantitativně posoudit i takové děje jako rychlost a hloubku kalení oceli, rychlost vaření vajec, rychlost pečení krocana, účinky tepelných izolací za proměnných teplot, prohřívání povrchu země při denních změnách teploty, promrzání půdy v zimě, hloubku sklepa, ve kterém můžeme pokládat teplotu za nezávislou na ročním období.

Předpokládali jsme velmi jednoduchý případ, kdy teplota stěny byla skokově změněna. Podobně můžeme řešit i případ, kdy do prostředí o původně konstantní teplotě začne přitékat teplo konstantní intenzitou q . (Příkladem je zapnutí elektrického topného tělesa.) Při přijaté představě o lineární aproximaci teplotního profilu podle obr.4.7. se bude podle vztahu (4-51) měnit současně s Δ také rozdíl $(T_1 - T_0)$. Dosazením (4-51) do (4-52) dostaneme

$$Q = \frac{\rho c_p}{\lambda} S q \frac{\Delta^2}{2}$$

a z bilance

$$q = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt} = \frac{\rho c_p q}{2} \frac{d\Delta^2}{dt}$$

vychází jednoduchá diferenciální rovnice, jejíž integrací dojdeme k výsledku

$$\Delta = \sqrt{2 a t}$$

a teplota stěny roste s časem podle vztahu

$$(T_1 - T_0) = q \sqrt{\frac{2 t}{\lambda \rho c_p}}.$$

Teplota stěny při konstantní intenzitě tepelného toku tedy neustále roste a tento růst je tím rychlejší, čím má okolí menší tepelnou vodivost a tepelnou kapacitu.

Elektrické topidlo spuštěné naprázdno by mohlo způsobit požár, pokud není vybaveno tepelnou pojistkou, která při přehřátí přeruší elektrický obvod – např. topidla jako varné konvice, fěny, ale i transformátory a motory, které by byly tepelně izolovány.

Jak přibližně, tak i matematicky zcela rigorózně se dají se řešit i rovnice neustáleného vedení tepla i pro složitěji zadané počáteční a okrajové podmínky. Pochopitelně pak závisí okamžité sdílení tepla na celé předchozí tepelné historii systému. Hodnota Fourierova čísla nám i ve složitějších případech umožní posoudit, jak významné jsou vlivy změn, které se odehrály před časem t ve vzdálenosti L . Detailněji se tímto problémem zabýváme v předmětu „Přenosové jevy“.

Přestup tepla prouděním při povlovných změnách teploty

V technické praxi se také setkáváme s případy neustáleného sdílení tepla. Často například vsádkově ohříváme nebo chladíme materiál v nádobě. Za těchto podmínek se pozvolna mění teplota vsádky, stěn i teplotnosného media. V bilanci samozřejmě musíme tyto změny plně respektovat. Ve výpočtech rychlosti přestupu tepla však nám často stačí znát jen okamžité místní hodnoty. Kdy si to můžeme dovolit, vyplývá z řešení problému skokové změny teplotního rozdílu:

Změní-li se skokově teplota stěny nebo teplota tekutiny při proudění kolem této stěny, trvá jistou dobu, než se této skutečnosti přizpůsobí rozložení teplot v mezní vrstvě. Spojíme-li vztah (4-33) pro rychlost postupu teploty filmové teorie přestupu tepla, předpokládající u stěny existenci nepohyblivé vrstvičky o tloušťce $\Delta = \lambda/\alpha$ a vztah (4-55) pro postup změny teploty, dostaneme informaci o tom, za jakou dobu se vrstva filmu přizpůsobí změně. Doba ustalování je podle toho rovna

$$t = \frac{\lambda \rho c_p}{4\alpha^2} \quad (4-58)$$

Totéž v bezrozměrové formě zapíšeme vztahem

$$Fo = 4 Nu^2 \quad (4-59)$$

U nejčastěji sledovaného případu turbulentně proudící vody, kde je $\alpha > 100 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vychází doba ustalování menší než 5 s. To je v běžných situacích zanedbatelné a na děj můžeme nahlížet jako na ustálený; odpovídajícím procesům říkáme **quasistacionární** (jakoby ustálené).

Podobně jako se může teplota měnit s časem, může se měnit i s místem. Vtéká-li kapalina do tepelného zařízení, setkává se na stěně s náhlou změnou teploty. V tomto místě bude pravděpodobně docházet k přestupu tepla nejen vedením kolmo ke stěně přes film, ale poněkud i **podélným vedením tepla** proti směru proudění. Významnost tohoto protiproudu charakterizuje Pécletovo číslo

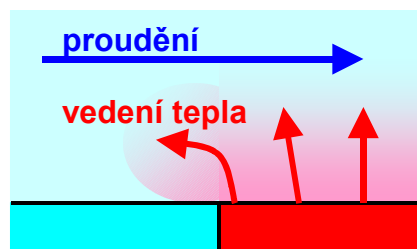
$$Pe = Re Pr = \frac{d u \rho c_p}{\lambda} \quad (4-60)$$

Je-li Pe velké, což je obvyklé, nemusíme k podélnému vedení tepla přihlížet.

Ve většině běžných situací jsou jak doba přeměny mezní vrstvy, tak podélné vedení tepla zcela zanedbatelně malé a můžeme předpokládat, že rychlost přestupu tepla se řídí výhradně **okamžitým místním rozdílem teplot** bez ohledu na to, že se teploty s místem a časem poněkud mění. Tuto zásadu použijeme při řešení běžných úloh sdílení tepla.

Předpoklad o zanedbatelnosti podélného vedení tepla bude nesprávný tam, kde je proudění pomalé (třeba při zpracování tavenin polymerů) nebo tam kde se proces odehrává v tak složitém prostoru, že nelze některý směr označit za ryze podélný (třeba uvnitř plamene). Pak je k dokonalému porozumění procesu zpravidla nutno řešit pro individuální situaci diferenciální rovnice sdílení tepla a získat tak podrobné poznatky o teplotním poli. Tím se zabýváme v předmětu „Přenosové jevy“.

Je tedy možno i za podstatně obecnějších podmínek využít dat o Nusseltovu číslu pro přestup a průchod tepla a dalších vztahů, odvozených původně pro ustálené sdílení tepla.



Obr. 4.5 Podélné vedení tepla při pomalém proudění.



Pojmy k zapamatování

Teplo, entalpie, vnitřní energie, tepelný tok, intenzita tepelního toku

Teplota, teplotní rozdíl, gradient teploty

Měrná tepelná kapacita, zjevné teplo, skupenské teplo, kalorimetrie

Tepelné stroje, tepelné čerpadlo

Prostup tepla, součinitel prostupu tepla, přestup tepla, součinitel přestupu tepla

Tepelná vodivost, teplotní vodivost

Nucená konvekce, volná – přirozená konvekce, Nusseltovo číslo

Prandtlovo číslo, Grashofovo číslo

4.2. Teplosměnná zařízení



Čas ke studiu: 3 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat konstrukci a použití tepelných výměníků
- vysvětlit funkci souproutého a protiproutého sdílení tepla

- vypočítat na základě bilancí a úvah o přestupu tepla parametry výměníku



Výklad

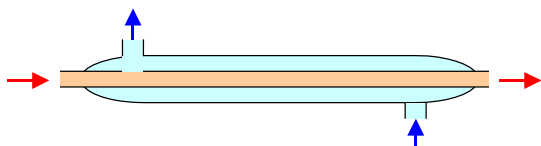
Je tady možno i za podstatně obecnějších podmínek využít dat o Nusseltovu číslu pro přestup a průchod tepla a dalších vztahů, odvozených původně pro ustálené sdílení tepla. Typické jsou následující úlohy:

- Průtočný souprůdný výměník
- Průtočný protiprůdný výměník
- Vsádková míchaná nádoba s průtokem teplotnosného media
- Průtočná míchaná nádoba s průtokem teplotnosného media
- Dvě míchané oblasti komunikující teplosměnnou plochou

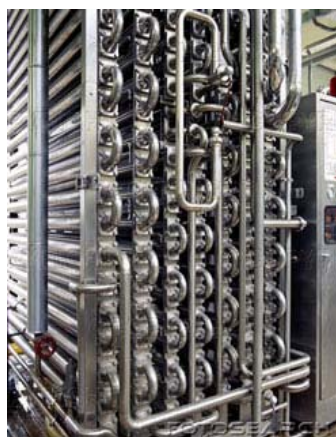
Tepelný výměník

V energetické bilanci většiny procesních technologií se objevují současně proudy dodávání tepla a odvodu tepla.

Chemické procesy často provádíme při vyšších teplotách (např. syntéza amoniaku, oxidace amoniaku, výroba kyseliny sirové, konverze zemního plynu, elektrotermické postupy), vysoké teploty potřebujeme třeba i při výrobě železa a oceli, vápna, cementu, skla, pálení cihel, apod., rovněž potravinářské výroby se mnohdy bez ohřevu neobejdou (např. pečení chleba, masa, vaření vajec, brambor atd.)



Obr. 4.6. Výměník trubka v trubce



Obr. 4.6. Baterie trubkových výměníků v mlékárně



Obr. 4.7. Výměníky pro nízkoteplotní procesy – ohřev volnou konvekci vzduchu kolem trubek

přičemž produkt obvykle je zajímavý až při teplotě nižší. Chladit musíme také mnoho chemických reaktorů, aby v nich nedošlo k samovolnému nekontrolovanému nárůstu teploty a k nežádoucím vedlejším reakcím.

Jako **teplotnosné medium pro ohřev** do 100°C se používá v nejjednodušším případě ohřátá voda (třeba v ústředním topení), pro vyšší teploty se používají méně těkavé látky (oleje, parafin,

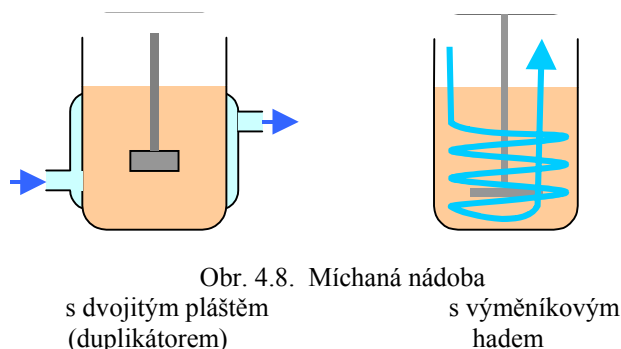
silikonový olej). Méně vhodné (menší tepelná kapacita) je užití horkých plynů, pokud to nemá jiné technologické důvody – např. při sušení. Z hlediska tepelných vlastností by bylo zajímavé použít tekutých kovů, což ale přináší mimořádná rizika a proto se jen v některých jaderných reaktorech užívá

k přenosu tepla roztavené slitiny Na-K. Pro ohřev parou se hodí pára vodní (do 180°C aby nebyl tlak přes 1 MPa, což by komplikovalo konstrukci potrubí) a ještě o něco výše páry stabilních uhlovodíků (např. dekalinu). Beztlaková vodní pára (např. z odparek) má pouze 100°C, při jakýchkoliv tepelných ztrátách do okolí okamžitě začne kondenzovat a proto se nedá dobře dopravovat potrubím na delší vzdálenosti – takovéto páře říkáme pára brýdová.

Pro chlazení je nejobvyklejší voda, pro teploty mírně pod 0°C roztok soli (solanka). Chladicí voda pro průmysl se bere často po jednoduché filtraci z řek, při větší spotřebě je nutno mít v podniku vnitřní okruh chladicí vody s jejím dochlazováním odpařováním do vzduchu. Tato voda v letní sezóně mívá i nad 30°C, takže chlazení na nižší teploty vyžaduje zvláštní technologie.

Při kontinuálním vedení procesů je možno provázat proudy tak, že teplem odváděným při chlazení se predehřívá jiný proud. Důmyslným propojením celé technologie je možno ušetřit značné náklady na ohřev a chlazení, což jsou často klíčové položky, rozhodující o konkurenceschopnosti výroby. Zařízení, ve kterém se předává teplo jednoho proudu tekutiny přes pevnou stěnu do druhého proudu se nazývá **tepelný výměník**. Nejjednodušším typem tepelného výměníku je **výměník trubka v trubce**, ve skleněném laboratorním provedení nazývaný Liebigův chladič.

Pro ohřev a chlazení větších objemů se hodí nádoby s míchadlem, opatřené teplosměnnou plochou např. ve formě dvojitého pláště (duplikátoru), nebo s trubkou např. stočenou do šroubovicového hadu, případně kombinací obou. Výměník často nemá výhradní úkol přenést teplo; někdy se v něm uskutečňují složitější procesy nebo dokonce chemické reakce.



Obr. 4.8. Míchaná nádoba
s dvojitým pláštěm (duplikátorem) s výměňkovým hadem

□ Volba výměníku

Obvykle máme zájem přenést co nejvíce tepla za jednotku času

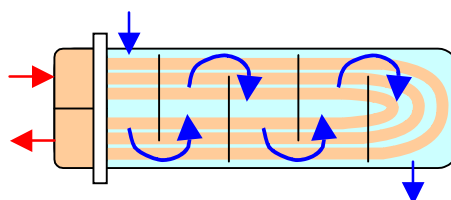
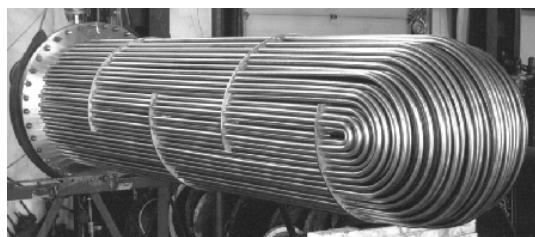
$$Q' = k S \Delta T$$

Proto se snažíme mít

1. co největší součinitel prostupu tepla

- obvykle nemůžeme ovlivnit látkové vlastnosti chlazené a ohříváné látky (Jen někdy se dá využít zásadně jiného teplonosného media, např. při odvodu tepla z některých jaderných reaktorů roztavenou slitinou sodíku a draslíku místo vody.)

- můžeme zlepšit vedení tepla stěnou užitím tenčí stěny z dobře vodivého materiálu (Např. použití mědi nebo hliníku místo oceli. V chemických technologiích však musíme volit odolné materiály, např. antikorozi oceli, které však mají menší vodivost než běžná konstrukční ocel. Ve speciálních případech se používá i tantal nebo grafit) a zamezením její koroze a znečištění úsadami (Např. periodické odstraňování úsad z teplosměnných ploch v kotlech ústředního topení, rozpouštění úsad na topných tělesech v pračce)
- můžeme zlepšit součinitele přestupu tepla na jedné či obou stranách – náhradou volné konvekce za nucenou, dále pak zvýšením rychlosti proudění a vyvoláváním turbulence



Obr. 4.9. Ukázka svazku trubek jednoho typu provozního trubkového výměníku. Tekutina A proudí uvnitř trubek, svazek je zasunut do kotle, kterým protéká tekutina B. Aby byly trubky obtékány dokonaleji, jsou na nich nasunuty přepážky nutící tekutinu B opakovaně obtékat trubky příčně

2. co největší plochu

- zvětšováním rozměru zařízení:

u **trubkového výměníku** zvětšováním **průměru** trubky d zhoršujeme poněkud α , **prodlužováním** délky trubek L zvyšujeme tlakovou ztrátu a nároky na čerpadlo – proto zpravidla raději volíme **svazek** užších trubek.

U **promíchávané nádoby** je typickou teplosměnnou plochou výměníkový **plášť**. Všimněme si skutečnosti, že při zvětšování všech rozměrů zařízení roste plocha stěn s dvojnásobkem délkového rozměru a objem se třetí mocninou. Proto se daří v malé nádobce měnit teplotu vsádky velmi rychle; pro velké nádoby se často zvyšujeme plochu kombinací s výměníkovými **hadý** případně dalšími **vestavbami**, mezi jejichž dvojími stěnami protéká druhá látka.



Obr. 4.10. Díly černé značky vznikne výměň



Obr. 4.11. Deskový výměník pro chlazení kyseliny sírové

Deskové výměníky, které sestávají z řady desek, mezi nimiž střídavě proudí tekutiny A a B, umožňují zvětšovat plochu přidáváním dalších desek. V poslední době se, díky vývoji kvalitních těsnících materiálů, stávají nejvýznamnějším typem výměníků pro práci při běžných tlacích. Plocha i součinitele přestupu se zde navyšují i použitím zvlněných desek. Plochy rozebíratelného deskového výměníku se dají snadno čistit a stávají se proto oblíbenými v čistých potravinářských a farmaceutických technologiích.

Zvětšováním plochy použitím **složitější tvarovaných** teplosměnných ploch – zejména

pro přenos tepla do plynů (příkladem jsou tělesa ústředního topení, žebrované plochy na straně horšího přestupu tepla známe také z chladičů motorů, kompresorů, lednic, elektronických součástek apod.)

3. **co největší teplotní rozdíl** – to často nemůžeme ovlivnit. Použití chladiwa o velmi nízké teplotě nebo ohřevu vysokou teplotou bývá nákladnější, a rovněž některé zpracovávané tekutiny nemusejí snášet příslušné teploty a teplotní rozdíly.

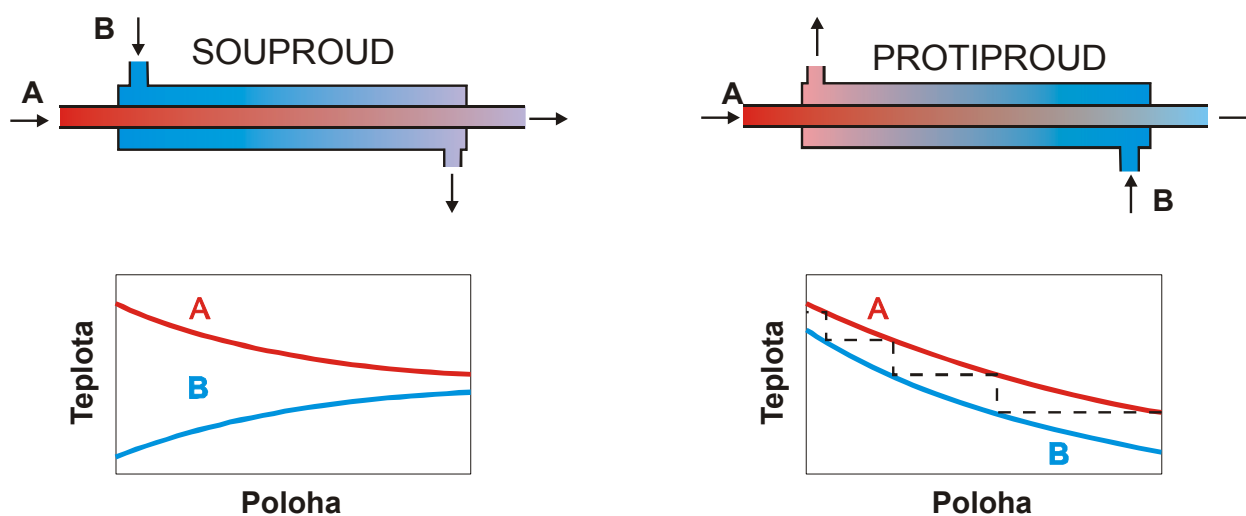
Promyslete si z hlediska použité teploty, rychlosti ohřevu (trvání procesu) a výsledku rozdíly mezi vařením, smažením, pečením, fritováním a grilováním.

Pokud máme možnost volby, hledáme zpravidla kompromis mezi velikostí teplosměnné plochy a mezi potřebným teplotním rozdílem.

□ Souproudý a protiproudý výměník

Zejména u trubkového výměníku je jednoduše vidět, že proudy tekutin A a B můžeme vést buďto ve stejném směru – pak výměník označujeme jako **souproudý**, nebo v obráceném směru – pak jde o výměník **protiproudý**.

V souproudém výměníku se teploty proudů od místa vstupu k místu výstupu v obou proudech



Obr.4.12. Rozložení teplot v souproudém a protiproudém výměníku

V protiproudém výměníku je v celém rozsahu poměrně malý teplotní spád mezi proudy A a B; zato výstupní teplota chladnějšího proudu B může být větší než výstupní teplota teplejšího proudu A – teploty se „vymění“. Počet schůdků, zakreslených čárkovanou čarou, znamená, že daný protiproudý výměník se chová jako 3 až 4 teoretické stupně.

V souproudém výměníku je na počátku velký tlakový spád a teploty se rychleji vyrovnávají; na konci však se rozdíl zmenšuje jen exponenciálně..

vzájemně přibližují; kdyby byl výměník dokonalý, došlo by nakonec k vyrovnání teplot na hodnotě dané kalorimetrickou rovnicí (4-27). Ideální zařízení, z něhož vystupují proudy v rovnováze, tedy i výměník, který opouští tekutiny se stejnou teplotou, nazýváme **rovnovážný stupeň**. Souproudý výměník má vždy horší funkci než 1 rovnovážný stupeň. Protiproudý výměník může mít i funkci několika rovnovážných stupňů, je v něm však obecně menší teplotní rozdíl mezi proudem A a B a tudíž při stejném součiniteli průchodu tepla za to musíme zaplatit větším rozměrem zařízení.

Úvaha o to, zda zapojit výměník protiproudě nebo souproudě je významná jen tehdy, když množství zpracovávaných tekutin je blízké ve smyslu vztahu $m_B c_{PB} \approx m_A c_{PA}$ a obě teploty se zásadně mění. Jinak je zapojení celkem lhostejné a používá se často i příčný **křížový tok**.

□ Výpočty tepelných výměníků

Ve všech případech tepelných výměníků uvažujeme dva proudy tekutin, které opět označíme A a B. V bilanci tepla vystupují teploty proudů ΔT_A , ΔT_B

□ Odvození základního vztahu pomocí diferenciální bilance

Diferenciální bilanci provádíme obecně pro element plochy ΔS za element času Δt a souhrnně to označíme $\Delta(S t)$. Protože předpokládáme, že součinitel průchodu tepla k je pro daný případ konstantní, platí podle vztahu (30)

$$\frac{\Delta Q}{\Delta(S t)} = -k (T_A - T_B) \quad (4-61)$$

Danému $\Delta(S t)$ odpovídají změny ΔT_A , ΔT_B teplot obou látek (změny za časový element Δt nebo během průchodu okolo elementu plochy ΔS). Teplo ΔQ převáděné z látky A na látku B se projevuje pro látku A o hmotnosti m_A a tepelné kapacitě c_{PA} změnou teploty

$$\frac{\Delta T_A}{\Delta(S t)} = \frac{-1}{m_A c_{PA}} \frac{\Delta Q}{\Delta(S t)} \quad (4-62)$$

a podobně pro látku B

$$\frac{\Delta T_B}{\Delta(S t)} = \frac{1}{m_B c_{PB}} \frac{\Delta Q}{\Delta(S t)} \quad (4-63)$$

Spojením vztahů (4-61)-(4-63) tak, abychom vyloučili ΔQ a následným převedením diferencí na diferenciály dostaneme rovnici

$$\frac{d(T_A - T_B)}{T_A - T_B} = -k \left(\frac{1}{m_A c_{PA}} \pm \frac{1}{m_B c_{PB}} \right) d(S t), \quad (4-64)$$

ve které znaménko – použijeme jen tehdy, když tekutiny A a B tečou kolem plochy S protiproudě. Její integraci přes plochu S a čas t obdržíme výsledek

$$\ln \frac{(T_A - T_B)_2}{(T_A - T_B)_1} = -k S t \left(\frac{1}{m_A c_{PA}} \pm \frac{1}{m_B c_{PB}} \right) \quad (4-65)$$

kde v případě průtočného výměníku je teplotní rozdíl mezi látkou A a B $(T_A - T_B)_1$ na té straně výměníku, od které integrujeme plochu a $(T_A - T_B)_2$ na druhé straně; v ostatních případech jde o teplotní rozdíly na počátku a na konci procesu.

□ Celková bilance tepla

Na celé ploše zařízení za celý čas se přenese z B do A množství tepla Q , které je rovno

$$T_{A2} - T_{A1} = \frac{-Q}{m_A c_{PA}} \quad (4-66a)$$

$$T_{B2} - T_{B1} = \frac{\pm Q}{m_B c_{PB}} \quad (\text{znaménko „-“ platí pro protiproud}) \quad (4-66b)$$

Pro ustálené proudění, kde známe hmotnostní průtoky použijeme bilanci za jednotku času

$$T_{A2} - T_{A1} = \frac{-Q'}{m'_A c_{PA}} \quad (4-66'a)$$

$$T_{B2} - T_{B1} = \frac{\pm Q'}{m'_B c_{PB}} \quad (\text{znaménko „-“ platí pro protiproud}) \quad (4-66'b)$$

Spojením (4-65) a (4-66) a úpravou dostaneme po zavedení veličiny

$$< T_A - T_B > \equiv \frac{(T_A - T_B)_2 - (T_A - T_B)_1}{\ln \frac{(T_A - T_B)_2}{(T_A - T_B)_1}} \quad (4-67)$$

klíčový vztah

$$Q = k S t < T_A - T_B > \quad (4-68)$$

a v ustáleném případě

$$Q' = k S < T_A - T_B > , \quad (4-68')$$

který použijeme pro výpočet rychlosti průchodu tepla v daném výměníku, případně pro výpočet velikosti výměníku nebo času potřebného pro uskutečnění požadovaného přenosu tepla. Všimněme si, že integrací jsme se dostali k výsledku, ve kterém figurují jen vstupní a výstupní (nebo počáteční a koncové) teplotní rozdíly obou proudů a není třeba rozlišovat, který případ označíme jako 1 a který 2.

Veličina $< T_A - T_B >$, zavedená vztahem (4-67) je logaritmický průměr rozdílu teplot mezi proudy A a B. Jeho výpočet je založen na největším a nejmenším rozdílu teplot proudů, vyskytujícím se v zařízení v průběhu procesu. Pokud se teplotní rozdíly $T_A - T_B$ v bodech a časech neliší o více než 50%, můžeme počítat $< T_A - T_B >$ s drobnou nepřesností jako běžný aritmetický průměr.

□ Typické výpočty:

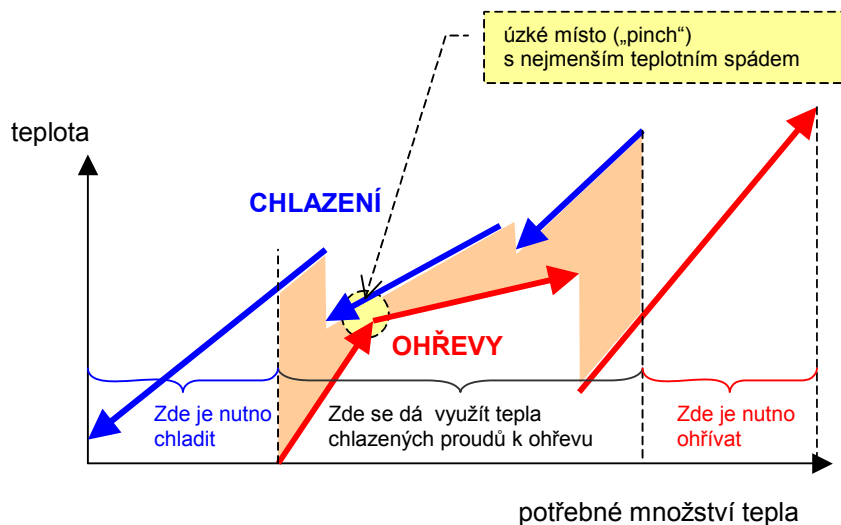
Samotná bilance:

Použijeme dvojice rovnic (66a,b) nebo (66'a,b) a z ní můžeme získat hodnoty dvou neznámých. Nejčastěji to bývá jedna výstupní teplota a hodnota Q .

Průchod tepla:

Přidáme rovnici (68) nebo (68') a můžeme vypočítat další neznámou: nejčastěji S . K tomu musíme ovšem znát k , kde se musíme obrátit na vztah (48) pro rovinou stěnu kam příslušné hodnoty α obvykle dopočítáme pro daný typ konvekce z příslušných kritériálních vztahů konkretizujících formální závislost (4-37) nebo (4-41).

Řetězení tepelných zařízení



Obr.4.13. Grafická metoda „Pinch Technology“
pro vymezení možností přenosu tepla z chlazených proudů na ohřívání

S použitím tepelných výměníků je možno využít energie tepla a chlazení vícenásobně. Stačí účelně zřetězit aparáty v technologii. K tomu nejdříve musíme provést inventuru všech žádoucích tepelných operací ve sledované výrobě tak, abychom dostali vždy příslušnou změnu teploty a odpovídající množství tepla za bilancované období. Seřadíme pak podle stoupající teploty jak skupinu ohřevů tak i skupinu chlazení. Posunem skupiny ohřevů doprava potom hledáme situaci, kdy chlazené proudy nebudou mít nižší teplotu než ohřívání. Tam, kde se skupiny proudů nepřekrývají, je nutno přidat nalevo chlazení, napravo ohřev. Ale tam, kde jsou chlazené proudy nad ohříváními, lze použít výměníků. Pozornost se věnuje úzké oblasti, kde se soubory linií nejvíce přibližují (této úžině se říká

„pinch“, což je anglicky něco jako špetka), neboť tam mají výměníky nejmenší hnací sílu. Když chceme hnací sílu zvětšit, bude to za cenu potřeby více dohřívát a dochlazovat. Uvedené analýze tepelných operací se říká „**Pinch Technology**“. Hospodárné využití tepla dost závisí na tom, aby všechny procesy běžely současně a jsou s ním problémy při najiždění, odstávkách a změnách režimu práce zařízení.

Odpadní teplo z elektrárny by stačilo třeba k otopu sídlišť nebo k temperaci skleníků. Stejně však se musejí stavět ohromné chladicí věže, protože teplo je nutné z elektrárny odebrat i v letní sezóně.

Dovedli bychom si představit, že motor, spalující benzín by se mohl opatřit chladičem, produkujícím tlakovou páru, kterou by se dala ještě pohánět parní turbína, odpadní nízkotlaká pára odtud by mohla vařit brambory, teplá voda z brambor by mohla ohřát vodu na praní nebo umývání nádobí, odpadní voda odtud by stačila k ohřevu ústředního topení a oteplený vzduch z místnosti by se mohl při větrání vypouštět do skleníku. Posuďte technické a ekologické problémy takového řešení.



Pojmy k zapamatování

Tepelný výměník, teponosné medium

Trubka v trubce, svazek trubek

Mícháná nádoba, duplikátor, hady, deskový výměník

Souproud, protiproud, křížový tok

Pinch technology



Příklady

Příklad 4.1.

Výměníky tepla

Úvod

V zásadě existují tři základní způsoby přenosu tepla, přenos vedením, konvekci a saláním. Ve výměnících se většinou vyskytují současně alespoň dva z uvedených. Úplný výpočet výměníku tepla může být velmi pracný. V současnosti se výpočty provádějí pomocí speciálních programů, které jsou součástí balíků určených k simulaci chemicko-technologických procesů (nap. Aspen Plus, ChemCad, Max, ...). Rozlišujeme výpočty návrhové (konstrukční), ve kterých jde o výpočet teplosměnné plochy výměníku a simulační (kontrolní), kdy hledáme neznámé teploty médií.

Výpočet teplosměnné plochy

Př. 7: Vypočtete velikost teplosměnné plochy výměníku, ve kterém se má ochladit 2 kg/s oleje z teploty 65°C na teplotu 25°C. Olej se chladí vodou, která vstupuje s teplotou 20°C a odchází s teplotou 40°C. Součinitel prostupu tepla je 180 W/m²/K, měrná tepelná kapacita oleje je 2000 J/kg/K.

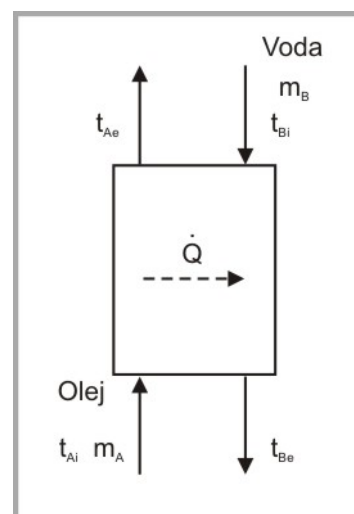
Postup: Z entalpické bilance výměníku vypočteme přenesené teplo, které porovnáme se způsobem přenosu. Z výsledku vyjádříme teplosměnnou plochu výměníku.

Entalpická bilance výměníku:

$$Q = \dot{m}_A \cdot c_{pA} \cdot \Delta t_A = \dot{m}_B \cdot c_{pB} \cdot \Delta t_B$$

Prostup tepla: $Q = k \cdot A \cdot \Delta t_{12}$

Teplotní spád protiproudého výměníku vyjádříme následovně: $\Delta t_{12} = \frac{(t_{A1} - t_{B2}) - (t_{A2} - t_{B1})}{\ln \frac{(t_{A1} - t_{B2})}{(t_{A2} - t_{B1})}}$



Výpočet:

$$\Delta t_{\text{is}} = \frac{(t_{A\text{f}} - t_{B\text{e}}) - (t_{A\text{e}} - t_{B\text{f}})}{\ln \frac{(t_{A\text{f}} - t_{B\text{e}})}{(t_{A\text{e}} - t_{B\text{f}})}} = \frac{(65 - 40) - (25 - 20)}{\ln \frac{(65 - 40)}{(25 - 20)}} = 12,42 \text{ } \quad \text{Protiproudý výměník tepla}$$

$$A = \frac{Q}{k * \Delta t_{\text{is}}} = \frac{\dot{m}_A * c_{pA} * (t_{A\text{f}} - t_{A\text{e}})}{k * \Delta t_{\text{is}}} = \frac{2 * 2 \cdot 10^3 * (65 - 25)}{180 * 12,42} = 71,5 \text{ m}^2$$

Odpověď: Potřebná teplosměnná plocha je 71,5m².

4.3. Přestup tepla se změnou fáze



Čas ke studiu: 3 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- rozlišit kvalitativní režimy varu a kondenzace a vysvětlit jejich příčiny
- charakterizovat typické znaky zařízení pro var, kondenzaci, odpařování
- vysvětlit rozdíly krystalizace z roztoků a tavenin



Výklad

Přestup tepla se změnou fáze je v určitém směru jednodušší než přestup tepla v jednofázové tekutině. Ukážeme si to nejprve na příkladu varu kapaliny a kondenzace páry; ostatní operace sdílení tepla se změnou fáze mají většinou podobné znaky a o jejich zvláštích se zmíníme v dalších odstavcích.

Var

Při **varu** se zpravidla teplo dodává do kapaliny od teplejší stěny; toto teplo se přenáší kapalinou vedením nebo konvekcí k fázovému rozhraní, na němž je teplota rovna právě teplotě varu. Teplo se zde spotřebovává na přeměnu fáze a vzniká pára v množství, úměrném tomuto teplu. Protože tepelná vodivost v parách je mnohem menší než v kapalinách a také konvektivní sdílení tepla v parní fázi je pomalejší, není obvyklé dodávat teplo na odpařování přes páru. (Je to vhodné jen tehdy, pokud z nějakého jiného zdroje máme k dispozici páru o vysoké enthalpii – tlakovou anebo přehřátou).

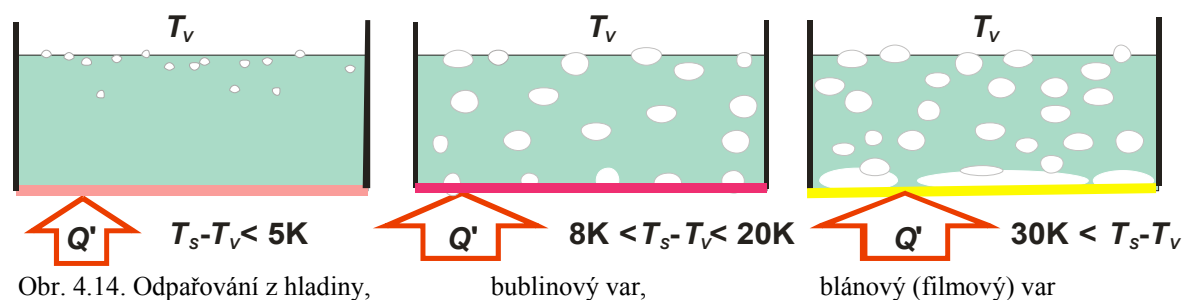
Režim varu

Aby se teplo dostalo od stěny k fázovému rozhraní, musí být teplota stěny T_S vyšší než je teplota varu T_V a v těsné blízkosti stěny tedy bude kapalina přehřátá. Tím nastává nestabilní situace a tomu odpovídá i několik režimů varu:

Odpařování (z hladiny) je typické pro malé toky tepla, při kterých se teplo od teplejší stěny až k hladině dopravuje vedením, a případně i volnou konvekcí. Děje se to při tepelných tocích do zhruba $q < 10^4 \text{ W m}^{-2}$, a rozdíl teploty stěny a teploty varu v tomto případě bývá malý, asi $T_S - T_V < 5 \text{ K}$. Odpařování se na pohled neprojevuje žádnými zvláštními efekty. Proč zde nevznikají bubliny? Jednak při obvyklém ohřevu odspoda přibývá v kapalině u dna hydrostatický tlak, takže je tu i vyšší teplota varu než u hladiny (1 m sloupce vody zvyšuje její teplotu varu o asi 3 K), jednak při zvětšování bubliny je nutno překonávat sílu povrchového napětí.

Je-li rozdíl teploty stěny a teploty varu asi $8 \text{ K} < T_S - T_V < 20 \text{ K}$ (tepelný tok v rozmezí $10^4 < q < 10^6 \text{ W m}^{-2}$), nastává nejznámější **bublinový var**. U stěny vznikají bublinky páry a teplo se tedy od stěny přenáší jen k povrchu bubliny. Bublina má tendenci (usazováním) se pohybovat směrem vzhůru a proto technické řešení varu využívá přívodu tepla do kapaliny hlavně odspodu nebo z boku. Odtržením bubliny od stěny dojde k nátoku nové kapaliny na stěnu a k výraznému promíchání kapaliny u stěny, čímž se rychlost přestupu tepla výrazně zvyšuje. Součinitel přestupu tepla α zde dosahuje až hodnot $5 \times 10^5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

Jakmile teplota stěny je ještě větší, $T_S - T_V > 20 \text{ K}$, vzniká tolik par, že si začíná překážet pára odcházející od stěny s kapalinou ke stěně přitékající. Jednotlivé bubliny se nestačí od stěny dostatečně rychle odtrhnout a spojují se do vrstvy. Příslušný režim varu označujeme jako **blánový (nebo filmový) var**. Kapalina je oddělována od stěny tepelně izolující vrstvou páry a součinitel přestupu tepla klesá pro $T_S - T_V > 100 \text{ K}$ na asi $\alpha = 10^3 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.



Tento režim pozorujeme například při varu kapky vody na rozžhavené plotně – kapka se vznáší na vzniklé páře. Blánové odpařování z povrchu bosé nohy se označuje jako jedno z možných vysvětlení schopnosti fakírů chodit po rozžhaveném uhlí.

Analogické problémy režimu, jaký nacházíme u varu, se objevují všude tam, kde vzniká plynná fáze na styku kapaliny se stěnou. Je to například při rozkladu některých pevných látek stykem s kapalinou, a velmi významné je to při **elektrolýze**, kde bubliny či blány plynu na elektrodě zvyšují elektrický odpor a snižují tím výkon elektrolyzátoru. Proto se elektrody dělají někdy zvlněné tak, aby stoupající bubliny přístěnnou vrstvou co možno nejdříve opouštěly.

❑ Přehřátá kapalina

Je zřejmé, že tam, kde se vyvíjí pára rychle, setkáváme se v některé části objemu s kapalinou přehřátou. Při ohřevu se může ještě před vývojem bublin akumulovat do kapaliny větší množství tepelné energie. To nazýváme někdy **utajený var**; když se za těchto podmínek objeví bublinka, začne neobyčejně rychle růst a při pohybu k hladině působí jako pumpa mamutka a může kapalinu strhávat vysoko nad hladinu. Většinou je to proces nežádoucí a snažíme se jej potlačit. Utajený var je běžný v laboratorní praxi, když pracujeme s čistými kapalinami v nádobí s hladkými stěnami. K jeho omezení používáme „varný kamínek“ obvykle z porézní keramiky. V pórech se bublinky vytvářejí s menším vynaložením povrchové energie. Někdy stačí i malé neporézní skleněné kuličky nebo korálky, protože pod nimi dojde k místnímu přehřátí stěny a drobné bublinky se vytvářejí bez velkého

vynaložení povrchové energie v místě dotyku tělíska se stěnou. Při vakuové destilaci v laboratoři necháváme zpravidla mírně probublávat vroucí kapalinu vzduchem přísávaným tenkou kapilárou. V provozních aplikacích zpravidla postačí k iniciaci varu běžná drsnost stěn aparátů. V kuchyňské praxi se také setkáváme s utajeným varem zřídka, protože obvykle uvádíme k varu vodovodní vodu, která obvykle ještě uvolňuje rozpuštěný vzduch (asi 20 cm³ vzduchu v 1 litru studené vody). Zvláště snadno se dá získat přehřátá kapalina při mikrovlnném ohřevu, kde var nezačíná na přehřátých stěnách nádoby.

Horká kapalina se může stát přehřátou mžikem, jestliže náhle poklesne tlak. To je nebezpečné, jestliže těkavou kapalinu, uzavřenou v nádobě ohřejeme vysoko nad její normální teplotu varu a zvýšíme tak tenzi par a tedy tlak v nádobě. Při vypouštění kapaliny nebo při prasknutí stěny se tlak uvolní a kapalina s vysokou entalpií se okamžitě přeměňuje na více než tisícinásobný objem par.

Tento děj se označuje v bezpečnostní technice zkratkou **BLEVE** (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion). Byla to typická havárie parních kotlů v 19. století. Zvláště nebezpečné je to v případě hořlavin, které po expanzi par obvykle ještě vytvoří rozsáhlý plamen. Dnes se provozní zařízení, kde toto riziko hrozí, povinně vybavují pojišťovacími ventily nebo průtržnými membránami, které již při menším překročení dovoleného provozního tlaku vypustí páry co možno bezpečným způsobem. Při požáru však BLEVE může nastat v každé pevně uzavřené skladovací nádobě s kapalinou.

Jestliže podrobíme rychlé expanzi přehřátou kapalinu zadrženu v ztuhlém materiálu tak, že pára nestačí unikát, dojde k napuštění materiálu na velký objem. Propan, rozpuštěný v polystyrenu jej přetvaruje na pěnový polystyren, expandující pára přetvoří vařenou rýži na objemnější porézní burisony, kukuřičná zrna na popcorn.

□ Vařáky

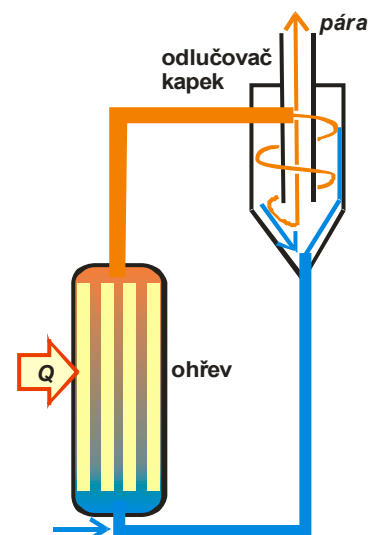
Obecně označujeme zařízení, ve kterém dodáváním tepla uskutečňujeme var, jako **vařák**. Bilance vařáku je jednoduchá: pokud ve vařáku je přítomna kapalina při teplotě varu, případně pokud takováto kapalina do vařáku přitéká, je množství generované páry m_V přímo úměrné dodávanému teplu a nepřímo úměrné skupenskému teplu vypařování

$$m_V = Q / \Delta h_{\text{vyp}}$$

$$m'_V = Q' / \Delta h_{\text{vyp}}$$

(při bilanci hmotnosti musí být výparné teplo vztaženo na jednotku hmotnosti!).

Vařák, zařízený jako válcová nádoba, pod níž je topeniště, patří k parním strojům z poloviny 19. století. Dnes se var průmyslově provádí uvnitř trubic svislých nebo šikmých, z nichž pára snadno odchází nahoru. Protože se parou strhává také kapalina (jako v mamutce), je důležitým příslušenstvím vařáku i odlučovač páry, například „cyklon“, ze kterého se kapalina vrací spodem do ohřevu (Obr.xx).



Obr.4.15. Příklad uspořádání vařáku

□ Odparky

Zvláštním případem je var, jehož cílem je odpar rozpouštědla – **odparka**. Problémem zde bývá to, že může docházet k „zahušťování“ směsí, spojené s tvorbou krystalů nebo jiných usazenin na teplosměnných plochách (v kuchyni známé připékání na dno hrnce). Tomu se můžeme bránit intenzivnějším prouděním kapaliny například pomocí míchání. Pro velmi intenzivní přestup tepla se například používá **filmová odparka**, sestávající ze svislé trubice, ve které se točí rychloběžný rotor, který odstředivou silou nahání kapalinu na stěnu a tím umožňuje rychlé odpařování za teplotních podmínek, při nichž bychom jinak očekávali filmový var.

Brýdová pára (nasycená pára o malém tlaku a teplotě), která vzniká v odparce, má stále ještě jistý tepelný obsah, kterého by bylo výhodné ještě využít k ohřevu v další odparce. K tomu, aby mohla uvést kapalinu stejného typu do varu, však nemá potřebně vyšší teplotu. Navíc, kapalina s rozpuštěnou solí má zvýšenou teplotu varu. Často se to řeší tak, že se v dalším stupni odparky kapalina udržuje při

sníženém tlaku. Pak se dodávané teplo využije k odparu opakovaně. Běžně se dělají **vícetupňové odparky** se třemi stupni, ale jsou známy i desetistupňové odparky např. na odsolování mořské vody. Jinou možností je zvyšovat teplotu brýdové páry dodáním mechanické energie tepelným čerpadlem.

□ Parní kotle

Velká zařízení, určená pro výrobu energetické vodní páry (pro pohon turbín nebo pro topení) jsou **parní kotle**. Elektrárenské kotle produkují stovky až tisíce kg/s páry. U tepelných elektráren se pára vytváří v trubkovnicích, kolem kterých proudí spalné plyny. Trubkovnice se uspořádávají svisle nebo šikmo a parokapalinová směs se dále z nich vždy vede přes odlučovače kapaliny. Samotná pára se obvykle vede znovu přes topeniště další trubkovnicí, ve které se ještě zvýší její enthalpie a dostává se **přehřátá pára**, vhodná pro pohon turbín.

Teplárny se liší od elektráren tím, že jejich hlavním produktem je pára anebo horká voda pro využití v průmyslu nebo pro otop sídlišť. Větší teplárny proženou vyráběnou páru při výrobě teplotnosného média také turbínou a získají elektřinu. Podobně se někdy může podařit uplatnit odpadní teplo z elektráren k vytápění. (Z elektrárny Mělník vede teplárenské potrubí až k severním pražským sídlištím.)

Při přenosu tepla se často používá více okruhů s různými nároky na tlak a čistotu. Tyto okruhy si teplo předávají tepelnými výměníky. Parním kotlem a turbínami se vede velmi čistá deionizovaná voda zbavená kyslíku. Dálkové parovody nebo teplovody také pracují s uzavřeným tlakovým okruhem. Teprve domovní výměňkové stanice předávají teplo konečným uživatelům jednak do beztlakového okruhu ústředního topení s mírně upravenou vodou, jednak do ohřáté teplé užitkové vody.

U jaderných elektráren bývají dva okruhy; přísně uzavřený primární, který přenáší teplo z reaktoru a předává druhému okruhu, ve kterém se teprve generuje pára pro turbíny, jejíž případné ztráty nehrozí významným únikem radioaktivity. České jaderné reaktory jsou primárně chlazeny tlakovou vodou. (Primární okruh může používat i jiného přenosu tepla, např. tepelnými trubicemi nebo roztavenými alkalickými kovy.)

Kondenzace

Ke kondenzaci – vzniku kapaliny z plynné fáze - dochází na styku páry se stěnou o nižší teplotě než je **teplota kondenzace** této páry. (V kapitole o destilaci ukážeme, že pro parní směsi teplota kondenzace není obecně shodná s teplotou varu příslušné kapaliny, v kapitole o paroplynných směsích ukážeme, že podobnou funkci má rosný bod). Pro jednosložkovou páru je teplota kondenzace a varu shodná.

Pozn.: jazykově korektní pravopis „kondensace“ se běžně dnes ignoruje, takže i zde přejímáme současnou normu psaní „kondenzace“.

Počátek kondenzace se vyznačuje tvorbou kapek na stěně. Podobně jako při bublinovém varu je při **kapkové kondenzaci** vysoký součinitel přestupu tepla. Zpravidla se proto brzy vyvine **blánová (filmová) kondenzace**, při níž se kapky spojí do souvislé vrstvy, jejíž tloušťka narůstá, pokud se kondenzát dostatečně rychle neodstraňuje. Ze spodní strany chlazených ploch kondenzát odkapává. Po svislých stěnách kondenzát stéká ve vrstvě, která postupně narůstá (Obr. 4.16). Tato vrstva má na jedné straně teplotu stěny T_s a na druhé teplotu varu T_V , a dokud je vrstva tenká, stéká laminárním způsobem a teplo se přes ni přenáší jen vedením. Řešením příslušné úlohy (které by mohl dnes zvládnout každý student pokročilého kursu procesního inženýrství) se proslavil Nusselt. Vycházejí vysoké součinitele přestupu tepla (mezi parou a stěnou), řádově $\alpha = 10^3$ až $10^4 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Při kapkové kondenzaci je přestup tepla podstatně vyšší, protože pára je částečně v přímém styku s chladnější stěnou. Avšak snahy udržet stěnu nesmáčivou vůči kondenzátu jsou úspěšné jen krátkodobě a potom se kapky spojují do filmu.

(Naproti tomu odmašťování oken v autech za chladného počasí dosahujeme toho, že kondenzace je filmová a nevznikají jednotlivé kapky, rozptylující procházející světlo.)

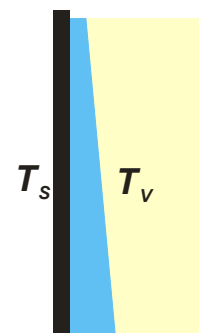
Tvarem a uspořádáním teplosměnné plochy můžeme odvádění kondenzátu ovlivnit. Jedním z výhodnějších uspořádání kondenzátoru je takové, kde chladicí medium proudí horizontálními trubkami, které nejsou řazeny nad sebou (Obr. 4.17.).

Kondenzace shora na vodorovné stěně aparátů je pomalá, protože se zde brzy vytvoří nepohyblivá vrstva kapaliny s vyšší teplotou T_v u hladiny; přenos tepla kapalinou zde tedy není podporován volnou konvekcí. Ze stropu kondenzátoru (z poklice hrnce) zato kapalina odkapává a přenos tepla je velmi intenzivní.

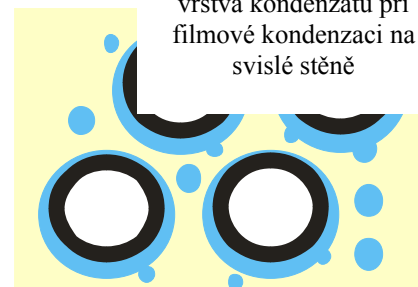
Tepelná bilance kondenzátoru je podobná jako bilance vařáku: množství vzniklého kondenzátu je úměrné množství odebraného tepla.

$$m_K = Q/\Delta h_{\text{vyp}}$$

Zvláštním případem kondenzace je **směšovací kondenzace**, při které se teplo odebírá chladnou tekutinou, nastříkovanou do parního prostoru. Je účelná spíše tam, kde kondenzát není cenný a množství páry je malé. Směšováním horkých spalných plynů, obsahujících vodní páru, s chladným vzduchem vzniká mlžná stopa za letadly, nebo mlha nad chladicími věžemi a komíny. (Kouř to nazýváme až při velkém zastoupení jiných aerosolových částic!) Kondenzací vznikají také z různých par aerosolové částice (airborne particles), obtížně odstranitelné typické znečištění ovzduší u metalurgických provozů, spaloven a elektráren.



Obr. 4.16. Rostoucí vrstva kondenzátu při filmové kondenzaci na svislé stěně



Obr. 4.17. Chladicí trubice v kondenzátorech jsou umísťovány tak, aby z nich kondenzát mohl snadno odtékat

□ Kondenzátory

Kondenzátory jsou podobná zařízení jako běžné výměníky. Jak bylo zmíněno, pro velké průtoky páry se hodí spíše kondenzátory s horizontálními trubkami a s parou v mezitrubkovém prostoru. Geometrii zařízení se snažíme uzpůsobovat tak, aby stékající kapalina netvořila souvislé proudy (Viz Obr.4.17.). Pro kondenzaci kapalin s vysokou teplotou varu se dá použít vzduchem chlazených kondenzátorů, kde se pára vede uvnitř trubek, které bývají žebrované, aby se zvýšil přenos tepla z okolního vzduchu, který bývá kolem trubek proháněn ventilátorem.

Hlavní úlohou kondenzátoru nemusí být děj na straně páry – získávání kapalně fáze z páry, ale kondenzátor bývá také koncovým zařízením přenosu tepla: pára se generuje v teplárně, dopravuje se potrubím a v kondenzátoru se předává její teplo dále (např. chemickému reaktoru, odparce, vodě pro ústřední topení, nebo vzduchu při horkovzdušném vytápění). Kondenzát topné vodní páry má charakter destilované vody; proto je cenný a vrací se zpět do teplárny nebo elektrárny. V chemických technologiích s nároky na čistou vodu se ale také někdy odebírá.

□ Příslušenství kondenzátorů

Při kondenzaci je podstatné, aby se ze zařízení odváděl všechny kondenzát a žádná nezkondenzovaná pára. Proto jsou kondenzátory vždy vybaveny oddělovačem kondenzátu - tzv. „**kondenzačním hrncem**“, kde zpravidla je plovák spojený s ventilem, vypouštějícím kapalinu když její hladina stoupne (*podobně jako plovák splachovače otvírá vstupní ventil když hladina v nádrži klesne*). Podle množství vzniklého kondenzátu je možno počítat parou dodané teplo.

Důležitým zařízením kondenzátoru je **odvzdušnění**. Jestliže pára obsahuje nekondenzovatelnou „inertní“ složku, tento inert se v kondenzátoru hromadí a brání přístupu páry k chladicím plochám. Tato situace se označuje jako „vzduchový polštář“. Zejména při startování kondenzátoru je nutno inert odstranit; v případě parního topení se jednoduše vypustí i s trochou páry odvzdušňovacím ventilem. V případě kondenzace při sníženém tlaku (vakuové odparky, vakuové destilace) se podtlak udržuje napojením vývěvy k nejvzdálenějšímu (nejchladnějšímu) místu kondenzátoru a tudíž se inert odčerpává.

Kondenzací páry se zmenšuje objem, takže zchlazením uzavřeného parního prostoru se uvnitř sníží tlak a pokud na tuto situaci není nádoba správně dimenzována, hrozí riziko jejího zborcení vnějším tlakem atmosférickým.

□ Topení přímou parou

Poměrně jednoduchý způsob ohřevu, používaný zejména při nouzových situacích je ohřev parou, zaváděnou přímo do ohřivaného prostoru. Nejčastěji jde o ohřev vody nebo vodných roztoků. Pára, vháněná do chladnější kapaliny tvoří bubliny, které rychle kondenzují. Při této kondenzaci získá kapalina kolem bubliny dostřednou rychlost, takže v závěru dochází ke srážce, doprovázené výrazným zvukem. Ohřev přímou parou je tedy doprovázen při rozvedení páry do malých bublin šumem, u větších bublin silným hlukem a rázy.

□ Tepelné trubice

Vysoké součinitele přestupu tepla při varu a kondenzaci vedly k vynálezu nového typu zařízení pro přenos tepla. Je to uzavřená trubice s obsahem kapaliny a její páry. Je-li vsunuta dolním koncem do horkého a horním do chladného prostředí, probíhá v ní var a kondenzace a přenáší se značné množství tepla. Kondenzát se obvykle vrací do teplé zóny nejen gravitací, ale i kapilaritou po vhodně upravené vnitřní straně stěny. Protože jde o objemově malé, uzavřené zařízení, je zde možno použít i méně běžných pracovních kapalin. Tepelné trubice se hodí k přenosu velkého množství tepla přes malou plochu stěny a používají se spíše u specializovaných technologiích (např. odvod tepla z jaderných reaktorů, chlazení elektronických součástek, apod.).

Ohřev tuhého materiálu, rozpouštění, tavení, sublimace

Při ohřevu nebo chlazení kusového, zrnitého nebo práškovitého materiálu je přenos tepla poněkud obtížnější než ohřev tekutin. S pevnou stěnou a s dalšími částicemi je materiál zpravidla jen v bodovém kontaktu, takže místní vedení tepla je špatné. Proto používáme k ohřevu pomocnou tekutinu (např. vodu k ohřevu párků, oleje ke smažení). Při výpočtech pak musíme uvažovat jednak součinitel přestupu ze stěny do tekutiny jednak z tekutiny do částice. Mechanismem bývá volná konvekce v poměrně malém prostoru, v metalurgických procesech a ve vysokoteplotních reaktorech musíme připočítat sálání tepla.

Poněkud výhodnější je to při tavení nebo sublimaci kde se po nějaké době jednak vytváří horká tekutá fáze, jednak se částice dostávají při úbytku objemu do lepšího plošného kontaktu.

Tyto procesy vyžadují teplo pro ohřev a změnu skupenství.

Krystalizace

□ Krystalizace z taveniny

Krystalizací rozumí materiálový inženýr zpravidla **krystalizaci z taveniny**, kde se krystaly vytvářejí při tuhnutí kapaliny a při jejich dalším tepelném zpracování. Z hlediska přenosu tepla jde o řízený proces chlazení. Při tepelné bilanci musíme respektovat to, že část tepla odebíráme při samotném ochlazování, ale navíc odebíráme i příslušné skupenské teplo.

Zajímavé je, když se při tom současně provádí „processing“ tehdy když současně vytváříme výrobek nebo prefabrikát (například tvarování skla, polymerů, těstovin). To se dá dělat jednak jednorázovým lisováním, foukáním nebo vstřikováním do chlazené formy jednak kontinuálním vytlačováním tvarovou hubicí do chlazeného prostoru (tabulové sklo, skleněné trubice, plastové profily, vlákna, hadice, makaróny, špagety). U zmíněných materiálů je výhodou, že z vysokoviskózního tekutého do pevného skupenství přecházejí pozvolna, takže na tvarování a chlazení je dost prostoru a času. Nemůžeme zde přesně vymezit teplotu tání; je tu jenom teplota skelného přechodu, nad níž se materiál dá tvarovat a pod níž je křehkým.

Podstatně náročnější je kontinuální tvarování kovových profilů („kontilit“), protože kovy přecházejí z nízkoviskózní kapaliny do pevného skupenství skokově při teplotě tání. Intenzivním chlazením (ostřík

odpařovanou vodou) je současně nutno vytvořit na povrchu odtahovaného profilu dostatečně pevnou kůru, kterou vnitřní tavenina již neprorazí a přitom nezchladit kov natolik aby ucpal hubici.

Krystalizací z taveniny (nebo z plynu – obrácený proces k sublimaci) lze také vyrobit velké čisté monokrystaly (např. křemík pro polovodiče nebo technický rubín, s použitím velmi vysokých tlaků i diamanty).

Pro lepší manipulovatelnost se někdy snažíme získat pevný materiál v granulích.

Historickým případem byla výroba broků kapáním roztaveného olova z věže. Podobně se vyrábějí pecičky hydroxidu sodného nebo smoly, kuličky „prilované“ močoviny, granulovaný zinek apod.

❑ Krystalizace z roztoku

V chemických výrobcích jde častěji o **krystalizaci z roztoku**. Klíčovou veličinou je zde rozpustnost. Rozpustnost lépe rozpustných tuhých látek nejčastěji tradičně tabelují chemici jako hmotnost látky v gramech, která se rozpustí za dané teploty ve 100 g vody. Při výpočtech pozor na to, zda v definici látky je nebo není započítána krystalová voda!

Běžně se při krystalizaci postupuje tak, že se postupně odpařuje v odparce rozpouštědlo. Aby nedošlo k narůstání krystalů na ohřívacích plochách (nárůsty krystalů se obtížně ze stěn odstraňují a zhoršují tam přestup tepla) vede se zpravidla zahuštěný roztok do další nádoby, **krystalizátoru**, ve kterém se chladí. Rozpustnost solí většinou (někdy velmi výrazně) klesá s klesající teplotou, takže chlazením se stává roztok přesyceným. V laboratoři krystalizaci z chlazeného nasyceného roztoku říkáme **rušená krystalizace** a pro její bilanční výpočet nás zajímá rozpustnost dané soli při teplotě varu a při laboratorní teplotě (ty bývají uvedeny i v jednodušších tabulkách). V krystalizačním prostoru se začnou vylučovat krystaly, které se i v provozu odlučují sedimentací nebo filtrací. Nasycený roztok tzv. „**matečný louh**“ se vrací zpět do odparky. Vhodným vedením proudění a sdílení tepla v krystalizátoru se dá dosáhnout toho, že krystalizace na teplosměnných plochách nenastává, do výstupu se dostávají jen dostatečně velké krystaly zhruba stejného rozměru a malé krystaly se ponechávají jako krystalizační **zárodky** pro další krystalizaci. Čím je krystalizace pomalejší, tím vznikají větší čisté krystaly, obsahující v ideálním případě jen tu látku, která je v matečném louhu nasycená. Ostatní látky v matečném louhu zůstanou. Bohužel ale některé směsi jsou schopny tvořit směsné krystaly (např. obsahují-li ionty blízké chemické povahy a blízkého rozměru) a jejich dělení krystalizací je nedokonalé.

❑ Srážení z roztoku

Špatně rozpustné látky většinou nezpracováváme krystalizací.

Pro špatně rozpustné látky se udává rozpustnost pomocí součinu rozpustnosti.

Tvorba sraženin je spojena obvykle s rychlou chemickou reakcí a rychlost tvorby sraženin závisí hlavně na rychlosti směšování příslušných reaktantů. Velikost a struktura vzniklých částic se dá poněkud ovlivnit teplotou nebo přítomností povrchově aktivních látek. Tyto sraženiny vznikají přednostně na přítomných zárodcích pevných látek.

Toho se využívá např. při čiření vody hydrolyzou železitých nebo hlinitých solí, v cukrovaru se zachycují nečistoty do sraženiny, vznikající uváděním oxidu uhličitého do cukerné šťávy s přísadkou vápna.

Někdy vznikají objemné sraženiny, které jsou obtížně oddělitelné od matečného louhu. Spojování částic do kompaktnějších celků pomocí přísadky elektrolytu, povrchově aktivního činidla nebo ohřátím se označuje jako **koagulace** nebo **aglomerace**. (Tvaroh lze třeba z mléka získat okyselením, vaječný bílek se srazí zvýšením teploty.) U pigmentů a sorbentů je ale naopak nanometrická struktura žádoucí.

Kalcinace

Úplně vysokoteplotní odpařování rozpouštědla z roztoku soli, **kalcinace**, je zpravidla spojeno s narůstáním krystalů na teplosměnné ploše a se ztrátou jejich případné krystalové vody nebo dokonce s chemickým rozkladem.

Kalcinací zelené skalice $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ vznikne nejprve monohydrát $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, pak FeSO_4 a ten se při asi 400°C dále rozpadá na FeO , Fe_2O_3 , SO_2 a SO_3 .

Produkt může být práškový. Vzniká-li na vyhřívané stěně kompaktní spečenec, musí se mechanicky odstraňovat. Často je teplosměnnou plochou zevnitř vyhřívaný rotující hladký válec, z něhož se produkt odebírá škrabkami.



Pojmy k zapamatování

Odpařování, var bublinový, filmový – blánový

Přehřátá kapalina, utajený var, BLEVE

Vařák, odparka, parní kotel, teplárna

Brýdová pára, přehřátá pára, topení přímou parou

Kondenzace kapková, blánová – filmová

Kondenzátor, směšovací kondenzace

Krystalizace z taveniny, z roztoku, matečný louh, zárodky

Koagulace, aglomerace, kalcinace

atd.

Nebo jen vyjmenovat pojmy, pokud jsou definovány v textu a nemá smysl to opakovat.



Příklady

Příklad 4.2.

Zahušťování NaOH v odparce

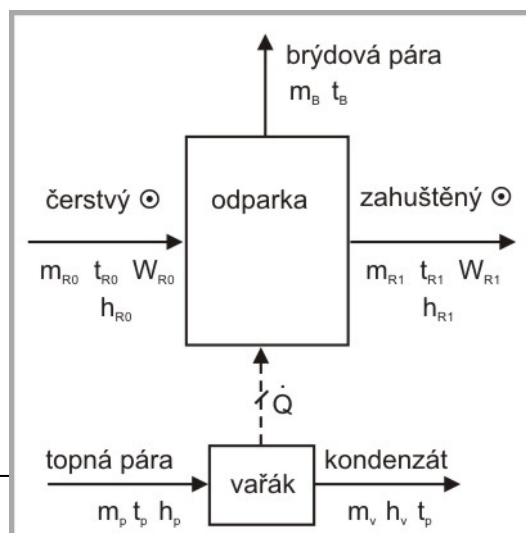
V jednočlenné odparce se zahušťuje 1500 kg za hodinu roztoku NaOH z počáteční koncentrace 10 hm.% na konečnou koncentraci 30 hm.%. Roztok vstupuje do odparky při teplotě 30°C, tlak v odparce je 0,1013 MPa a ztráty tepla do okolí jsou zanedbatelné. Určete spotřebu topné páry o teplotě 130°C jestliže se kondenzát odvádí při teplotě kondenzace.

Postup:

Při hmotnostní a entalpické bilanci odparky vycházíme z následujících předpokladů:

- V odparce je ideální míchání
- Brýdová pára obsahuje pouze rozpouštědlo
- V odparce je vroucí ☉, brýdová pára a zahuštěný ☉ mají teplotu varu ☉ v odparce
- $t_{\text{varu} \odot} = t_{\text{varu rozpouštědla}} + \Delta t_e$ (ebulioskopické zvýšení bodu varu)
- topná pára ve vařáku pouze kondenzuje, nedochází k jejímu podchlazení
-

Spotřebu topné páry vypočteme z hmotnostní a entalpické bilance odparky a vařáku v následujících krocích: Zapišeme entalpickou a hmotnostní bilanci odparky. Z hmotnostní bilance vypočteme množství brýdových par. Stanovíme teplotu varu zahuštěného roztoku. Vypočteme měrné entalpie čerstvého a zahuštěného roztoku. Z entalpické bilance odparky vypočteme množství přijatého tepla. Hledanou spotřebu topné páry pak vypočteme z entalpické bilance vařáku.



Obrázek 1: Odparka

Hmotnostní bilance odparky: $\dot{m}_{R0} = \dot{m}_{R1} + \dot{m}_B$

Hmotnostní bilance odparky složková pro NaOH: $w_{R0}\dot{m}_{R0} = w_{R1}\dot{m}_{R1}$

Entalpická bilance odparky: $\dot{m}_{R0}\Delta h_{R0} + Q = \dot{m}_{R1}\Delta h_{R1} + \dot{m}_B\Delta h_B$

Entalpická bilance vařáku: $\dot{m}_P\Delta h_P = \dot{m}_V\Delta h_V + Q$; $Q = \dot{m}_P\Delta h_{vyp}$

Ebulioskopické zvýšení bodu varu: $\Delta T_e = 3816/(11.67 + AX + BX^2 + CX^3) - 327$, kde A, B, C - jsou konstanty příslušné rozpuštěné látky a X je relativní hmotnostní zlomek rozpuštěné látky na výstupu.

$$X = \frac{w_{R1}}{1-w_{R1}}$$

Teplota varu $\odot$ na výstupu z odparky: $t_{R1} = t_{v,rozp} + \Delta T_e$

Měrná entalpie čerstvého $\odot$: $\Delta h_{R0} = [w_{R0}c_{PNaOH} + (1-w_{R0})c_{PH_2O}]t_{R0} + \Delta h_{rozp}w_{R0}$

Kde, w je hmotnostní zlomek, c_P je měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku a Δh_{rozp} je rozpouštěcí entalpie NaOH, vše vztaženo k teplotě t_{R0} .

Měrná entalpie zahuštěného $\odot$: $\Delta h_{R1} = [w_{R1}c_{PNaOH} + (1-w_{R1})c_{PH_2O}]t_{R1} + \Delta h_{rozp}w_{R1}$

Výpočet:

hmotnostní toky v odparce: $\dot{m}_{R1} = \frac{w_{R0}\dot{m}_{R0}}{w_{R1}} = \frac{0.1 \cdot 1500}{0.3} = 500 \text{ kg/h}$

$$\dot{m}_B = \dot{m}_{R0} - \dot{m}_{R1} = 1500 - 500 = 1000 \text{ kg/h}$$

Relativní hmotnostní zlomek na výstupu: $X = \frac{w_{R1}}{1-w_{R1}} = \frac{0.3}{1-0.3} = 0.429$

Ebulioskopické zvýšení bodu varu:

$$\Delta T_e = 3816/(11.67 + (-0.9853)X + (-0.8253)X^2 + 0.4717X^3) - 327 = 16^\circ\text{C}$$

Teplota varu $\odot$ na výstupu z odparky: $t_{R1} = t_{v,rozp} + \Delta T_e = 100 + 16 = 116^\circ\text{C}$

Tabulka 2: Data pro výpočet měrných entalpií $\odot$

	$c_P(t_{R0})$ [kJ/kg/K]	$c_P(t_{R1})$ [kJ/kg/K]	$\Delta h_{rozp}(w_{R0})$ [kJ/kg]	$\Delta h_{rozp}(w_{R1})$ [kJ/kg]
NaOH	1.495	1.639	-1071	-954
H ₂ O	4.18	4.24	-	-

Měrná entalpie čerstvého $\odot$:

$$\Delta h_{R0} = [w_{R0}c_{PNaOH} + (1-w_{R0})c_{PH_2O}]t_{R0} + \Delta h_{rozp}w_{R0} \\ = [0.1 \cdot 1495 + 0.9 \cdot 4180] \cdot 30 - 1071000 \cdot 0.1 = 10245 \text{ J/kg}$$

Měrná entalpie zahuštěného $\odot$:

$$\Delta h_{R1} = [w_{R1}c_{PNaOH} + (1-w_{R1})c_{PH_2O}]t_{R1} + \Delta h_{rozp}w_{R1} \\ = [0.3 \cdot 1639 + 0.7 \cdot 4240] \cdot 116 - 945000 \cdot 0.3 = 117830 \text{ J/kg}$$

Pro úplnost schází ještě informace o entalpii brýdových par a výparné teplo topné páry ve vařáku. Tyto údaje lze získat např. z parních tabulek.

Měrná entalpie brýdových par (syťá pára při t_{R1}): $\Delta h_B = 2700 \text{ kJ/kg}$

Výparné teplo topné páry (syťá pára při t_P) $\Delta h_{vyp} = 2174 \text{ kJ/kg}$

Výpočet

předaného

tepla:

$$Q = \dot{m}_{R1}\Delta h_{R1} + \dot{m}_B\Delta h_B - \dot{m}_{R0}\Delta h_{R0} = 500 \cdot 117830 + 1000 \cdot 2700 \cdot 10^3 - 1500 \cdot 10245 = 2.7435 \cdot 10^6 \text{ J/hod}$$

Spotřeba topné páry: $\dot{m}_P = \frac{Q}{\Delta h_{vyp}} = \frac{2.7435 \cdot 10^6}{2174 \cdot 10^3} = 1262 \text{ kg/h}$

Odpověď: Spotřeba topné páry ve vařáku odparky při zahušťování $\odot$ NaOH je za daných podmínek 1262 kg/h.



5. SDÍLENÍ HMOTY MEZI FÁZEMI

5.1. Uvádění nemísitelných tekutin do vzájemného styku



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- řešit bilanci jednoduchého zařízení s přestupem hmoty
- sestavit bilanci kaskády zařízení pro přestup hmoty
- definovat rovnovážný stupeň a pracovní čáru
- popsat principy aparátů pro soustavy kapalina- plyn/pára/kapalina
- rozumět pojmu součinitel přestupu hmoty a jeho použití



Výklad

Bilanční prvky zařízení pro výměnu hmoty

Často je spřažen směšovač s děličem do jednoho bloku, ze kterého vystupují dva proudy. Všechny vztahy lze shrnout jako

$$m_1 + m_2 = m_3 + m_4$$

$$m_{1A} + m_{2A} = m_{3A} + m_{4A}$$

$$m_{1B} + m_{2B} = m_{3B} + m_{4B}$$

$$m_1 x_{1A} + m_2 x_{2A} = m_3 x_{3A} + m_4 x_{4A}$$

$$m_1 x_{1B} + m_2 x_{2B} = m_3 x_{3B} + m_4 x_{4B}$$

$$x_{1A} + x_{1B} = 1$$

$$x_{2A} + x_{2B} = 1$$

$$x_{3A} + x_{3B} = 1$$

$$x_{4A} + x_{4B} = 1$$

Známe-li všechny údaje o vstupních proudech, pak potřebujeme vyjádřit rovnicemi ještě další dvě doplňující informace o proudech výstupních, stejně jako v případě děliče.

Formálně podobnou soustavu vztahů používáme při popisu destilace; v tom případě je totiž zvykem pracovat s látkovým množstvím a molárními zlomky.



Obr.5.1. Zařízení pro výměnu hmoty

□ Bilance hmotnosti ve směsích s použitím relativních hmotnostních zlomků

V některých případech se určitá významná složka (např. B) pohybuje známým způsobem jen v některých proudech. Příkladem je směšovač podle obr. 5.1., ve kterém proud 2 obsahuje jen složku A; tedy platí $m_{2B}=0$, $x_{2B}=0$. V podobných případech vycházejí pohodlnější výpočetní vztahy, vyjádříme-li složení proudů pomocí relativních molárních zlomků

$$X_{iA} = \frac{m_{iA}}{m_{iB}} = \frac{x_{iA}}{x_{iB}} \quad (5-1)$$

(Relativní hmotnostní zlomky mohou být i větší než 1.)

Vztahy, popisující hmotnostní bilanci směšovače jsou pak odvozeny od hmotnosti proudu B:

$$m_{2B} = 0$$

$$x_{2B} = 0$$

$$m_{1B} = m_{3B}$$

$$m_{1B} X_{1A} + m_2 = m_{3B} X_{3A}$$

$$m_{1B} (1 + X_{1A}) + m_2 = m_{3B} (1 + X_{3A})$$

□ Rovnovážný stupeň

Zajímavějším se to stává v zařízeních pro výměnu kde jsou složky, které známým způsobem procházejí zařízením dvě: B a C. Pozici v bilanci mění jen složka A. Proud, kterým vstupuje nosná složka B označíme číslicí 1; proudem 3 složka B vystupuje. Druhá nosná složka C vstupuje proudem 2 a vystupuje proudem 4.

$$m_{2B} = m_{4B} = 0$$

$$m_{1C} = m_{3C} = 0$$

Pro přenášenu složku A zavádíme relativní jednak hmotnostní zlomek vůči nosné složce B:

$$X_{iA} = \frac{m_{iA}}{m_{iB}} = \frac{x_{iA}}{x_{iB}},$$

jednak vůči nosné složce C:

$$Y_{iA} = \frac{m_{iA}}{m_{iC}} = \frac{x_{iA}}{x_{iC}}.$$

Bilanci můžeme pak založit na známých veličinách

$$m_B = m_{1B} = m_{3B}$$

$$m_C = m_{2C} = m_{4C}$$

a dostaneme pro složku A

$$m_B X_{1A} + m_C Y_{2A} = m_B X_{3A} + m_C Y_{4A}$$

případně pro celkovou hmotnost

$$m_B (1 + X_{1A}) + m_C (1 + Y_{2A}) = m_B (1 + X_{3A}) + m_C (1 + Y_{4A}).$$

Protože výstupní toky nosných složek jsou známe, stačí pro určení výsledku děje ve zmíněném zařízení pro výměnu již jen jediná přídavná informace. Nejjednodušším případem je situace, kdy proudy jsou dostatečně dlouho ve styku, neboť pak může zařízení pracovat téměř jako **dokonalý rovnovážný stupeň**. To znamená, že **proudy vystupující z tohoto stupně (3), (4) jsou** (bez ohledu na složení a množství vstupních proudů 1 a 2) prakticky **ve vzájemné rovnováze**, což se zpravidla dá vyjádřit rovnovážným vztahem ve formě funkce

$$Y_{4A} = f(X_{3A}), \quad (5-2)$$

která závisí jen na stavových proměnných; je nezávislá na konkrétním zařízení a dá se tedy stanovit laboratorně. Existuje řada podmínek, za kterých je to prostá **lineární závislost** s koeficientem úměrnosti k :

$$Y_{4A} = k X_{3A}. \quad (5-3)$$

Lineární vztah (5-3) se dá využít především u absorpcí, kde se dá rozpustnost složky plynu v kapalině zpravidla vyjádřit Henryho zákonem. Složitější to je v případě destilace dvousložkové směsi, kde pracujeme zpravidla v tak širokém rozmezí podmínek, že musíme používat obecnější funkci mezi složením kapalně a parní fáze a není pak výhodou používání relativních koncentračních zlomků. V případě vícesložkové destilace je navíc obsah jedné složky v obou fázích ovlivněn přítomností všech dalších složek směsi. Jednoduchý vztah nenajdeme ani u kapalinové extrakce, kde přenášena složka může za některých podmínek tvořit výrazně tříložkovou fázi. V minulosti se pro řešení látkových bilancí pro tyto účely používaly důmyslné grafické postupy (jeden si ukážeme u dvousložkové rektifikace) avšak numerickému řešení vícestupňových procesů nepůsobí aplikace obecnější funkce žádný problém.

Soustavu formálně podobných vztahů můžeme modifikovat i pro složení látky A vyjádřené pomocí jiných veličin např. molových koncentrací (kmol látky A/kg nosné složky), v případě, že nedochází k významným změnám objemu i (kmol látky A/m³ nosné složky), u plyných směsí to může být také parciální tlak látky A (Pa) atd.

V případě, že platí úměra (5-3), je možné určit složení výstupního proudu 3:

$$X_{3A} = \frac{1}{1 + k \frac{m_C}{m_B}} \left(X_{1A} + \frac{m_C}{m_B} Y_{2A} \right).$$

□ Stupňovité a protiproudé procesy

Z rovnovážného stupně vycházejí proudy v rovnováze, takže jejich zavedení do dalšího rovnovážného stupně již nic nového nevyřeší. Avšak seřazení rovnovážných stupňů do kaskády v níž se proudy pohybují protisměrně (**protiproud**) přináší nové zajímavé možnosti. V kaskádě n stupňů na obr. 5.2. můžeme předpokládat, že bez ohledu na vstupní proudy jsou vystupující proudy z každého stupně ve vzájemné rovnováze. Podle předchozího odstavce mají určitou bilancovatelnou vlastnost X_i vázanou na nosný proud A a B a vlastnost Y_i na proud C. Touto vlastností je např. zde relativní hmotnostní zlomek látky A a předpokládáme **lineární rovnovážný vztah**

$$Y_i = k X_i.$$

(Bilancovanou vlastností ale může být v jiných případech obsah některé konkrétní složky, ale třeba i enthalpie nebo mechanická energie - ve všech případech ale vztahovaná na jednotku hmotnosti nosného proudu.)

Obecný bilanční vztah pro proudy X_i , Y_{i+1} míjející se mezi jednotlivými stupni se pak dá vyjádřit jako **rovnice pracovní čáry**

$$m_B X_i - m_C Y_{i+1} = \text{konst}, \quad (5-4)$$

přičemž tato konstanta se dá určit ze známých nebo požadovaných toků na vstupu a výstupu ze zařízení. Spojením lineárního rovnovážného vztahu a rovnice pracovní čáry vyjde

$$X_i = \frac{k m_C}{k m_C + m_B} X_{i+1} + \frac{m_B}{k m_C + m_B} X_{i-1}$$

Nejzajímavější situace nastane když průtoky nosných proudů právě vyhovují podmínce $k m_C = m_B$. Pak je jednoduše

$$X_i = \frac{1}{2} X_{i+1} + \frac{1}{2} X_{i-1}$$

a na výstupu ze soustavy vychází

$$X_n = \frac{1}{n+1} X_0 + \frac{n}{n+1} \frac{Y_{n+1}}{k}$$

Z toho je zřejmé, že pro velký počet n stupňů kaskády je pak

$$\lim_{n \rightarrow \infty} X_n = \frac{Y_{n+1}}{k}$$

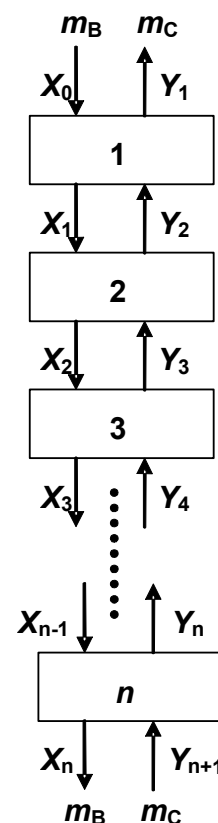
a A ve výstupním proudu B je blízko rovnováze s vstupujícím proudem C.

Podobná situace je na opačné straně kaskády, kde

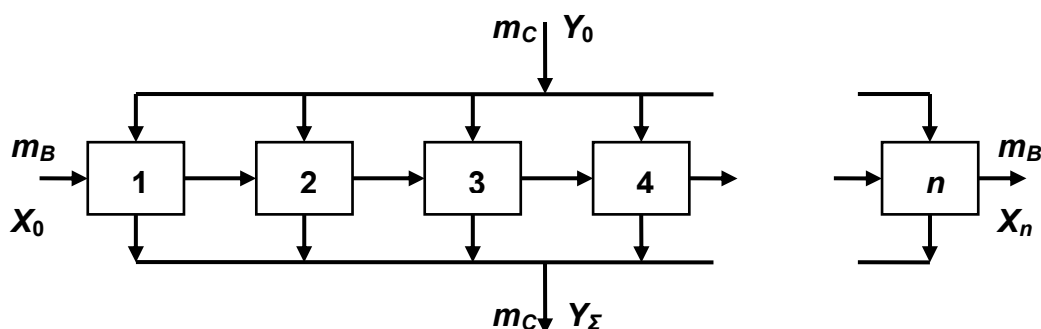
$$Y_1 = \frac{k n}{n+1} X_0 + \frac{1}{n+1} Y_{n+1}$$

a pro velké n je A ve výstupním proudu C blízko rovnováze s vstupujícím proudem B.

V takovémto protiproudém systému si proudy B a C vlastnost A „vymění“.



Obr. 5.2. Kaskáda stupňů výměny hmoty



Obr. 5.3. Křížový tok

Pokud je $k m_C \neq m_B$, přiblíží se i v mnohastupňové protiproudé kaskádě výstupní A rovnováze s vstupním proudem lépe na té straně, kterou vstupuje významnější nosný proud.

Pokud je $k m_C \ll m_B$, převažuje proud B a složení X_i se v sérii stupňů příliš nemění, pokud je $k m_C \gg m_B$, převažuje proud C a složení Y_i se v sérii stupňů příliš nemění. V takových případech jsou výsledky protiproudého nebo souprroudého vedení proudů nepříliš odlišné. Pak se také dá dominantní proud rozdělovat do jednotlivých členů kaskády a styk označujeme jako **křížový**.

Soustavy kapalina- plyn (pára)

Uvádění kapaliny do styku s plynem parami nebo s další nemísitelnou kapalinou je jednou z nejběžnějších součástí procesních technologií. Tekutiny vzájemně kontaktujeme s různými cíli:

- rozpouštění plynu nebo některé z jeho složek do kapaliny (sycení kapalin, absorpce),
- odjímání některé složky kapaliny do plynu (desorpce, stripování, sycení plynu),
- přenos složky z jedné kapalně fáze do druhé (kapalinová extrakce),
- ohřev kapaliny přímou parou,
- chlazení kapaliny odpařováním do proudu plynu,
- výměna tepla mezi nemísitelnými kapalinami,
- přenos tepla mezi parou a kapalinou s kondenzací méně těkavých a odpařováním těkavějších složek (destilace),
- reaktory pro reakce kapaliny s plynem,
- reaktory pro reakce mezi nemísitelnými kapalinami.

Ve všech případech je prospěšné:

- vytvořit dostatečně velkou mezifázovou plochu,
- ponechat dostatečně dlouho obě fáze v kontaktu,
- nakonec obě fáze opět rozdělit,
- případně tento cyklus vícekrát opakovat.

Vedení těchto procesů a užívané aparáty značně závisí na poměru objemů kontaktovaných tekutin. Mnoho z uvedených procesů je výhodné provozovat protiproudě a poměr fází je dán příslušnou technologií a nelze jej zásadně měnit. Jinak je možno některý proud zvětšit recyklováním, což je snazší v případě kapaliny.

Pro kontaktování plyn - kapalina v zásadě existují následující uspořádání:

- probublávaná vrstva kapaliny,
- kapalina dispergovaná do plynu,
- kapalina stékající po stěnách vedle proudícího plynu.

Pro nemísitelné kapaliny jde o podobné soustavy: dispergovaná může být jedna či druhá fáze, méně běžně jsou obě fáze spojitě.

□ Probublávaná vrstva kapaliny

Probublávání kapaliny připadá v úvahu většinou tam, kde kontaktujeme velký objem kapaliny s menšími objemy plynu. Kapalina v nádobě může být vsádka, nebo může nádobou protékat. Plyn se zavádí ke dnu nádoby trubicí nebo rozdělovačem, což může být např. děrovaná trubka nebo pórzní těleso.

Do vsádky roztavené oceli se zavádí kyslík shora chlazenou trubicí nebo zespoda děrovaným dnem, menší množství argonu se přivádí pórzní cihlou.

Při pomalém přivádění plynu stoupá plyn vzhůru přímočaře v jednotlivých bublinách, při zvýšeném přívodu plynu dochází k nestabilitám: bubliny se shlukují do větších pulsujících skupin a spojují se, při velmi vysoké rychlosti proudění se střídavě vytvářejí v kapalině krátery, kterými plyn proráží. Pro charakterizaci pohybu plynu v kapalině se používá **mimovrstvová rychlost** (superficial velocity) $u_0 = V' / S_0$ /(m/s), což je objemový průtok plynu dělený volným průřezem aparátu (bez kapaliny). Podstatný je poměr této rychlosti u_0 k rychlosti u_B vzestupu typických bublin (pro vzduchové bubliny

ve vodě je $u_B \approx 0,25$ m/s). Důležitou veličinou je **zádrž plynu** (gas holdup) ε , což jest objem zachyceného plynu v jednotce objemu směsi (veličina odpovídající porozitě). Pokud je $u_0/u_B < 0,2$, pak platí přibližně $\varepsilon \approx u_0/u_B$ a režim je bublinový.

Při vyšších průtocích plynu nastávají zmíněné nestability a když u_0 překročí hodnotu 1 m/s, dochází k vzniku **pěny**, a dále k **přestřiku**, nejdříve nahodile vzniklých drobných kapek, dále i k systematickému vytváření a strhávání větších kapek plynem.

Podstatnou nevýhodou probublávání je to, že plyn někdy nemá tlak potřebný k překonávání hydrostatického sloupce H /(m), takže je nutné použít přídatných kompresorů. Příkon vynakládaný na probublávání se dá počítat jako

$$P = \rho g H V'$$

Pro protiproudé procesy se dá nastavit nad sebe řada pater, na nichž je zadržována probublávaná vrstva kapaliny; je to typické zařízení pro destilace, a v příslušné kapitole je funkce **patrových kolon** detailně popsána.

□ Kapalina dispergovaná do plynu

Pokud potřebujeme kontaktovat po poměrně krátkou dobu velké množství plynu s malým objemem kapaliny, můžeme pracovat s plynem jako spojitým prostředím a kapalinu do plynu dispergovat. Nejjednodušším zařízením je **sprcha**, v jejichž otvorech se tvoří buďto přímo kapky nebo paprsek kapaliny, rozpadající se na kapky, jejichž bezrozměrová velikost je vlivem tíže a povrchového napětí okolo $Eu \approx 1$, což pro běžné kapaliny odpovídá průměru $d_p \approx 0,001-0,010$ m a následně pádovým rychlostem $u_p \approx 1-10$ m/s. Rozbijeme-li na takové částice proud kapaliny s průtokem V_L /(m/s), vytvoříme za jednotku času k' kapek

$$k' = \frac{6V_L'}{\pi d_p^3}$$

a vytvářená styčná plocha S' /(m²/s) je

$$S' = \frac{6V_L'}{d_p}$$

Doba t kontaktu kapek s plynem je dána u větších kapek při pomalém pohybu plynu charakteristickou dobou pádu $t = h/u_p$, kde h je výška vrstvy plynu od sprchy ke dnu aparátu.

Za cenu většího dodání mechanické energie se dají vytvořit drobné kapénky (sprej, mlha). V různých rozprašovacích tryškách se dodává energie tlakovou kapalinou, na rychle rotujících rotačních rozprašovačích působí odtrhování kapek odstředivá síla, ejektory a Venturiho rozprašovače využívají energie proudícího plynu zúženým hrdlem, kde se prudce snižuje a zvyšuje tlak. K rozprášení kapaliny se dá použít někdy i statická elektřina.

Malé kapičky sedimentují obvykle pomalu a zpravidla jsou unášeny proudícím plynem; doba t styku mezi kapalinou a plynem je dána obvykle trváním postupu od místa vytvoření kapek k místu, kde dochází ke koalescenci kapaliny a k jejímu oddělení od plynu (např. ve vírovém odlučovači - cyklonu). Velké kapky a bubliny při pohybu pulsují a někdy se i štěpí (dělí) a koaleskují (spojují se), čímž obnovují svůj povrch a to je příznivé pro přenos tepla a hmoty. Malé kapičky i malé bublinky se chovají téměř jako tuhé koule, což do jisté míry zhoršuje přestup tepla a hmoty s okolním prostředím. Navíc neochotně koaleskují, takže optimální velikost kapek závisí na konkrétním procesu. S větším objemem plynu je možno také kontaktovat kapalinu v pračkách, ve kterých je rozstříkována kapalina mechanicky. Proces je podobný jako provzdušňování vody na jezích nebo v peřejích. Jednodušší pračka může mít zhruba v úrovni hladiny umístěné míchadlo. Pro soustavu voda-vzduch (např. okysličování v aktivací nádrži čistírny odpadních vod) to může být zařízení otevřené, při praní jiných plynů (např. mokré čištění spalin) se proces odehrává ve skříní, kterou je plyn proháněn..

□ Kapalina stékající po stěnách vedle proudícího plynu

Pokud se setkáme s požadavkem styku velkého množství plynu s kapalinou po delší dobu, staví se vyšší zařízení - **kolony** (column=sloup, sloupec, zástup). V nich se dá pád kapaliny zdržet vhodnou

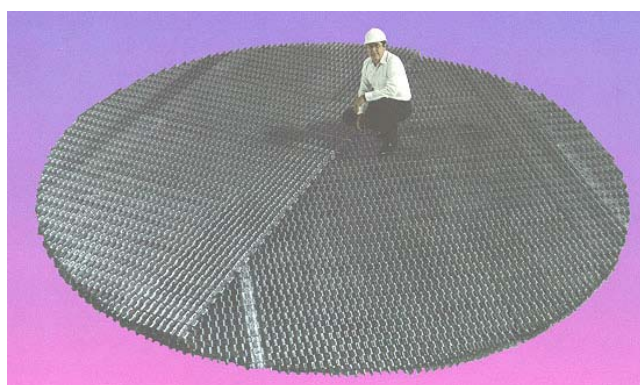
náplní (nasypané nebo naskládané částice) nebo **výplní** (strukturovaná konstrukce, vložená do prostoru) Náplň, je tvořena klasicky jednotlivými naskládanými nebo nasypnými keramickými, kovovými nebo plastovými **tělísky** (Obr. 5.4.). Složitý tvar tělísek je volen tak, aby se zadržovalo více kapaliny a má zajistit, že se tělíska nesloží tak, aby umožňovaly vytvoření volných průchodů v některé části průřezu a ucpané průchody v jiných částech průřezu. Velmi účinné moderní **orientované výplně** jsou sestaveny z vrstev nejčastěji naskládaných z tvarovaných vlnitých kovových nebo plastových prvků (Obr. 5.5.-5.6.). I zde je hlavním požadavkem, aby plyn nebo pára procházely výplní co možno s malou tlakovou ztrátou, a přitom aby stékající kapalina byla na výplni co možno dlouho zadržována, aby se po výplni co možno rovnoměrně roztékala a aby nedocházelo k jejímu slévání do praménků, což by



Obr. 5.4. Klasická tělíska náplní
Sedla Intalox, Pall kroužky
Rashigovy kroužky, Berlova
sedla



Obr. 5.5. Orientovaná výplň Mellapak -
malý rozměr



Obr. 5.6. Vrstva orientované výplně
pro velkou průmyslovou kolonu

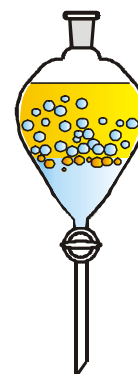
zanechávalo část výplně suchou.

Z hydrodynamického hlediska je spojitým prostředím jak kapalina, stékající po prvcích plněné kolony tak i plyn, proudící okolo buďto protiproudě nebo souproudě. Pro přestup je významné obnovování mezifázového povrchu při rozdělování a spojování stékajících praménků kapaliny.

Použití plněných kolon vypadá jako jednoznačně výhodné, pokud se uvedený režim dá s danými průtoky kapaliny a plynu realizovat. Průřez kolony se totiž musí volit tak malý, aby celý povrch náplně/výplně byl co možno dobře kapalinou smočen. Pro rovnoměrné smočení menším průtokem kapaliny je důležité její rozdělení na náplň; k tomuto cíli jsou konstruovány důmyslné rozdělovače. Aby nedošlo ke spojení proudu kapaliny do jediného pramene a k ponechání části výplně suché, přerušuje se sloupec výplně ve vysokých kolonách občas dalším rozdělovačem kapaliny. Pro plyn je zase výhodnější větší průřez; aby mimovrstvová rychlost plynu nepřesáhla jistou kritickou rychlost, při které dojde k **zahlcení**. Při zahlcení je stékající kapalina protiproudem plynu zdržována totiž natolik, že uzavírá volný prostor kolony, až zde vzniká vzhůru tažená pěna; navenek se to projeví výrazným vzrůstem odporu proudění plynu a zhoršením protiproudého styku kapaliny s plynem vlivem podélného promíchávání.

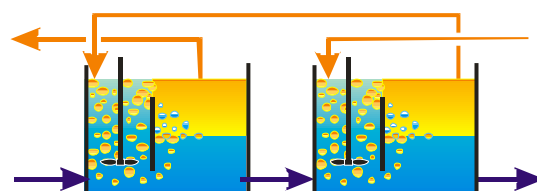
□ Kontaktování nemísitelných kapalin

Dvě nemísitelné nebo omezeně mísitelné kapalné fáze kontaktujeme proto, abychom některou jejich složku převedli do druhé fáze. Je to běžná operace při čištění organických látek (např. vypírání kyselin do vody z nitrobenzenu po nitraci), v technologii paliv (např. odsolování ropy vodou, starší způsob rafinace vyjetých olejů kyselinou sírovou), ale i v hydrometalurgii (např. zachycování kationtů těžkých kovů do organických komplexů). Pro účinný přestup hmoty je dobré vytvořit větší



Obr. 5.7. Dělicí
nálevka

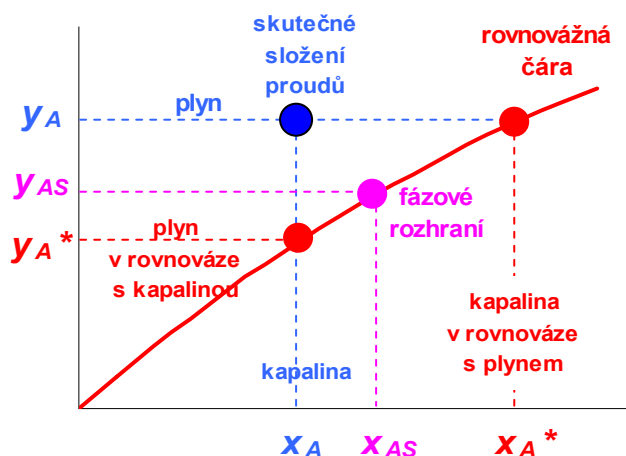
plochu rozptýlením jedné kapaliny v druhé. Protože po kontaktování musí následovat etapa oddělení fází, musí mít fáze rozdílnou hustotu a není také žádoucí vytvářet mikroskopické nebo nanometrické koloidní kapky, které by se usazovaly pomalu. V laboratoři vytváříme disperzi L-L obvykle třepáním v nádobě s kuželovým sedimentačním dnem, opatřeným výpustním kohoutem. Ve velkém vytváříme disperze míchadly rotujícími nebo vibrujícími. To zda vznikající typ kapek je typu „olej ve vodě“ nebo „voda v oleji“ je nejvíce ovlivněn objemovým zastoupením fází v blízkosti míchadla. Chceme-li dispergovat lehčí fázi, umístíme míchadlo pod rozhraní kapalin, chceme-li dispergovat těžší fázi, umístíme míchadlo nad rozhraní do lehčí fáze. Zatímco v laboratoři následuje usazování časově po etapě míchání, v provozu se proces vede obvykle kontinuálně a tekutiny (zpravidla protiproudě) protékají řadou dvojic **míšič-usazovák** (mixer-settler). Kontaktování nemísitelných fází je podstatné i pro reakce roztaveného kovu se struskou. Avšak zařízení pro vysoké teploty musí být co možno jednoduchá – bez pohyblivých součástí jakými jsou míchadla a čerpadla: k promíchávání se zde využívá probublávání plynem nebo přelévání.



Obr. 5.8. Dvojice míšič-usazovák, zapojená protiproudě

Přestup hmoty mezi tekutými fázemi

Jestliže složka A přechází mezi plynem a kapalinou (nebo mezi nemísitelnými kapalinami), je podstatná znalost rovnovážné závislosti. Je to závislost veličiny y_A , charakterizující obsah A v plynu na obsahu x_A v kapalině. Obecně to můžeme vyjádřit podle okolností pomocí hmotnostních, látkových, molárních koncentrací nebo zlomků nebo některého typu relativních koncentrací. Ve fyzikální chemii se často použijí pro kapalinu aktivity a pro plyn parciální tlaky nebo fugacity. Leží-li průsečík údaje pro plyn a pro kapalinu v uvedeném typu grafu (obr.5.9.) nad rovnovážnou čarou, pak dojde k toku složky A z plynu do kapaliny. Leží-li pod rovnovážnou čarou, bude A přecházet z kapaliny do plynu. Fázovému rozhraní bude příslušet dvojice x_{AS} , y_{AS} na rovnovážné čáře.



Obr 5.9. Koncentrační poměry dvou fází na styku

Tok hmoty n_A' / (mol s⁻¹) mezi tekutinou a fázovým rozhraním bude úměrný mezifázové ploše S a hnačí síle. Konstantou úměrnosti v jednotlivých fázích jsou **součinitele přestupu hmoty** k_L , k_G .

V kapalně fázi tedy je

$$n_A' = k_L S (x_{AS} - x_S), \quad (5-5)$$

v plynné fázi je

$$n_A' = k_G S (y_A - y_{AS}). \quad (5-6)$$

Pokud označíme směrnici rovnovážné čáry v dané oblasti

$$m \equiv \frac{dy^*}{dx^*}, \quad (5-7)$$

pak můžeme vyloučit neznámé podmínky na rozhraní a platí

$$n'_A = \frac{S(x_A^* - x_A)}{\frac{1}{k_L} + \frac{1}{m k_G}} = \frac{S(y_A - y_A^*)}{\frac{m}{k_L} + \frac{1}{k_G}}. \quad (5-8)$$

Součinitele přestupu hmoty závisejí (podobně jako součinitele přestupu tepla) na hydrodynamických poměrech (Reynoldsova čísla) a na vlastnostech tekutin. Rovněž **mezifázová plocha** S se mění s hydrodynamickým režimem v zařízení. Oddělení příslušných vlivů na k_L , k_G a S není jednoduché a proto se nakonec většinou uchylujeme k zápisu

$$n'_A = K_L a V (x_A^* - x_A), \quad (5-9)$$

ve kterém **objemový součinitel přenosu hmoty** $K_L a$ (obecně nazývaný kej-el-ej, česky **ká-el-á**) je

$$K_L a \equiv \frac{a}{\frac{1}{k_L} + \frac{1}{m k_G}}, \quad (5-10)$$

kde a je **specifická mezifázová plocha**

$$a \equiv \frac{S}{V}. \quad (5-11)$$

Dá se předpokládat, že při zachování režimu proudění bude i veličina a málo závislá na velikosti zařízení. $K_L a$ závisí především na měrném příkonu P/V , dodávaném do jednotky objemu zařízení pro kontaktování tekutin, přičemž do příkonu zahrnujeme energii dodávanou míchadly, čerpadly i kompresory.

Pokud složení x_L vyjádříme v mol/m³ a n'_A v mol/s, bude mít $k_L a$ rozměr s⁻¹ (stejnou číselnou hodnotu i rozměr bude mít když x_L vyjádříme v kg/m³ a n'_A v kg/s). Při běžném intenzivním kontaktování s měrným příkonem $P/V \approx 1000$ W/m³ dosahuje $K_L a$ hodnot 0,1-0,2 s⁻¹. I při velmi bouřlivém kontaktování většinou zůstává $K_L a < 1$ s⁻¹.

Součinitel $K_L a$ dává do vztahu složení na obou stranách fázového rozhraní s tokem hmoty. Ze známého toku hmoty pak můžeme dopočítat, jak stoupá koncentrace složky A na jedné straně a jak klesá koncentrace A na straně druhé. To je zajímavé především u protiproudého uspořádání. Pripustíme-li že $K_L a$ je konstantní a známé, můžeme počítat přestup hmoty v příslušném „výměníku hmoty“ podobným postupem jako při výpočtu tepelného výměníku s konstantním součinitelem průchodu tepla.



Pojmy k zapamatování

Rovnováha, rovnovážný stupeň

Protiproudá kaskáda, křížový tok

Probublávání, zádrž plynu, přestřík, patrová kolona

Plněná kolona, náplň, výplň, zahlcení

Soustava mísič – usazovák

Součinitel přestupu hmoty, objemový součinitel přenosu hmoty

Mezifázová plocha, specifická mezifázová plocha

5.2. Dvofázové soustavy kapalina – pára. Destilace



Čas ke studiu: 5 hodin



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- vyjádřit vzorcem a grafem rovnováhu mezi kapalinou a parou
- popsat základní proudy při jednoduché destilaci a provést bilanci
- vysvětlit význam opakované destilace - rektifikace
- vymezit, mezi kterými proudy platí rovnováha a kde rovnice pracovní čáry
- charakterizovat destilační zařízení a popsat jeho hlavní prvky



Výklad

Destilace je postup dělení směsí těkavých kapalin nebo kondenzovatelných par na základě rozdílné těkavosti. Založena je na skutečnosti, že ze směsi kapalin se přednostně odpařuje **těkavější složka**, ze směsi par přednostně kondenzuje **méně těkavá složka**. Opakovaným varem a kondenzací je možno získat složky ve vysoké čistotě. Destilace je jedním z nejvýznamnějších postupů dělení látek, v obrovském rozsahu provozovaná zejména v petrochemii a průmyslové organické chemii, ale běžně užívaná i v laboratoři.



Obr. 5.10. Destilační kolony, klíčové aparáty rafinerie (Kralupy n/Vlt.)

Fyzikálně chemický základ: rovnováha kapalina – pára

Tenze par čisté i -té složky je funkcí teploty $p_i^0(T)$. Inverzní funkcí $k p_i^0(T)$ je závislost teploty varu na tlaku $T_v(p)$.

Vztah mezi tlakem a teplotou při rovnováze mezi kapalinou a parou je možno odvodit z Clausius-Clapeyronovy rovnice. V menším rozmezí se dá podle ní předpokládat, že logaritmus tlaku (číselné hodnoty tlaku ve zvolených jednotkách) klesá úměrně s reciprokou teplotou; pro většinu látek se dají data úspěšně popsat trojkonstantovým vztahem, nazývaným Antoinova rovnice

$$\log p^0 = A - \frac{B}{t + C} \quad (5-12)$$

Raoultův zákon: Parciální tlak složky v parách je součinem její tenze par a molárního zlomku v kapalině

$$p_i = p_i^0 x_i \quad (5-13)$$

Platnost Raoultova zákona je omezena na určitý typ ideálních kapalných směsí; neplatí pro nemísitelné a omezeně mísitelné kapaliny, nehodí se ani pro směsi vzájemně reagujících kapalin.

Daltonův zákon: Molární zlomek v páře

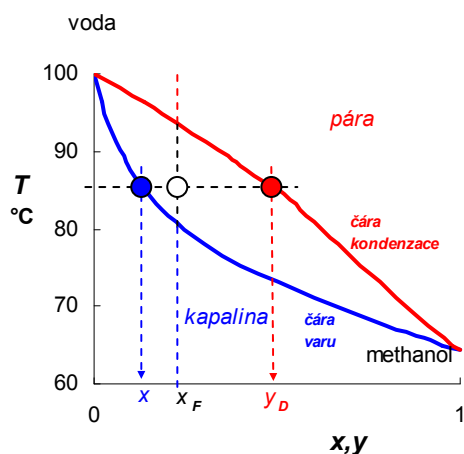
$$y_i = p_i / p \quad (5-14)$$

Daltonův zákon platí přesně pro směs ideálních plynů, ale je i jindy dobrým přiblížením.

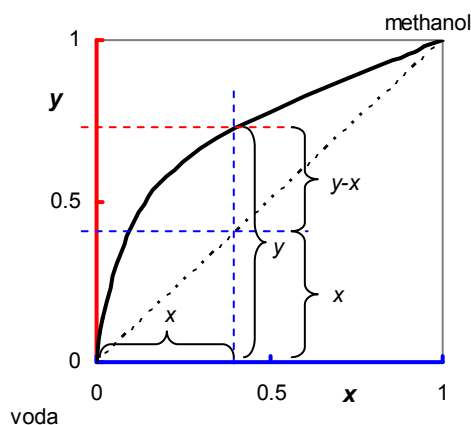
Pro dvousložkovou směs můžeme vynechávat indexy při využití následujícího pravidla:

jako x , y označujeme molární zlomek těkavější složky (složky s nižší teplotou varu), odpovídající molární zlomek méně těkavé složky jsou potom $(1-x)$, $(1-y)$.

Při **zadaném celkovém tlaku** je možno poměry ve dvousložkové směsi popsat pomocí **grafu T - x,y** (viz obr. 5.11.), v němž v souřadnicích složení-teplota vyznačujeme hranice fázového chování. Typicky je to **čára varu $T(x)$** a **čára kondenzace $T(y)$** . Odtud můžeme odečíst, v jakém skupenství je při dané teplotě směs o daném výchozím složení x_F . Pokud teplota je pod čarou varu, je směs kapalná (výjimečně i pevná), nad



Obr. 5.11. Rovnováha kapalina-pára pro směs methanol-voda při normálním tlaku.



Obr. 5.12. y - x diagram pro směs methanol-voda při normálním tlaku.

čarou kondenzace je to pára. Padne-li teplota mezi tyto hranice, rozdělí se původní množství n_F (mol) na n_D páry o složení y_D a n_W kapaliny o složení x_W .

Z celkové látkové bilance

$$n_F = n_W + n_D,$$

a z bilance těkavější složky

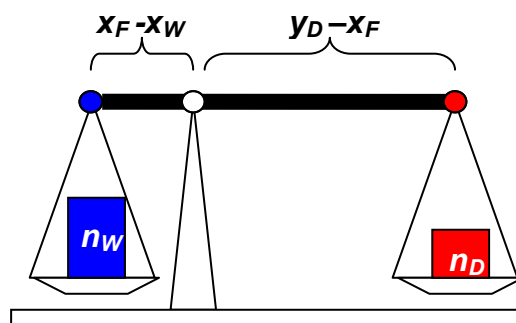
$$n_F x_F = n_W x_W + n_D y_D \quad (5-16)$$

vyplývá pákové pravidlo

$$\frac{n_D}{n_W} = \frac{x_F - x_W}{y_D - x_F} \quad (5-17)$$

jako bychom vyvažovali tato množství na nerovnoramenné páce; tedy množství vzniklých fází jsou v obráceném poměru příslušných vzdáleností.

Pro účely posuzování destilace nepotřebujeme často bezprostřední informaci o teplotě. Pak stačí rovnováhu vyjádřit jako funkci $y(x)$. Typickým je grafické vyjádření ve formě čtvercového **diagramu y - x** (viz obr. 5.12.).



Obr. 5.13. Pákové pravidlo

Svislá vzdálenost křivky y - x od úhlopříčky odpovídá při rovnováze rozdílu $(y - x)$ a vypovídá o snadnosti dělit směs destilací.

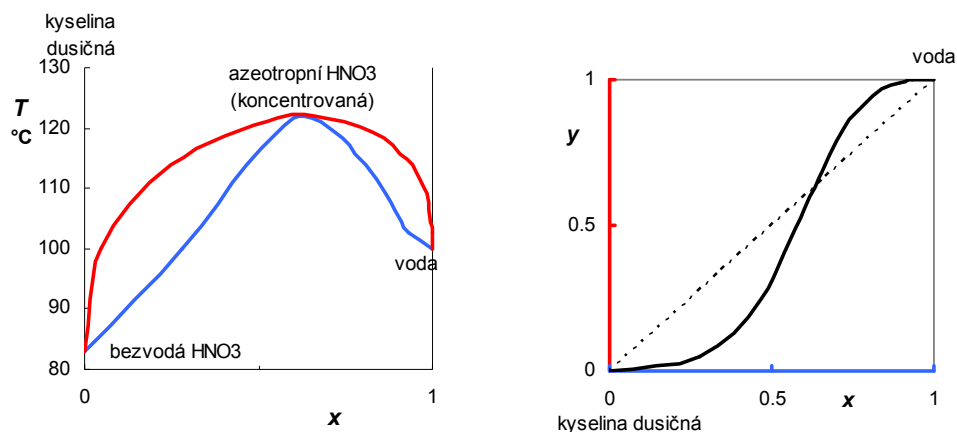
Pro ideální směsi je možno konstruovat y - x diagramu na základě předpokladu o konstantnosti **relativní těkavosti** α , definované vztahem

$$\alpha = p_1^0 / p_2^0$$

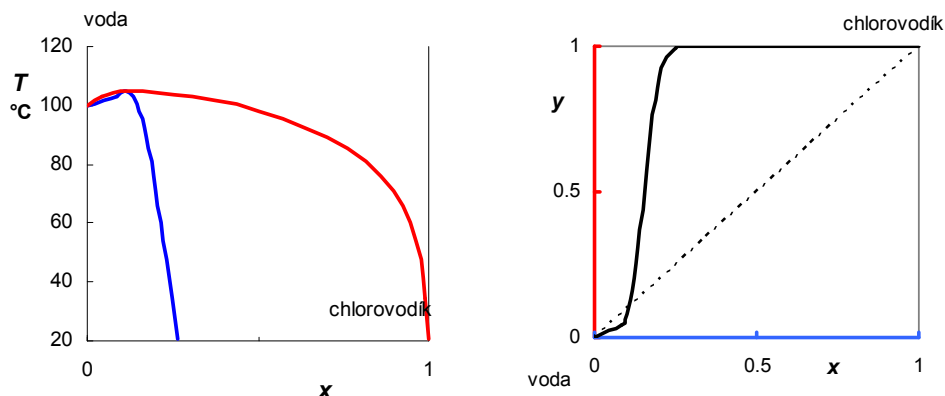
a přidáme-li Daltonův a Raoultův zákon, dostaneme

$$y = \frac{\alpha x}{1 - x + \alpha x} \quad (5-18)$$

Bohužel, mnoho systémů se chová tak neideálně, že předpoklad konstantního α je jakž-takž přijatelný jen v úzkém rozmezí složení a jinak vede ke značným chybám. Hodí se ale dobře pro dvojice podobných



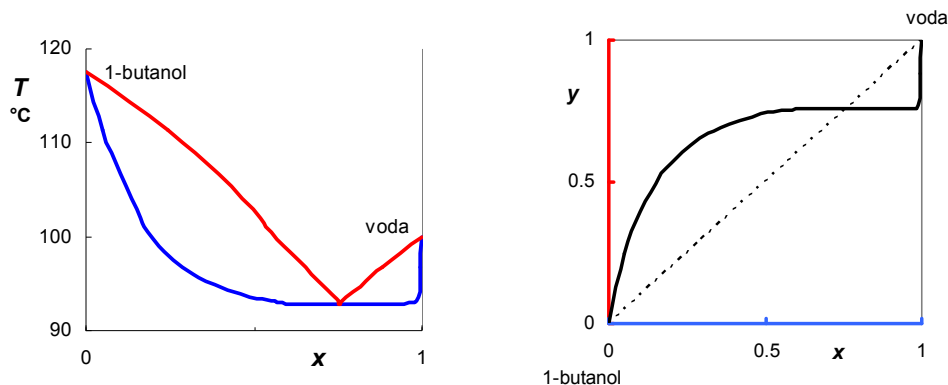
Obr. 5.14. Rovnováha kapalina-pára pro směs, tvořící azeotrop s nejvyšší teplotou varu. Azeotropní („koncentrovaná“) kyselina dusičná obsahuje při normálním tlaku 68% hm. HNO_3 . Při destilaci podazeotropní HNO_3 pára obsahuje více H_2O , nadazeotropní HNO_3 se dá získat např. sycením kyseliny oxidy dusíku při zvýšeném tlaku. Za normálního tlaku z ní obráceně oxidy dusíku odcházejí v parách. V každém případě se při destilaci složení kapaliny posunuje k azeotropu.



Obr. 5.15. Rovnováha kapalina-pára pro směs, tvořící azeotrop s nejvyšší teplotou varu. Při destilaci se složení páry posunuje k příslušné čisté složce, složení kapaliny k azeotropu.

nepolárních uhlovlků – např. pro alkany nebo pro směsi jako benzen-toluen. Vysokou relativní těkavost zhruba $\alpha=10$ má směs amoniak – voda, relativní těkavost blízkou jednotce má například směs pyridin – ethanol, čehož se využívá k přípravě nepříjemně páchnoucího denaturovaného lihu k pálení, prakticky nerafinovatelného destilací.

□ Azeotropní směsi



Obr. 5.16. Rovnováha kapalina-pára pro směs, tvořící azeotrop s nejnižší teplotou varu. Při destilaci se složení páry posunuje k azeotropu, složení kapaliny k příslušné čisté složce.

Značně neideální směsi – obvykle tvořené látkami, jejichž molekuly tvoří mezi sebou vazby vodíkovými můstky nebo jinými chemickými či fyzikálně chemickými mechanismy – se někdy dokonce projevují jako **azeotrop** – směs s lokálním extrémem teplot varu. Pro minerální kyseliny je běžnější azeotropní směs o vyšší teplotě varu (sem patří třeba vodné roztoky 20 % (hm.) HCl (Obr. 5.15.), 98 % (hm.) H_2SO_4 , 68 % (hm.) HNO_3 (Obr. 5.14.)). Varem těchto kyselin zředěných se uvolňuje spíše vodní pára, varem nadazeotropních kyselin se uvolňují v uvedených případech plynné produkty: HCl, SO_3 (dýmavý aerosol), NO_2 a O_2 .

V organické chemii se setkáváme často s azeotropní směsí o nižší teplotě varu (viz obr. 5.16.) než mají čisté složky (např. 96 % ethanol ve vodě). Varem těchto látek se uvolňuje pára složení bližšího k azeotropu.

□ Vliv tlaku

Změnami tlaku se průběh rovnováhy kapalina – pára, vyjádřený grafem y - x kvalitativně příliš nemění. Někdy je významnou i malá změna, např. se změnou tlaku dá o něco posunout poloha azeotropu a dostaneme se tudy na jeho druhou stranu.

Zvýšením tlaku můžeme třeba u směsi voda – kyselina dusičná posunout složení azeotropu a dostat se z oblasti zředěné HNO_3 do oblasti, jejíž destilací již získáme jako destilační zbytek bezvodou HNO_3 .

Významnější je vliv tlaku na teplotu varu a obvyklým zájmem je snížení teploty varu jednak z důvodů úspor energie použitím levnějšího tepelného zdroje a omezení ztrát tepla do okolí, jednak je to podstatné tam, kde dělená směs je citlivá na vyšší teplotu. V takovém případě snižujeme tlak v zařízení – proces nazýváme destilace **vakuová**. Destilaci při běžném tlaku nazýváme **atmosférická**. **Tlakovou** destilaci budeme volit spíše tam, kde teplota varu je hluboko pod běžnou teplotou (např. při destilaci kapalného vzduchu).

Dělení směsi destilací

Z grafů T - x , y nebo y - x můžeme odečíst, jak se od sebe liší složení kapaliny a páry v rovnováze. Této skutečnosti můžeme využít pro získávání směsí o změněném složení. Idealizované zařízení, ve kterém se dosáhne úplné rovnováhy, označujeme jako **rovnovážný stupeň**. Z grafů můžeme také odhadnout, kolikrát musíme takový postup opakovat (kolik musíme mít rovnovážných stupňů) abychom dostali produkty požadovaného složení. Proces, kde využíváme k dělení směsi rovnováhy mezi kapalinou a parou je **destilace**, která může být jednoduchá (jeden rovnovážný stupeň). Opakovaná destilace, využívající řady rovnovážných stupňů, se říká též **rektifikace**.

□ Balance destilace

Při destilaci se sleduje **balance celková**, **balance těkavější složky** a **balance tepla**. Bilanci zde provádíme obvykle v látkových množstvích - to jednak reflektuje Raoultův a Daltonův zákon, jednak to zjednodušuje tepelnou (energetickou) bilanci, protože **molární výparná**

tepla jsou pro podobné látky blízká – pak totiž odpaření jednoho molu těkavější složky je doprovázeno kondenzací jednoho molu méně těkavé složky – bez výměny tepla celková látková množství páry i kapaliny zůstávají konstantní.

Proudy v destilaci nazýváme **nástřík** (množství n_F , složení x_F) a nejčastěji se přivádí jako kapalina při teplotě varu. Není to nutnou podmínkou a dokonce nejdůležitější destilační proces – atmosférické dělení ropy – obvykle nástříkuje surovinu již přeměněnou z větší části na páru.

Zbytek (n_W , x_W) je kapalina ochuzená o těkavou složku, **destilát** (n_D , y_D) je pára obohacená těkavou složkou.

$$\text{Celková balance} \quad n_F = n_W + n_D, \quad (5-19)$$

$$\text{balance těkavější složky} \quad n_F x_F = n_W x_W + n_D y_D, \quad (5-20)$$

$$\text{balance tepla} \quad Q = n_D \Delta H_{\text{vyp}}. \quad (5-21)$$

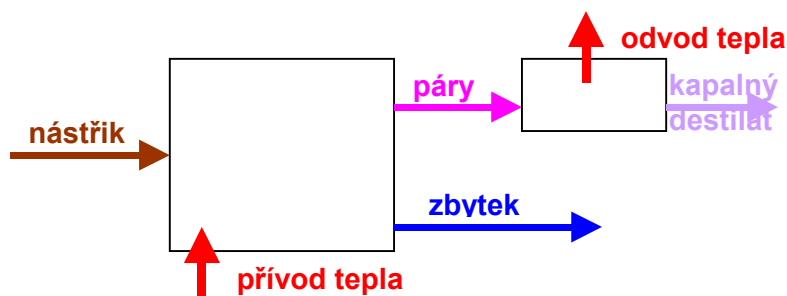
Q je množství tepla potřebné na vytvoření páry a rovná se teplu, které je nutno odvést při kondenzaci destilátu, ΔH_{vyp} je **molární výparné teplo**. Skutečnost, že molární výparné teplo je pro mnoho tekutin, které destilací dělíme, přibližně stejné, umožňuje využívat podstatně zjednodušit bilanční výpočty.

Přívod tepla – část nazývaná **vařák** – viz var, odparky. Kotel, topení pláštěm a trubkami s teplou vodou, parou, tlakovou parou, parami vysokovroucích kapalin (oblíbené jsou dekaliny a směsi podobně stabilních uhlovodíků). V rafineriích se často používá i ohřev spalnými plyny (kapalina je uvnitř trubek, procházejících topeništěm pece).

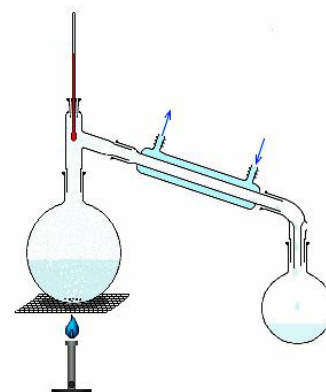
Odvod tepla – **kondenzátor** – viz kondenzace. Kondenzátor je u destilace zařazen, abychom odvedli teplo a získali destilát kapalný. Obvykle je uspořádán jako trubkový výměník, uvnitř svazku trubek proudí chladicí voda. Pro vysoké teploty postačuje chlazení vzduchem; kondenzace pak probíhá uvnitř trubkovnice. Vně bývá nucená konvekce vzduchu ventilátorem, nestačí-li samotná konvekce volná.

□ Jednoduché destilace:

Jednoduché destilace se snaží vytvořit v daném zařízení podmínky pro ustavení rovnováhy kapalina – pára. Ideální zařízení nebo jeho část, ze které vystupují proudy v rovnováze, je právě rovnovážný stupeň. Na základě znalosti rovnováhy kapalina - pára můžeme určit, jaká složení budou mít dvousložkové směsi v kapalině a páře, odcházejících z rovnovážného stupně.



Obr. 5.17. Bilanční proudy při jednoduché destilaci



Obr. 5.18. Laboratorní diferenciální destilace

Diferenciální destilace – do vařáku předložen nástřík, postupně se přivádí teplo a průběžně odvádí destilát. Složení destilátu $y_D(t)$ závisí na čase ale v každém okamžiku je v rovnováze se složením zbytku $x_W(t)$. V průběhu děje ubývá zbytku a mění se jeho složení. Bilance pro daný okamžik

$$d n_D / dt = -d n_W / dt = (dQ/dt) / \Delta H_{vyp} \quad (5-22)$$

$$\frac{d(n_W x_W)}{dt} + y_D \frac{d n_D}{dt} = 0 \quad (5-23)$$

Na počátku odchází destilát nejtěkavější - v rovnováze s x_F , postupně koncentrace odcházejícího destilátu klesá. Je možno odebírat v čase postupně méně a méně těkavé frakce. Při úplném oddestilování by smíšené destiláty měly opět složení nástříku.

Mžiková (flash) destilace je zvláštní případ, kdy enthalpii pro fázovou přeměnu si v nějaké formě přináší přímo nástřík a k vytvoření nové fáze dochází změnou podmínek na vstupu do destilačního aparátu (například uvolněním tlaku).



Obr. 5.19. Diferenciální destilace (ilegální pálení lihovin)

Jednoduchá nepřetržitá rovnovážná destilace – současně přiváděn nástřík a teplo a odváděn destilát a zbytek tak, že nedochází k akumulaci. Složení destilátu y_D je v rovnováze se složením zbytku x_W . Máme zde 3 rovnice bilance + 1 rovnice rovnováha $\rightarrow$ 4 neznámé n_D, n_W, x_W, y_D .

□ Opakovaná vícestupňová destilace – rektifikace



Obr. 5.20. Opakovaná destilace. Křivule sloužila jako dvojice vařák- kondenzátor.
John French The art of distillation, London 1651

Pro opakování destilace nemusíme mít pro každý rovnovážný stupeň vlastní vařák a kondenzátor (jako na historickém dřevorytu, obr.5.20.), protože při seskupení jednotek do sloupce (kolony) může chlazení obstarávat shora stékající kapalina (zpětný tok, reflux) a ohřev zdola postupující pára.

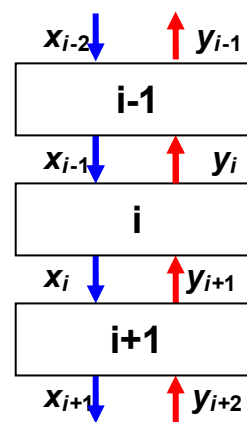
Destilace v kolonách – **Kolona** má funkci řady destilačních stupňů, pracujících jako rovnovážné stupně.

Jsou seřazeny nad sebou tak, že pára postupuje nahoru a kapalina stéká dolů. V této práci se budeme držet pravidla českých učebnic, kde se stupně číslují shora dolů.

Americkou zvyklostí je číslovat stupně odspodu; při přebírání vztahů z literatury je nutno užívanou konvenci sledovat!

Z i -té jednotky odchází vzhůru $n_{V,i}$ molů páry o složení y_i ; dolů stéká $n_{L,i}$ molů kapaliny o složení x_i . Do i -té jednotky natéká shora $n_{L,i-1}$ molů kapaliny o složení x_{i-1} ; zdola sem vstupuje $n_{V,i+1}$ molů páry o složení y_{i+1} . V rovnovážném stupni je složení odcházejících proudů y_i, x_i takové, že představuje právě jeden bod na rovnovážné křivce.

Proces je hnán teplem, dodávaným do vařáku, který je posledním destilačním stupněm. Zde se kapalina zčásti přeměňuje v páru, vstupující do paty kolony. Odpovídající teplo se odvádí z kondenzátoru, kde se pára přeměňuje na kapalinu. Pro posouzení dělicí schopnosti kolony je výhodné uvažovat podmínky **úplného zpětného toku**.



Obr. 5.21. Složení proudů v destilačních

a s tímto zjednodušením již není třeba bilanci tepla v jednotlivých rovnovážných stupních počítat. Pára, odcházející z **hlavy kolony** (vrch horní části), se zpravidla zcela zkondenzuje odvedením tepla z kondenzátoru a vzniklá kapalina se dělí na destilát n_D a na zpětný tok $n_{L,0}$ kapaliny do hlavy kolony. Podíl

$$R = n_{L,0}/n_D \quad (5-25)$$

nazýváme poměr zpětného toku (refluxní poměr) kolony.

Při úplném zpětném toku se neodebírá destilát, takže $n_D=0$ a $R=\infty$.

Tok kapaliny kolonou dolů je pak roven v celé obohacovací části:

$$n_{L,i} = n_{L,0} = R n_D \quad (5-26)$$

a v ochuzovací části kde se přidá nástřík:

$$n_{L,i} = R n_D + n_F \quad (5-27)$$

Jaké jsou odpovídající hodnoty složení potkávajících se proudů, vyplývá z jednoduché bilance, vyjádřené rovnicí, nazývanou **rovnice pracovní čáry**. Existují dvě rovnice pracovní čáry, které vyplývají z bilancí částí kolony, znázorněných na obr. 5.24. V jednoduchém případě konstantního látkového toku kolonou (obr. 5.24) jsou graficky reprezentovány v y - x diagramu pro obohacovací část přímkou

$$y_i = \frac{R}{R+1} x_{i-1} + \frac{1}{R+1} y_D \quad (5-28)$$

a pro ochuzovací část

$$y_i = \frac{n_V + n_w}{n_V} x_{i-1} - \frac{n_w}{n_V} y_D \quad (5-29)$$

Čím budeme více destilátu odebírat, tím více musíme současně zvyšovat zpětný tok, abychom udrželi dané dělení. Při zadaném množství n_D destilátu, který máme v procesu získat, lze kvalitu dělení zlepšovat obecně zvýšením **refluxního poměru** (zpětný tok/destilát), což znamená zvětšení průtoku par z hlavy kolony $n_{V1} = n_{L0} + n_D$ a díky tomu také zvýšenou potřebu energie na **chlazení v kondenzátoru**, ale i na **ohřev ve vařáku**.

Jsou-li k dispozici složitější fyzikálně-chemická data o rovnováhách kapalina-pára a o molárním výparném teple ΔH_{vyp} , pak se musí řešit zpřesněná bilance individuálně pro každé patro, pro což existují algoritmy v balících simulačních programů.

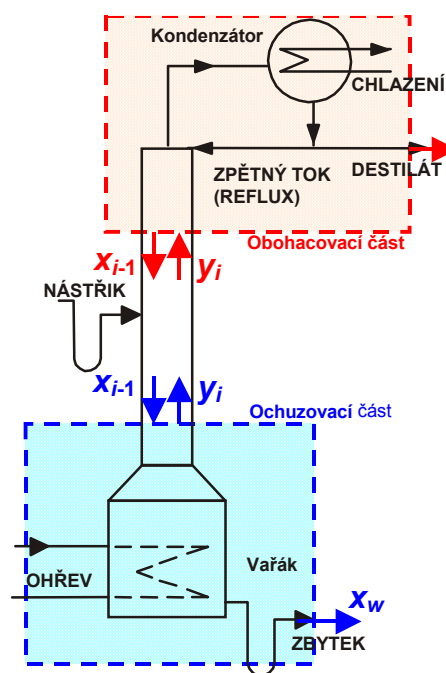
□ Vícesložková destilace – frakční destilace

Obsahuje-li nástřík více složek, budou v koloně těkavější složky nahoře (nižší teplota varu) a méně těkavé dole (vyšší teplota varu). Středně těkavé složky se budou stahovat do oblastí, odpovídající jejich teplotám varu a bude odtud možno odtahovat frakce, bohaté na tyto složky.

Typickým příkladem je první destilace ropy, poskytující z různých míst kolony např. lehké benzíny, benzin, petrolej, lehké oleje, těžké oleje a mazut.

Pro získání jednotlivých čistých složek pak každou z těchto frakcí podrobujeme další destilacím.

Jiným příkladem je destilace kapalného vzduchu, kde se těkavější dusík dostává v destilátu, méně těkavý kyslík ve zbytku a z prostředku kolony se odtahuje směs bohatší středně těkavým argonem.



Obr. 5.24. Bilanční systémy pro odvození rovnice pracovní čáry

Destilační kolony představují v organických technologiích a v petrochemii investičně i provozně nejnáročnější zařízení. Popis vícesložkových destilací je méně názorný, jeho zpracování vyžaduje kvalitní fyzikálně chemická data; Výpočty jsou sice poměrně jednoduché, díky rozsáhlosti jsou však pracné. I pro jsou dnes ně vypracovány příslušné algoritmy.

Destilační kolona jako zařízení

Destilační kolona je speciálním typem zařízení pro protiproudé uvádění kapaliny do styku s plynem. Prakticky stejného typu aparátů se používá i pro absorpce (dělení plynných a kapalných směsí na základě různé rozpustnosti plynů v kapalinách), případně pro absorpce s chemickou reakcí – reaktory kapalina plyn.

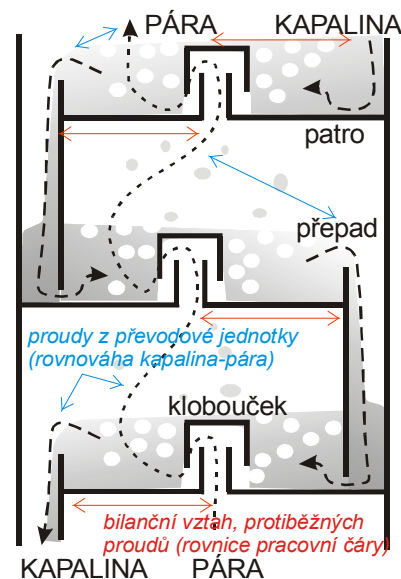
Největší průmyslové destilační kolony dosahují průměru okolo 6 m a výšek okolo 80 m.

Existují dvě koncepce kolon – kolony patrové a kolony plněné (náplňové, výplňové).

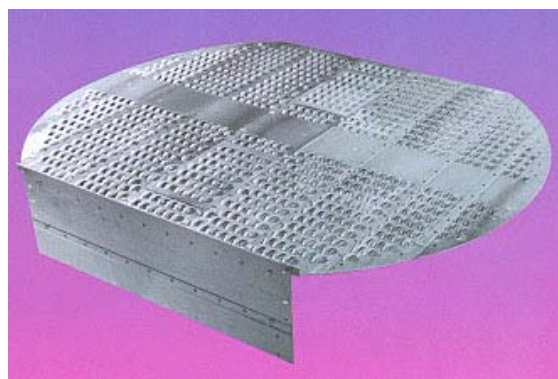
□ Patrové kolony

Zde se realizují rovnovážné stupně jako patra, na kterých se postupující pára zavádí do zadržované kapaliny, aby ve vzniklé pěně co možno došlo k ustavení rovnováhy mezi nimi. Potom musí být pěna zpět rozdělena, aby vzniklá kapalina stékala přepadem dolů (bez bublinek páry) a vzniklá pára vzhůru (bez kapek kapaliny). Patra jsou desky s průchody pro páru, na kterých je hydrostatickými a hydrodynamickými silami zadržováno určité množství pěny. Klasická patra se spoléhala převážně na hydrostatické síly a bývala opatřena **kloboučky**, dovolujícími jen průchod páry vzhůru a přepadovou šachtou, dovolující jen odtok kapaliny na nižší patro. Funkce tohoto zařízení, znázorněného na obrázku, je jednoduše pochopitelná. Kloboučková patra pracují spolehlivě v širokém rozmezí průtoků, pára však musí při průchodu kloboučkem překonat poměrně velký odpor a v klasické verzi to byla těžká a montážně složitá zařízení. Později byla vyvinuta **síťová** patra, na nichž se při daném průtoku udržela vrstva pěny, i když kapalina z části prokapávala sítí dolů. Síťová patra musela být velmi přesně navržena, protože při snížení průtoku byla téměř suchá a ztrácela dělicí schopnost; při vyšším průtoku plynu docházelo k tak zvanému **zahlcení**; kapalina nestačila stékat dolů a hromadila se na patrech jako pěna. Moderní kolony spojují výhody obou výše zmíněných; mívají **ventilová** nebo **záklpková** patra s pohyblivými prvky, tvarovanými z poměrně tenkého plechu. Ty se samy nastavují podle okamžitého průtoku páry a kapaliny tak, že tlaková ztráta páry přes patro je malá a na patře se stále udržuje potřebná vrstva pěny. Vyšší tlaková ztráta je nežádoucí hlavně pro destilace za sníženého tlaku (nižší teplota varu), nutné tehdy, když zpracovávaný materiál je citlivý na vyšší teplotu a zajímavé i z hlediska úspor tepelné energie.

Na patrech dochází k různým neidealitám, kontakt kapaliny s parou někdy nestačí k dostatečnému přiblížení k rovnováze a nedojde k dokonalému oddělení odcházející kapaliny a páry takže k dělení, které vyžaduje N_{teor} **teoretických pater** potřebujeme N **skutečných pater**.



Obr. 5.25. Schéma práce kloboučkových pater (V průmyslových kolonách bývají na patrech desítky až stovky kloboučků nebo obdobně pracujících prvků)



Obr. 5.26. Patro s ventily – průměr 5 m

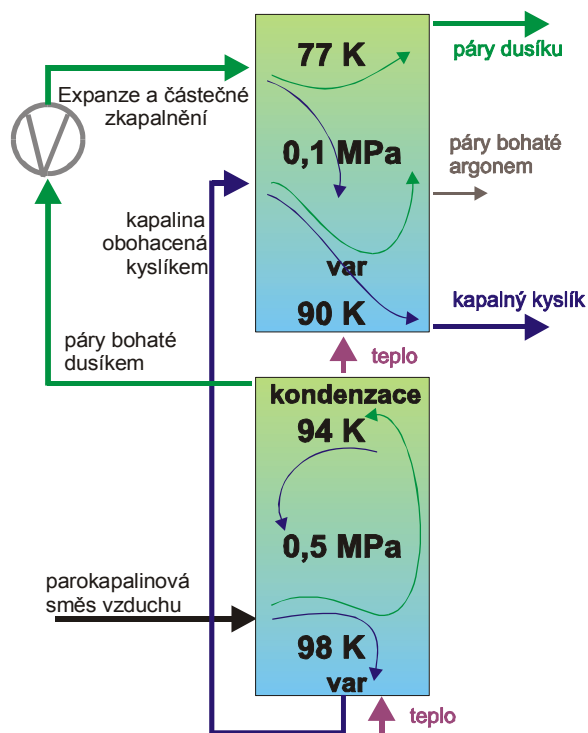
Číslo $\eta = 100 (N_{teor} / N)\%$ nazýváme **účinnost kolony v procentech** a pro dobře navržená patra pro daný proces bývá vyšší než 80%.

❑ Plněné kolony

I v plněných kolonách, zmíněných podrobně v odst. 5.1., je protiproudý styk kapaliny s parou. Nelze však dopředu říci, na jakém úseku výplně má dojít k rovnováze mezi odcházejícími proudy tak jako na patře. Dělí-li výplňová kolona o výšce H tak jako teoretická kolona s N_{teor} patry, pak výplň hodnotíme veličinou H/N_{teor} , nazývanou **výška, odpovídající teoretickému patru**. U průmyslových výplní to bývá 0,2-0,4 m, v laboratorních kolonkách s nízkými průtoky to může být měřeno v milimetrech.

Místo **počtu teoretických pater** se zavádí někdy jistým integrálem definovaný pojem **počet převodových jednotek**, přičemž za běžných okolností jsou tyto hodnoty přibližně stejné.

V porovnání typů kolon jsou patrové kolony poněkud méně citlivé na přesný návrh – pracují i při značně sníženém výkonu kde ani předimenzovaná patra většinou nezůstávají suchá. Riziko nedokonalého smočení je u výplňových kolon vyšší. Je-li kolona poddimenzovaná pro daný průtok páry, hrozí v každém případě její zahlcení – velkou rychlostí postupující pára začne unášet kapalinu vzhůru. Slabé zahlcování zhoršuje dělení, silnější vyřazuje kolonu zcela z činnosti.



Obr. 5.27. Princip destilace vzduchu v Lindeho koloně

- Lindeho kolona

Pro destilaci zkvapalněného vzduchu se užívá rovněž vícestupňové destilace ve dvojici spřažených kolon – tlakové a atmosférické viz obr. 5.27. Chlad, potřebný ke kondenzaci zpětného toku v tlakové sekci se bere z vařáku atmosférické sekce. Zpětný tok pro atmosférickou sekci se získává ochlazením směsi obohacené dusíkem expanzí. Lindeho kolony jsou obvykle chráněny silnou tepelnou izolací (jistou výhodou - pomáhá to kondenzaci).

Výpočty destilace a destilačních kolon

□ **Bilance a rovnováha**

Chemickoinženýrské výpočty destilačních kolon v klasických příručkách a učebnicích se soustřeďovaly především na úkol řešit kolonu jako protiproudý výměník hmoty, tedy jen o problém bilance a rovnovah. Základním úkolem bylo **navrhnout kolonu pro dosažení zadaného dělení**. Byla pro to vyvinuta řada grafických metod, které sice používaly řady zjednodušení, ale dávaly rychlý výsledek, a pro zkušeného chemického inženýra byly i poměrně názorné. Zadá se složení a průtoky produktů a hledá se počet pater a zpětný tok a tedy i potřeba ohřevu ve vařáku a chlazení v kondenzátoru. Současně se najde i nejvhodnější místo pro přívod nástříku. Tímto postupem byly donedávna projektovány kolony pro celý mamutí průmysl rafinerií a těžkých chemických technologií.

V současnosti se dává přednost vysoce přesným **simulačním výpočtům toho, jak zadaná kolona pracuje** se zadanou směsí při zadaném ohřevu a zpětném toku. Simulační výpočty mohou být postaveny na komplikovaných matematických popisech rovnováh a enthalpických dat. Uživatel běžně dostupných softwarových produktů ani nepotřebuje znát detaily algoritmů pro výpočet dělení v jednom rovnovážném stupni a jejich sestavení do popisu kolony. Přesto znalost klasického jednoduchého přibližného návrhu kolony je velmi užitečná aby nebyla zadávána nesmyslná vstupní data, aby nebyly na kolonu kladeny neřešitelné požadavky a aby nebylo nutno dopracovávat se k požadovanému výsledku zcela zkusmo. Současné simulační programy jsou schopny namodelovat i dělení vícesložkových směsí s více nástriky, více zpětnými toky a více odběry, případně i proces v několika složitě těmito proudy propojených destilačních kolonách. Přitom jsou schopny předpovědět i děje následující při skokových nebo postupných změnách složení suroviny nebo režimu práce.



Obr. 5.28. Kolony v rafinerii Kralupy

□ Účinnost kolony

Účinnost kolony je třeba znát, abychom věděli kolik skutečných pater nebo jakou výšku výplně zvolit pro dosažení potřebného počtu rovnovážných stupňů. Účinnost závisí dále především na kinetické energii par, vyjadřované pomocí rychlosti toku u_G páry ve volném průřezu kolony jako $(\rho_G^{1/2} u_G)$ a mírněji i na rychlosti a vlastnostech kapaliny. Důležitá je i vzdálenost pater pro patrové kolony a velikost prvků výplně u plněných kolon. Protože rychlost páry je poměrem objemového průtoku par a průřezu kolony, rozhoduje výpočet účinnosti nejen o výšce kolony, ale i o jejím průměru. Pro daný typ kolony obvykle poskytuje údaj o účinnosti a její závislosti na průtocích a vlastnostech dělené směsi výrobce, pro základní typy pater a výplní existují v příručkách odhadové formule a pomocné grafy.

□ Diagnostika kolony

Jednoduchými informacemi o procesu v koloně jsou teploty a tlaky ve vybraných místech kolony. Teplota dává informaci o teplotách varu směsi v daném místě a tedy z ní můžeme určit složení. Tlakové změny souvisejí hlavně s rychlostí páry a s množstvím pěny, kterou pára vytváří. Neúměrné kolísání tlakového spádu svědčí o zahlcování kolony. To je důležité, protože kolona má obvykle nejvyšší účinnost u hranice zahlcení avšak při překročení této hranice účinnost prudce klesá a unášením kapaliny vzhůru kolona ztrácí dělicí schopnost.

□ Konstrukční řešení

Kolony jsou i při velkých průměrech vždy štíhlé aparáty. V laboratoři kolonu uspořádáváme zásadně tak, že kondenzátor je umístěn nad hlavou kolony (horní část) a zpětný tok z kondenzátoru se vrací samospádem. Ve schématech to pro názornost zpravidla tak také kreslíme. Ve skutečnosti se velký, těžký kondenzátor průmyslové kolony staví dolů přičemž zpětný tok kapaliny se dopravuje do hlavy kolony jednoduše čerpadlem.

□ Ekonomická optimalizace

Dané řešení dělicího procesu destilací není technicky zcela jednoznačné. Ve vysoké koloně při menším zpětném toku můžeme dosáhnout například stejného dělení jako v koloně s menším počtem pater nebo s nižší vrstvou výplně při větším zpětném toku. Vyšší zpětný tok znamená větší tok kapaliny i páry kolonou – tudíž větší spotřebu energie a větší průřez kolony. Pro menší zpětný tok musí být zase kolona velmi vysoká. Posouzením investičních nákladů na výrobu kolony a provozních nákladů na ohřev a chlazení lze najít ekonomické optimum. Dnes se dává přednost spíše dražšímu, energeticky úspornějšímu zařízení, protože kolona z dobrého materiálu může být užívána po řadu desetiletí a jde o univerzální aparát, opakovatelně využitelný i po případných změnách výrobního programu podniku.



Pojmy k zapamatování

Rovnováha kapalina – pára pro dvousložkovou směs

T-x,y diagram, čára kondenzace, čára varu, pákové pravidlo

y-x diagram, rovnovážná čára, azeotropní směsi

Destilace, nástřík, destilát, zbytek

Diferenciální destilace, rovnovážná destilace

Rektifikace, kolona, zpětný tok – reflux

Obohacovací část, ochuzovací část, rovnice pracovní čáry

Patrová kolona, kloboučková, síťová, záklopková, ventilová patra

Teoretická patra, skutečná patra, účinnost kolony

Výška odpovídající teoretickému patru

Vícesložková destilace, frakční kolona



Příklady

Příklad 5.1.

Destilace

Surovina o složení 32 hm.% Benzenu a 68 hm.% Toluenu se má dělit rovnovážnou destilací při teplotě 70°C tak, aby se surovina rozdělila na 60 hm.% parní a 40 hm.% kapalně fáze. Určete složení těchto fází a dělicí tlak.

Úvod

Destilací se dělí nejméně dvou složková směs na základě rozdílných teplot varů jednotlivých složek. Dělená směs se označuje nástřík (Feed), těkavější podíl destilát (Vapour) a méně těkavá část destilační zbytek (Liquid). Destilace se provozuje jako jednostupňová rovnovážná nebo jako vícestupňová rektifikace. Při popisu destilačních zařízení zavádíme několik zjednodušujících předpokladů:

Parní fáze (destilát) se chová jako ideální plyn

Destilační zbytek jako ideální roztok

Vztah mezi složením destilátu a složením destilačního zbytku popisuje fázová rovnováha. Ta je dána buď rovnici rovnováhy, nebo tabulkou rovnovážných dat.

Rovnovážná destilace Benzen-Toluen U19-2

Postup: Zapišeme hmotnostní bilanci destilace a složkovou bilanci pro těkavější složku. Zapišeme rovnici rovnováhy s ohledem na zjednodušující předpoklady. Stanovíme rozdělovací koeficient z poměrů parciálních tlaků čistých složek při dané teplotě. Parciální tlaky získáme např. z Antoineovy rovnice.

Hmotnostní bilance destilace: $\dot{m}_F = \dot{m}_V + \dot{m}_L$

Hmotnostní bilance těkavější složky: $X_{AF}\dot{m}_F = Y_A\dot{m}_V + X_A\dot{m}_L$

Rovnice rovnováhy: $\frac{Y_A}{1-Y_A} = \alpha_{AB} \frac{X_A}{1-X_A}$

Rozdělovací koeficient: $\alpha_{AB} = \frac{p_A^0}{p_B^0}$

Antoineova rovnice: $\ln(p_A^0) = A - \frac{B}{T+C}$, kde A, B, C jsou konstanty a T je termodynamická teplota.

K výpočtu pracovního tlaku využijeme předpoklad ideálního chování parní fáze a z kombinace Daltonova a Raoultova zákona dostaneme výsledný vztah pro pracovní tlak destilace.

Daltonův zákon: $p = p_A + p_B$

Raultův zákon: $p_A = p_A^0 \cdot x_A$

Pracovní tlak: $p = p_A^0 \cdot x_A + p_B^0 \cdot x_B$, kde x jsou molární zlomky složek v kapalně fázi. Pro převod hmotnostních zlomků na zlomky molární je třeba znát molární hmotnosti složek.

Výpočet: V tabulkách nalezneme teploty varu složek při normálním tlaku: Benzen 80.10°C, Toluén 110.61°C.

Těkavější složka (označena indexem A) je tedy Benzen.

Z parciálních tlaků vypočteme rozdělovací koeficient.

	A	B	C	T [K]	$\ln(p_A^0)$	p_A^0 [kPa]
Benzen	13.8858	2788.51	-52.36	343	4.2914	73.07
Toluen	13.9987	3096.2	-52.67	343	3.3343	28.06

$$\alpha_{AB} = \frac{p_A^0}{p_B^0} = \frac{73.07}{28.06} = 2.6$$

Ze zadání vyplývá, že se surovina rozdělí na 60 % parní a 40 % kapalně fáze. Složkovou bilanci pak můžeme přepsat na tvar: $X_{AF}\dot{m}_F = Y_A \cdot 0.6\dot{m}_F + X_A \cdot 0.4\dot{m}_F$, pro $X_{AF} = 0.32$ vyjádříme Y_A jako:

$$Y_A = 0.533 - 0.667X_A$$

Dosadíme do rovnice rovnováhy a řešíme kvadratickou rovnici pro pozitivní kořen s fyzikálním významem koncentrace v kapalně fázi.

$$\frac{Y_A}{1-Y_A} = \alpha_{AB} \frac{X_A}{1-X_A} = \frac{0.533 - 0.667X_A}{1 - 0.533 - 0.667X_A}$$

$$1.1339X_A^2 + 2.4609X_A - 0.533 = 0$$

$$X_{A1} = 0.198; X_{A2} = -2.38$$

Pro pozitivní kořen nalezneme odpovídající koncentraci složky A v plynné fázi dosazením do upravené hmotnostní bilance: $Y_A = 0.533 - 0.667 \cdot 0.198 = 0.401$

$$Y_B = 1 - Y_A = 1 - 0.401 = 0.599$$

$$X_B = 1 - X_A = 1 - 0.198 = 0.802$$

$$M_A = \frac{78}{\text{mol}}; M_B = \frac{92}{\text{mol}}, \text{ pak } x_A = \frac{X_A/M_A}{X_A/M_A + X_B/M_B} = \frac{0.198/78}{0.198/78 + 0.802/92} = 0.226$$

$$\text{a } x_B = 1 - x_A = 1 - 0.226 = 0.774$$

$$\text{Pracovní tlak: } p = p_A^0 \cdot x_A + p_B^0 \cdot x_B = 73.07 \cdot 0.226 + 28.06 \cdot 0.774 = 38.23 \text{ kPa}$$

Odpověď: Složení parní fáze je 40.1 hm.% Benzenu a 59.9 hm.% Toluenu. Složení destilačního zbytku je 19.8 hm.% Benzenu a 80.2 hm.% Toluenu. Pracovní tlak destilace je při ideálních podmínkách 38.23 kPa.

5.3. Dvofázové soustavy kapalina – plyn



Čas ke studiu: 4 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- vyjmenovat veličiny, charakterizující vlhkost vzduchu,
- vysvětlit jejich měřitelnost a praktickou použitelnost,
- odečítat příslušné hodnoty z grafu vlhkého vzduchu
- vysvětlit použití změn vlhkosti v praktických aplikacích
- popsat proces sušení vzduchem a možnosti jeho ovlivňování
- vysvětlit podstatu změn vlhkosti vzduchu při klimatizaci a při chlazení vody



Výklad

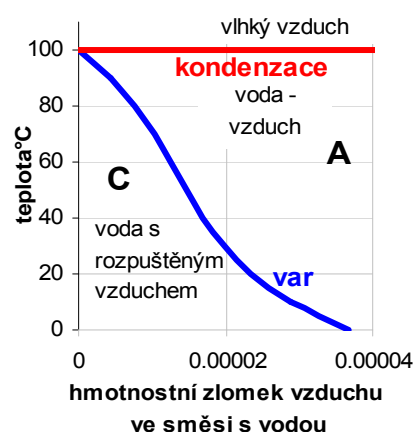
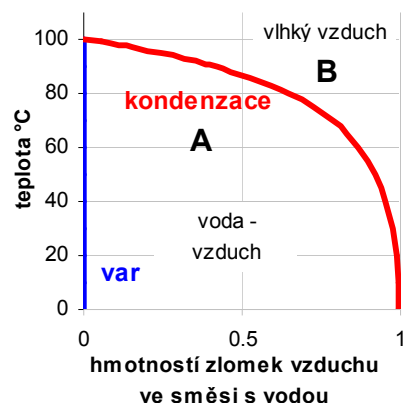
Využití rovnováhy kapalina - plyn

Ve dvousložkových soustavách plyn - kapalina platí o rovnováhách podobná závislost jakou jsme poznali mezi kapalinou a parou dvousložkové v destilaci. Avšak křivky kondenzace a varu jsou od sebe podstatně vzdálenější. Předvedeme si to na soustavě voda – vzduch při normálním tlaku. Vidíme, že pohybujeme-li v dolní části intervalu teplot mezi 0 a 100°C, obsahuje kapalná fáze (voda) jen malý podíl rozpuštěného plynu a plyn (vzduch) obsahuje jen malé množství vodní páry. Existuje několik různých úloh, ve kterých můžeme některou malou veličinu ignorovat:

V úlohách o **hydrostatice** nebo **hydrodynamice** se pohybujeme ve střední dvofázové oblasti (A) a nahlížíme na soustavu kapalina – plyn jako na dvě zcela samostatné a nezávislé složky. Existenci vlhkosti ve vzduchu a rozpuštěných složek vzduchu ve vodě zde prakticky nemusíme uvažovat.

V úlohách o **vlhkém a suchém vzduchu**, sušení, chlazení vody vzduchem a klimatizaci se pohybujeme v oblasti (B), ve které jsou středem zájmu obě složky v plynné fázi, a v tomto případě zpravidla není podstatné, zda případně přítomná kapalná voda je plynem nasycena či nikoli. Analogii těchto úvah pro jiné soustavy se dostaneme třeba k problému sušení vysokoteplotní parou nebo destilace nepolárních málo těkavých látek s vodní parou.

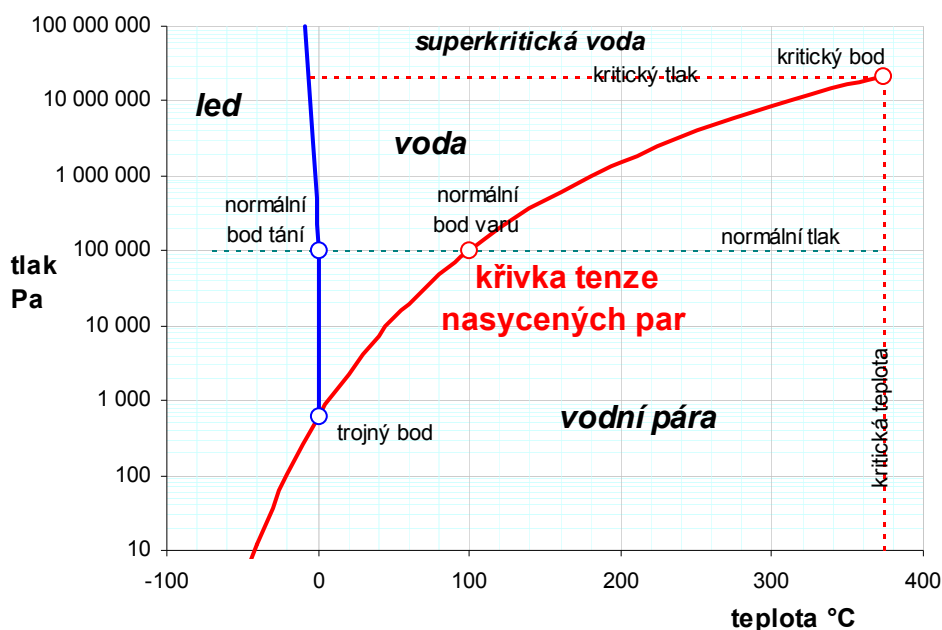
V úlohách studujících obsah **rozpuštěných plynů v kapalině** – typický je případ doplňování kyslíku z proudícího plynu do kapaliny pro podporu biologických procesů v kapalině (aerace ve fermentorech, aerobní čištění odpadních vod, vzdušnění akvárií, odplyňování napájecí vody pro kotle). V takovém případě nás zajímá



Obr.5.29. Fázový diagram směsi vzduch – voda; celkový průběh a detail pro nízký obsah vzduchu

oblast (C), a není příliš zajímavé, zda plyn je vlhký či nikoliv.

V úlohách o **absorpci** zpravidla pracujeme se trojsložkovým systémem. Jsou-li dvěma složkami například voda (rozpouštědlo) a vzduch (plynné rozpouštědlo), třetí složkou (absorbovanou látkou) bývá obvykle další plyn, který bývá podstatně rozpustnější v kapalině než vzduch. Z hlediska prvních dvou složek se pohybujeme v oblasti (A) a do jisté míry zde můžeme současně nahlížet na kapalinu jako na inertní kapalně rozpouštědlo, nevstupující do plynu, a na nosný plyn jako na inertní plynně rozpouštědlo, které nevstupuje do kapaliny. Příkladem aplikace rovnováhy v takovéto trojsložkové soustavě může být vypírání rozpustné složky ze směsi plynu (absorbce), nebo vypuzování rozpuštěného plynu z kapaliny (desorpce, stripování).



Obr.5.30. Stavový diagram vody

Vlhký vzduch

Práci se suchým a vlhkým vzduchem zpravidla omezujeme na izobarické soustavy při atmosférickém tlaku p_0 . V této kapitole budeme značit indexem A vlhkost (vodu) a G plyn (vzduch). Podle Raoultova zákona je za těchto podmínek v rovnováze s vodou vzduch, ve kterém parciální tlak vody je právě roven tenzi par vody p_A^0 a součet parciálních tlaků složek vzduchu doplňuje tlak do hodnoty p_0 ; je tedy roven rozdílu ($p_0 - p_A^0$). Z grafu 5.30. závislosti p_A^0 na teplotě je vidět, že pokud se příliš neblížíme k teplotě varu, je zlomek p_A^0/p_0 dosti malý. V praxi je zvykem vyjadřovat složení vlhkého vzduchu jako **absolutní vlhkost**

$$Y_A = \frac{m_{AG}}{m_G},$$

což je bezrozměrový podíl hmotnosti vlhkosti v plynné fázi m_{AG} a hmotnosti suchého plynu m_G v daném vzorku.

Důležitým pojmem je **vzduch nasycený vodní parou**, což je vzduch, který je při teplotě systému v rovnováze s vodou. Za předpokladu, že jde o ideální plyny, je **absolutní vlhkost nasyceného vzduchu**

$$Y_A^0 = \frac{p_A^0}{p - p_A^0} \frac{M_G}{M_A}$$

kde M_A je molární hmotnost vody (18 kg/kmol), M_G je střední molární hmotnost vzduchu (asi 29 kg/kmol). Při zadaném celkovém tlaku p je $Y_A^0(T)$ známou funkcí teploty – **křivka rosného bodu**.

Díky tomu, že vzduch není zpravidla trvale v rovnováze s vodou o stejné teplotě, a že teplota vzduchu značně kolísá, je obvyklé, že $Y_A \neq Y_A^0$. Pokud při teplotě T je $Y_A > Y_A^0(T)$, pak máme **přesycený vzduch**, ze kterého se postupně tvoří dvoufázová směs kapalina – plyn, ve které plynem je nasycený vzduch a kapalinou bývá voda ve formě mlhy – mikroskopických kapiček.

To je i případ, kdy „vidíme vodní páru“ – ve skutečnosti vodní pára je zcela čirá a viditelné jsou až vzniklé kapičky po ochlazení a kondenzaci.

Rychlost tvorby mlhy z přesyceného plynu stoupá v přítomnosti jakýchkoliv částic; toho se dokonce dalo využít ke sledování rozpadu částic v jaderném výzkumu v jednoduchém laboratorním zařízení nazývaném Wilsonova mlžná komora. I průlet jednotlivého atomu nebo částice za sebou nechává mlžnou stopu.

Usazování malých kapek je pomalé, takže mlhy a mraky jsou poměrně stabilní disperze, ve kterých jsou částičky vzájemně odpuzovány elektrostatickými silami. Ochlazováním dochází k další kondenzaci a částice narůstají. Také elektrický výboj (blesk) urychluje spojování částic do velkých dešťových kapek, které se zase při pádu elektricky nabíjejí a řetězově iniciují další výboje.

Technicky zajímavější je případ **nenasyceného vzduchu**, kdy při teplotě T je $Y_A < Y_A^0(T)$.

□ Vyjádření vlhkosti a její stanovení

Abychom zjistili, jaká je skutečná **absolutní vlhkost** Y_A vzduchu, nemusíme ji stanovovat pracně přímým měřením (například jako přírůstek hmotnosti hygroskopické látky, kolem které proženeme měřené množství vzduchu), ale zjišťujeme ji nepřímou některým jednodušším postupem.

Uvedeme-li vzorek vzduchu do styku s chladným tělesem, pak může nastat situace, ve které se na povrchu tělesa začne kondenzovat voda. Hranicí teplot, pod kterou k tomuto jevu dochází je **teplota rosného bodu** T_D (dewpoint). Platí

$$Y_A = Y_A^0(T_D).$$

Je to tedy teplota, při níž se vzduch o daném obsahu vody právě stane nasyceným. Ke stanovení teploty rosného bodu je výhodné pozorovat okamžik zamžení zrcadlově lesklého povrchu, který ze zadní strany chladíme chladicím médiem o pozvolna klesající měřené teplotě.

Přechod přes teplotu rosného bodu pozorujeme na orosení sklenice chladného nápoje, na brýlích při vstupu z mrazivého vzduchu do zadýchané místnosti. Je výhodnější zabránit namrzání vnitřních skel auta dýcháním (teplý vlhký vzduch) nebo větráním (studený suší vzduch)?

V rovnováze s vlhkým vzduchem jsou i vlhké materiály. V rovnováze s nasyceným vzduchem jsou materiály zcela mokré. Neobsahuje-li vzduch vlhkost, pak se i z materiálů vlhkost stykem se vzduchem postupně ztratí. S tím jsou spojeny i změny některých snadno měřitelných vlastností. Například některá vlákna se zvlhčením prodlužují a na tomto principu je vystaven **vlasový vlhkoměr**. Vlasový vlhkoměr indikuje při dané teplotě v jakém místě mezi nulou a $Y_A^0(T)$ je skutečná hodnota Y_A . Rozdělíme-li interval od nuly do $Y_A^0(T)$ ekvidistantně, dostaneme další užitečnou veličinu, kterou označujeme jako **relativní vlhkost**

$$\varphi \equiv \frac{Y_A}{Y_A^0(T)}$$

udávanou občas i v procentním vyjádření jako $\varphi_{\%} = 100\varphi$.

Přesnější stanovení vlhkosti (vyžadující však trochu komplikovanější vyhodnocení) je založeno na měření **teploty vlhkého teploměru**, T_W . Je totiž známo, že mokré povrchy mají většinou nižší teplotu než okolní vzduch. Vložíme-li malé mokré těleso velkého do prostoru nenasyceného vzduchu, pak dojde k odpařování vlhkosti z povrchu tělesa. Teplo, které je zapotřebí k odpařování odebírá zprvu těleso z vlastní hmoty, po určité době se teplota ustálí na teplotě vlhkého teploměru. Za tohoto ustáleného stavu přichází teplo již jen z okolního vzduchu s intenzitou tepelného toku $/(W\ m^{-2}K^{-1})$

$$q = \alpha (T - T_W),$$

která je dána součinem rozdílu teploty suchého a vlhkého teploměru a součinitele přestupu tepla α . Tímto teplem se odpaří na jednotce plochy za jednotku času množství vlhkosti $/(kg\ m^{-2}s^{-1})$

$$m' = q/\Delta h_{vyp}$$

a toto množství uniká do prostoru vzduchu s intenzitou hmotnostního toku

$$m' = k (Y_{AW}^\circ - Y_A),$$

kde Y_{AW}° je absolutní vlhkost nasyceného vzduchu u povrchu vlhkého teploměru a k je součinitel přestupu hmoty. Teplo i vlhkost se v okolí vlhkého teploměru přenáší prouděním – konvekci, která závisí na pohybu vzduchu okolo příslušné plochy. Dá se však očekávat, že hodnoty součinitelů α a k jsou prouděním (Reynoldsovo číslo) ovlivňovány zhruba stejně, takže je možno pokládat skupinu $(k \Delta h_{vyp} / \alpha)$ za látkový parametr. Pro obvyklá uspořádání v soustavě voda – vzduch můžeme brát

$$k \Delta h_{vyp} / \alpha \approx 1,1 \Delta h_{vyp} / c_{pA} \approx 2630 \text{ K}.$$

Spolu se závislostí $Y_{AW}^\circ = Y_A^\circ(T_W)$ pak máme vztahy, ze kterých na základě změřených teplot vlhkého teploměru T_W a suchého teploměru T můžeme dopočítat neznámou hodnotu absolutní vlhkosti Y_A . Namísto klasických **psychrometrů** tvořených dvojicí teploměrů, z nichž jeden je obalen knotem, zasahujícím do nádoby s vodou jsou dnes komerčně dostupné elektronické teploměrné a vlhkoměrné přístroje, do kterých stačí občas kápnout trochu destilované vody a na displeji přečteme nejen dvojice teplot suchého a vlhkého teploměru T , T_W ale i dostatečně přesnými vzorci vypočítané hodnoty teploty rosného bodu T_D , relativní vlhkosti φ a konečně i hodnoty absolutní vlhkosti Y_A . Případně bývá uvedena i relativní měrná enthalpie I vlhkého vzduchu.

Relativní měrnou enthalpii I vztahujeme na 1 kg suchého vzduchu a nulovou hodnotu enthalpie přiřazujeme suchému vzduchu a kapalné vodě při teplotě 0°C . Při jejím výpočtu skládáme tři příspěvky: ohřátí 1 kg vzduchu z nuly na teplotu $T/(^\circ\text{C})$, odpaření Y_A kg vody při 0°C a ohřev Y_A kg vodní páry z nuly na teplotu $T/(^\circ\text{C})$, tedy

$$I = 1 c_{pA} T + Y_A \Delta h_{vyp} + Y_A c_{pV} T$$

kde c_{pA} a c_{pV} jsou střední tepelné kapacity jednotky hmotnosti v daném rozsahu teplot pro vzduch a vodní páru.

Analogické veličiny je možno odvodit i pro jiné systémy než je voda – vzduch. Připomeňme, že pro těkavější látky je teplota vlhkého teploměru podstatně nižší, jak to známe z pocitu, který máme při navlhčení ruky lihem nebo benzinem. Důvodem je jednak vyšší tenze par, jednak prakticky nulový obsah par těchto látek ve vzdušném prostoru.

Odpařování etheru se například používá k ochlazování zadní strany zrcátka v jednoduchých přístrojích na stanovení teploty rosného bodu.

□ Enthalpický diagram vlhkého vzduchu (Mollierův – Ramzinův)

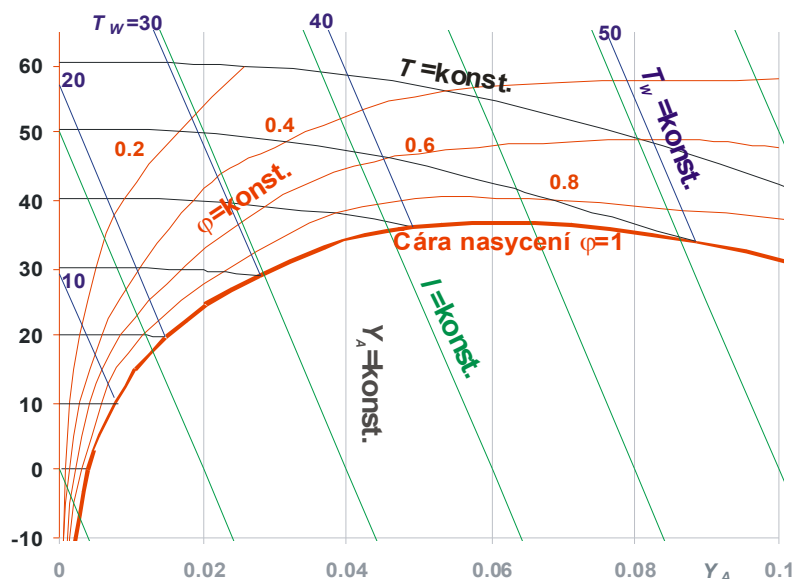
Přestože výpočetní algoritmy pro přepočty veličin charakterizujících vlhký vzduch jsou poměrně snadno dostupné, dáváme u studentů důraz na grafické znázornění těchto vztahů, ze kterého je například patrná i parametrická citlivost (jaké chyby se ve výsledku dopustíme nepřesností nebo změnou v některé z proměnných). Grafické znázornění může být v různých formách. V české literatuře je obvyklý tzv. Mollierův diagram, kde na ose x je vynesena absolutní vlhkost Y_A /(kg vlhkosti na kg suchého vzduchu) a ekvidistantní čáry popisují konstantní hodnoty I /(kJ na kg suchého vzduchu). V Ramzinově modifikaci jsou čáry konstantního I šikmé rovnoběžky pod úhlem 45° , čímž se diagram stává kompaktnějším. Pro graf na obrázku 5.31. jsme čáry konstantní enthalpie ještě více sklonili, čímž jsme v nejběžnějším rozmezí nastavili izotermu zhruba vodorovně.

Prakticky důležité jsou především čáry konstantní teploty T (černé) a klíčová je křivka nasycení (silná červená), charakterizující závislost $Y_A^\circ(T)$. Po svislé přímce konstantního Y_A (šedá) se dostaneme na křivku nasycení na teplotu rosného bodu T_D , šikmé (modré) čáry nás vedou na křivku nasycení do teploty vlhkého teploměru T_W ; jsou téměř rovnoběžné s ekvidistantními přímkami konstantního I (zelené). Vzdálenost mezi svislou osou $\varphi=0$ a křivkou nasycení $\varphi=1$ je rozčleněna křivkami konstantní relativní vlhkosti (červené).

Protože obě lineárně rozložené souřadnice Y_A a I vyjadřují bilancovatelné vlastnosti může se tento diagram snadno použít i pro směšování dvou různě vlhkých a teplých proudů vzduchu s využitím pákového pravidla (to třeba neplatí v diagramech „Psychrometric Chart“ s ekvidistantním rozložením teplot, oblíbených v anglosaské literatuře).

Většina procesů s vlhkým vzduchem je zajímavá za tlaků blízkých běžnému atmosférickému tlaku a o vliv tlaku na proces se nemusíme zajímat. Avšak např. adiabatickým snížením tlaku se dá vzduch přesytit, takže z něj vypadne vlhkost čímž se enthalpie vzduchu výrazně zvýší.

To je typický meteorologický proces při proudění vlhkého vzduchu z jihu přes Alpské hřebeny, na nichž vypadne déšť nebo sníh a na severní stranu postupuje do zvyšujícího se tlaku teplý suchý vítr, nazývaný Föhn (tento název byl převzat pro sušiče vlasů).



Obr.5.31. Enthalpický diagram vlhkého vzduchu
(teploty ve stupních °C)

Procesy, využívající rovnováhy voda – vzduch

U fázového rozhraní mezi vodou a vzduchem můžeme předpokládat v obou fázích stejnou teplotu a můžeme předpokládat, že vzduch je zde vodní parou při této teplotě právě nasycen. V uzavřených systémech se teplota a vlhkost v celém systému prakticky ustálí na těchto hodnotách. Uvedeme-li vzduch do styku s vodou, mající vyšší teplotu než je teplota vlhkého teploměru, dojde k na fázovém rozhraní k odpařování vody a k ochlazování (*foukání do horké polévky*). Obráceně, na studenějším povrchu dochází ke kondenzaci vzdušné vlhkosti a k ohřevu (*dýchání na chladné ruce*). Na vyrovnávání teplot se podílí v první etapě jak kapalná tak plynná fáze, pozvolna však se teplotní pole ustaví tak, že se teplo bude především pohybovat od nejvýznamnějšího zdroje k nejvýznamnějšímu spotřebiči. Rychlost změny je řízena jednak rychlostí odvodu nasyceného vzduchu od povrchu do vzdušného prostoru, jednak rychlostmi sdílení tepla ve vodě a ve vzduchu.

□ Změna vlhkosti na účet enthalpie vody.

Při styku velkého množství vody s menším množstvím vzduchu nedojde k výrazné změně teploty vody, teplota vzduchu se s teplotou vody vyrovnává a dojde při této teplotě k nasycení vzduchu. Použijeme toho například při vlhčení suchého vzduchu probubláváním promývačkou. Stykem vzduchu s podstatně chladnější vodou, případně vymražením, můžeme naproti tomu absolutní vlhkost vzduchu snížit.

□ Změna vlhkosti na účet enthalpie vzduchu

Styk menšího množství vody s velkým množstvím vzduchu je běžnější jak v přírodě tak i v technických aplikacích. Ať již je voda na počátku teplejší nebo chladnější, o konečném stavu rozhoduje rychlost přívodu tepla z vzdušného prostoru k fázovému rozhraní a rychlost odvodu vlhkosti od fázového rozhraní do prostoru vzduchu. Tyto rychlosti sice jsou závislé na pohybu vzduchu, ale poměr těchto rychlostí na proudění vzduchu závisí jen slabě, takže výsledná teplota

rozhraní se ustaví na teplotě vlhkého teploměru T_W , odpovídající teplotě a vlhkosti vzduchu v okolním prostoru.

❑ Zařízení pro vzduch a vodu

Specifikou práce se vzduchem a vodou je možnost využívat otevřených zařízení. Vzduch je jedinou surovinou, jejíž využití není zpoplatněno a je dosud možno volně měnit jeho vlhkost a teplotu – jiné emise jsou však sledovány. Voda je sledována a do vodotečí není povoleno vypouštět vodu o vysoké teplotě (škodí vodním organismům jednak přímo, jednak snižuje množství rozpuštěného kyslíku). Pokud voda cirkuluje v závodě, může někdy dojít na světle v otevřených nádržích k nežádoucímu nárůstu řas.

Sušení

Materiály, které byly ve styku s vodou nebo vodními parami, nesou zpravidla nějakou kondenzovanou vlhkost. Pro tento materiál zde volíme index S . Je obvyklé vyjadřovat i tuto vlhkost relativním hmotnostním zlomkem

$$X_A = \frac{m_{AS}}{m_S},$$

což je bezrozměrový podíl hmotnosti **vlhkosti** (vody) v materiálu m_{AS} a hmotnosti suchého materiálu - **sušiny** m_S v daném vzorku.

Vlhkost materiálu může mít různou povahu. Vodou může být smočen povrch materiálu – tzv. volná voda, voda může být držena kapilárními silami mezi částicemi nebo v pórech materiálu, voda může v mikrometrických či nanometrických vrstvách adsorbována na vnějším povrchu materiálu i na vnitřním povrchu – v pórech. V biologických materiálech je voda uzavřena polopropustnými membránovými stěnami buněk. Voda může být vázána i jako voda krystalová nebo dokonce držená ještě silnějšími chemickými vazbami. V laboratorní praxi označujeme za suchý materiál, podrobený sušení na vzduchu o teplotě 105°C; za těchto podmínek je odstraněna veškerá volná vlhkost, nedochází ale např. ke ztrátě krystalové vody.

V rovnováze s nasyceným vzduchem jsou materiály mokré, neobsahuje-li vzduch vlhkost, pak se i z materiálů časem všechna volná vlhkost stykem se vzduchem ztratí. **Rovnovážná vlhkost materiálu** X_A° je závislá na relativní vlhkosti vzduchu φ přičemž funkce $X_A^\circ(\varphi)$ téměř nezávisí na teplotě.

Pro kvantitativní představu uveďme, že při běžné vlhkosti $\varphi=0,7$ mají různé textilie z přírodních materiálů rovnovážnou vlhkost $X_A^\circ = 0,05-0,20$. Ručně vyždímané mají $X_A = 0,8-1,5$, odstředěné v pračce $X_A = 0,3-0,7$. Hodnoty pro textilie ze syntetických vláken jsou nižší.

❑ Typy sušících procesů

Sušení pevných a zrnitých materiálů jako proces provádíme se záměrem odstranit vodu, což může mít účel chemický (potřeba bezvodých látek) nebo materiálový (např. sušení keramiky před vypalováním), nebo jde jen o zlepšení skladovatelnosti (zmenšení hmotnosti a objemu), manipulovatelnosti (zlepšení sypných vlastností) a trvanlivosti materiálu (sušení potravin). Často sušení navazuje na nějaký (levnější) mechanický proces odstranění volné vlhkosti (usazování, filtrace, lisování, odstředování).

Kontaktní sušení probíhá na účet tepla dodávaného sušenému materiálu. Rychlost děje je řízena zpravidla rychlostí přestupu tepla do materiálu a vedení tepla k mezifázové ploše, na níž dochází k odpařování. Teplo se může také přivádět radiací k povrchu materiálu (sušení na slunci nebo pod infrazářičem). Intenzivní kontaktní sušení anorganických materiálů, kterým se vysokoteplotním ohřevem od stěn nebo od spalných plynů získávají bezvodé slinuté materiály (slínek při výrobě cementu) nebo práškové materiály (bezvodá soda), se označuje též jako **kalcinace**.

Zvláštním případem je **mikrovlnné sušení**, kde se dodává teplo přímo látce s nesymetrickou molekulou, což je např. právě voda. Nevýhodou je, jednak že kovové součástky deformují mikrovlnné

pole a způsobují lokální přehřátí, jednak ze zařízení nesmí unikat mikrovlnné záření nebezpečné při používané intenzitě živým organismům.

V souvislosti s problematikou vlhkého vzduchu je zajímavé **konvekční sušení**, ve kterém je odpar vody kryt hlavně enthalpií vzduchu.

□ Konvekční sušení vzduchem

Při konvekčním sušení vzduchem mění vzduch svou vlhkost z hodnoty Y_{A1} na hodnotu Y_{A2} a sušený materiál z hodnoty X_{A1} na hodnotu X_{A2} . Z bilance vyplývá, že na usušení hmotnosti m_S materiálu potřebujeme hmotnost vzduchu

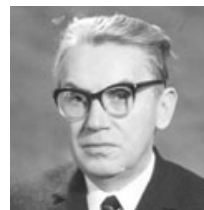
$$m_A = m_S \frac{X_{A1} - X_{A2}}{Y_{A2} - Y_{A1}}.$$

Při sušení rozeznáváme dvě základní etapy (Obr. 5.32).

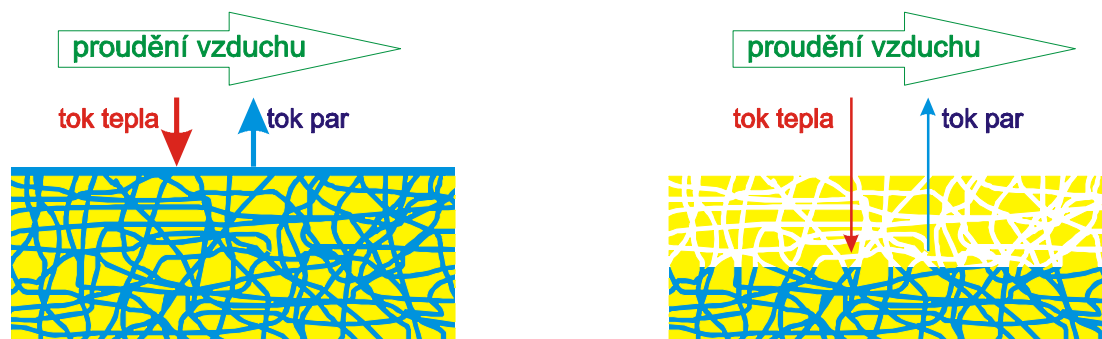
V první etapě „**za konstantní rychlosti sušení**“ se odstraňuje volná povrchová vlhkost. Jak jsme dříve ukázali na analogickém případě vlhkého teploměru, má povrch sušeného materiálu teplotu vlhkého teploměru T_W a vlhkost odcházejícího vzduchu může dosahovat skoro až $Y_{A2} = Y_{AW}$. Rychlost sušení $m' / (\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1})$ je řízena současně přestupem tepla a přestupem hmoty ve vzduchu, obklopujícím sušený materiál a je na obsahu vlhkosti v materiálu nezávislá. Pro danou sušárnu (když je nastaven tvar sušeného povrchu a rychlost proudění vzduchu) je intenzita toku hmoty (hmotnost přenesené vlhkosti za jednotku času jednotkou plochy)

$$m' = k (Y_{AW} - Y_A),$$

úměrná konstantní hnací síle $(Y_{AW} - Y_A)$, a součinitel přestupu hmoty k , závislý na rychlosti proudění vzduchu, se dá stanovit měřením v konkrétním typu sušárny.



A.V. Luikov (Lykov)
(1910-1974) teorie
sušení pórezních
materiálů



Obr.5.32. Sušení pórního materiálu

Dokud je povrch mokrý, je proces řízen rychlostí přestupu tepla a hmoty ve vzduchu; povrch má teplotu vlhkého teploměru

Po osušení povrchu je nejpomalejším dějem pohyb par v pórního materiálu; s prodlužováním dráhy od vzduchu k vlhkosti se proces zpomaluje

V další etapě „**při klesající rychlosti sušení**“ se postupně uvolňuje vlhkost zevnitř pórů a fázové rozhraní se posunuje do zvětšující se vzdálenosti od vzduchem obtékaného povrchu. Kritickým dějem se posléze stává difuze nepohyblivým plynem v pórech a součinitel přestupu hmoty k s postupem fronty sušení klesá. Je zřejmé, že prosušení materiálu bude tím rychlejší, čím menší bude jeho vrstva. Pokud jsou póry různě velké, uvolňuje se voda nejprve z těch větších a později z menších. Při nenulové vlhkosti sušícího vzduchu zůstane určitý podíl vody (rovnovážná vlhkost) zadržen mikropóry.

Typickým problémem je objemová kontrakce vysušeného materiálu, která se projeví zmenšením nebo úplným uzavřením pórů u povrchu, případně rozpraskáním povrchu. Vzniklá „kůra“ značně zpomalí další unikání vody (pro sušení je to nežádoucí, ale právě díky tomuto jevu zůstává vnitřek pečiva vláčný).

Vzniku kůry se dá zabránit **pomalým, rovnoměrnějším sušením**. Proto místo jednorázového zahřátí vstupního vzduchu, čímž dosáhneme velké rychlosti sušení, raději zahříváme vzduch až po částečném nasycení nebo recirkulaci části výstupního vlhkého vzduchu snižujeme hnací sílu sušení.

Pro rychlé a úspěšné konvekční sušení je účelné zkrátit dráhu vlhkosti materiálem a sušit materiál v co nejtenčích vrstvách.

Mezi čerstvá dřevěná prkna ve skladech se prokládají příčné latky aby zůstaly větrané mezery.

Tabákové listy se při sušení navlékají na šňůry podobně jako prádlo.

Sušení hub nebo ovoce se provádí v tenkých plátcích, položených např. na řídké síto.

Cihly se pro sušení a následné vypalování stavějí jednotlivě a stojatě

Seno se rozkládá během suché části dne do velké plochy a periodicky se obrací, na dobu zvýšené relativní vlhkosti (déšť, při nočním chladu rosa) se ukládá do kupek.

Sušení vlasů zrychlujeme současným pročesáváním.

Náhradou tekutiny v pórech můžeme sušení usnadnit. V laboratoři například můžeme krystaly promýt před sušením těkavější kapalinou – vodu můžeme například snadno vypláchnout ethanolem. Tím, že má ethanol vyšší tenzi par, je také větší hnací síla sušení a kapalina snáze prchá do okolí. Posledních zbytků tekutiny z pórů se můžeme dále zbavit odpařením do vakua. Nepolární organické kapaliny vyplachujeme z pórů třeba vysoce těkavým etherem.

❑ Konvekční sušárny

Pro velkokapacitní procesy nestačí rozložení materiálu a jeho exponování přirozenému vzdušnému proudění. Musí se vyřešit cirkulace a úprava teploty vzduchu a rozmístění sušeného materiálu. Kusový materiál nebo práškovitý materiál se zpravidla ukládá v malé vrstvě na lisky – ploché stohovatelné desky. Stohy lísek bývají umístěny na pojezdném podvozku a zavážejí se buďto jednotlivě do **komorové sušárny** nebo se posunují periodicky či kontinuálně delší komorou **tunelové sušárny**. V komoře sušárny bývá zpravidla **ventilátor**, nebo soustava ventilátorů, zajišťující vnitřní cirkulaci a promíchávání vzduchu. Cirkulace zásadně zvyšuje součinitel přestupu tepla z vlhkého povrchu ve fázi sušení za konstantní rychlosti a menší pohyb vzduchu je nezbytný i v dalších fázích. Obvykle je v prostoru sušárny umístěn též **kalorifer** – zařízení pro dohřívání vzduchu – u laboratorních sušáren jde obvykle o řízený elektrický ohřev, u průmyslových sušáren jsou to nejčastěji žebrované trubky vyhřívané parou. Pokud materiály snesou vyšší teplotu a produkty hoření, je možno vzduch nahradit spaliny, případně umístit hořák přímo do prostoru sušárny. Pro sušení zrnitých a práškovitých materiálů je výhodné zkrátit cestu vlhkosti k povrchu prohrabováním nebo přesypáním. V tomto směru je nejběžnějším zařízením rotační bubnová sušárna – ležatý dlouhý, zvolna se otáčející se válec, kterým proudí vzduch nebo jiné sušící plyny. Malým sklonem osy se dá zajistit, že přesýpaný materiál se při každé otáčce dopadá níže ve směru osy a poměrně rovnoměrně se pohybuje celým zařízením. Aby se zajistilo odstraňování materiálu přischlého na stěny, bývají někdy vně bubnu zavěšena kladívka, které se při otáčení převrací a tím povrch oklepávají. Jinou možností je třeba zavěšení řetězů uvnitř bubnu.

Při sušení kašovitých materiálů se často využívá **granulace**. Materiál se ve vhodném poměru přimíchává do recyklovaného usušeného prášku tak, aby se utvořily hrudky požadovaného rozměru, které se pak dosušují stejně jako materiál kusový.

Podobný účinek má při hnětení těsta moučení povrchu aby se těsto nenalepovalo na podklad a na ruce.

Pro velmi účinné dosušování krystalů nebo granulí podobného rozměru je možno použít fluidní sušárnu. K uvedení částic do vznosu je však obvykle třeba dosáhnout použit plynu o dostatečném průtoku (překročení prahu fluidizace), což znamená i vyšší tlakovou ztrátu při proudění – tedy výkonnější ventilátory s vyšší cenou zařízení i vyšší spotřebou energie. Fluidní sušení je ale zato rychlé a rovnoměrné.

Když chceme získat suchý prášek z kašovitého materiálu, je nejvýhodnější cestou použití **rozprašovací sušárny**. Materiál rozbijeme na drobné částice buďto prohnáním pod tlakem rozprašovací tryskou, přisáváním do silného proudu plynu v ejektorovém uspořádání nebo odstřikováním z rychle rotujícího kotouče. Tyto částice pak procházejí sušícím plynem tak aby jejich usazením vznikl již sypký materiál. Doba sušení malých částic může být velmi krátká, takže se to hodí i pro materiály citlivé na teplotu, např. potravinářské suroviny (mléko, vejce).

U těchto sušáren je nutno dát pozor na to, že jemné práškovité organické materiály rozptýlené do vzduchu mohou tvořit výbušnou směs.

Destilace s vodní parou

Některé látky ze směsi organických látek o vysoké teplotě varu můžeme separovat podobným procesem jako je sušení. Při teplotě nad 100°C (za normálního tlaku) voda zůstává téměř výhradně v plynné fázi, takže můžeme páru pokládat za nosný plyn. Tak jako unáší vzduch při sušení vodu, vodní pára od tekuté směsi unáší páry nemísitelné nepolární kapaliny o podstatně vyšší teplotě varu. Relativní hmotnostní zlomek unášené látky je

$$Y_A^0 = \frac{p_A^0}{p - p_A^0} \frac{M_V}{M_A}$$

kde p_A^0 je tenze par přenášené látky, M_A a M_V jsou molární hmotnosti této látky a vody. Po kondenzaci této směsi dostaneme dvousložkovou směs, oddělitelnou sedimentací. Trochu složitější vztah dostaneme pro směsi organických látek a můžeme vypočítat, jak lze vodní parou oddělit dvě nepolární látky s malou tenzí par, pokud se jejich těkavosti liší.

Úprava vzduchu, klimatizace

Pro osoby, přivyklé mírnému podnebí, je příjemná teplota okolo 25°C a relativní vlhkost okolo $\varphi=0,7$. Zvýšit teplotu otápením je běžné. V zimním období je venku podstatně nižší teplota a relativní vlhkost je okolo $\varphi=1$ (vzduch obsahující částičky mlhy má dokonce $\varphi>1$). Jeho absolutní vlhkost je však nízká. Ohřátím tohoto vzduchu na pokojovou teplotu (za konstantního Y_A) dostaneme vzduch s nepříjemně nízkou relativní vlhkostí φ .

(Tomu se bráníme např. umístěním odpařováků nebo pokojových rostlin do místnosti.)

V teplejším období reguluje tělo svou teplotu odpařováním (pocení, vyplazený jazyk u psů) pokud ovšem má okolní vzduch nižší relativní vlhkost.

(Člověk snese poměrně vysokou teplotu suchého vzduchu – např. v sauně. Při pocení v suchém vzduchu dochází přímo k odpařování a není je patrně vylučování kapek; stejně však je potřeba kapalinu doplňovat.

Obyvatelé Sahary se důkladně oblékají, protože snášejí lépe vyšší teplotu než ztrátu vody.

Některé tělesné orgány pracují správně jen při nižší teplotě; proto pánové nemají trvale nosit těsné slipy.)

Při zvýšené teplotě vzduchu je vhodné snížit jeho vlhkost. Chlazením vlhkého vzduchu se můžeme dostat na teplotu rosného bodu a dalším chlazením vlhkost kondenzuje a vzduch zůstává nasycen, přičemž klesá současně teplota T , absolutní vlhkost $Y_A(T)$ i entalpie I . K chlazení používáme v tropickém, subtropickém i v mírném podnebním pásmu především strojního chlazení (stejně jako v lednicích).

Ke chlazení vzduchu a snížení jeho teploty je možno použít i chladné vody. Paradoxně, nasycený vzduch v těsné blízkosti studené vody může mít absolutní vlhkost $Y_A(T)$ nižší než vlhkost nenasyčeného vzduchu v dalším okolí.

V suchých, horkých krajinách je možno dosáhnout příjemného prostředí vlhčením vzduchu (vodotrysky). Odpařováním vody do vzduchu se posunuje vlhkost a teplota ve směru k podmínkám vlhkého teploměru. Při vysoké vlhkosti vzduchu (v tropech) voda k chlazení nepomůže.

Chlazení vody odparem do vzduchu

Velké procesní technologie (energetika, chemie, metalurgie) obvykle používají ve velké míře procesů přenosu tepla, přičemž k chlazení tradičně používají vodu. Pokud je v blízkosti řeka s velkým průtokem, dá se k chlazení využít; není však možné řeky ohřívát nad určitou normu, k čemuž by došlo, kdyby odběr vody činil významný zlomek celkového průtoku. Oteplenou vodu tedy je nutno chladit a problémy nastávají především v letní sezóně, kdy o odpadní teplo na úrovni teplot okolo 50°C nejsou zájemci. V takovém případě lze teplo z vody odnést odpařovanou vlhkostí.

(Na stejném principu je foukání do horké polévky. Jakto, že dýcháním na ruce je můžeme ohřát?

Jak jsme se zmínili výše, při styku většího množství vzduchu s vodou se teplota na styku mezi vodou a vzduchem posunuje k teplotě vlhkého teploměru T_W , odpovídající vlhkosti vzduchu Y_A . Teplota T_W je nezávislá na vstupní teplotě T_{V0} kapaliny. V ideálním protiproudém případě by mohla voda odtékat

s teplotou vlhkého teploměru vstupního vzduchu a vzduch by odcházel nasycený při teplotě vstupní vody. Stejně jako při sušení je pro rychlost odpařování podstatná plocha styku vzduchu s vodou a tloušťka vrstvy vody. Proto se ofukuje vzduchem voda rozstříkovaná do kapek a při pádu zdržovaných strukturovanými mřížovými výplněmi, po nichž stéká voda v tenké vrstvě proti proudu vzduchu. Množství tepla, které voda může maximálně ztratit je

$$Q' = m'_V c_{PV} (T_{V0} - T_W)$$

a příslušný minimální průtok vzduchu je přitom

$$m'_G = \frac{Q'}{\Delta h_{\text{výp}} (Y_W - Y_A)}$$

Profukování vzduchu přes vodu rozstříkovanou a dále stékající po výplni můžeme zajistit ventilátory. S tím se běžně setkáváme v chemickém průmyslu (Obr. 5.33). Největší chladicí zařízení v energetice ale využívají k protahování vzduchu skrápěnou výplň volné konvekce: vlhký teplý vzduch má totiž menší hustotu než vzduch suchý.

Ověřte si toto tvrzení dosazením do stavové rovnice směsi ideálních plynů. Obvyklým mylným předpokladem je, že si jako vlhký vzduch představujeme mlhu s těžšími kapénkami vody.

Těžší mlha („kouř“) vzniká až při rozptylování vlhkého vzduchu do chladnějšího prostředí nad věží. Aby bylo dosaženo dostatečného tahu, staví se nad několikametrovou sprchovanou výplň jako „komín“ i přes 100 m vysoké **chladicí věže** (Obr. 5.34). Tyto věže, konstruované ze statických důvodů jako rotační hyperboloidy, obvykle ze skořepinového betonu, jsou typické pro velké energetické komplexy; stojí na pilířích nad vanou, sbírající ochlazenou vodu a chladicí vzduch je přisáván z boku mezi těmito pilíři (Obr. 5.35).



Obr. 5.33. Energeticky náročnější avšak prostorově menší chladiče mají v kratších komínech umístěny vrtulové ventilátory.



Obr. 5.34. Elektrárna Dětmarovice. Chladicí věže



Obr. 5.35. Detail pilířů chladicí věže; za nimi voda stékající z výplně

Protože vody odparem stále ubývá, zvyšuje se ve vodě koncentrace solí, které zvyšují riziko koroze a mohou tvořit úsady na teplosměnných plochách, takže je nutno vodu v okruhu nejen doplňovat, ale i částečně obměňovat.



Pojmy k zapamatování

Vlhký vzduch, tenze par, absolutní vlhkost, rovnovážná vlhkost

Relativní vlhkost, rosný bod, teplota vlhkého teploměru

Sušení, konvekční sušení vzduchem, kalcinace

Rovnovážná vlhkost, fáze sušení porézních materiálů**Kalorifer, granulace****Klimatizace, chladicí věže****Příklady****Příklad 5.2.****Rosný bod a parciální tlak vodní páry**

Jaká je teplota rosného bodu a parciální tlak vodní páry ve vzduchu, který má teplotu 70°C a teplotu vlhkého teploměru 42°C ?

Úvod

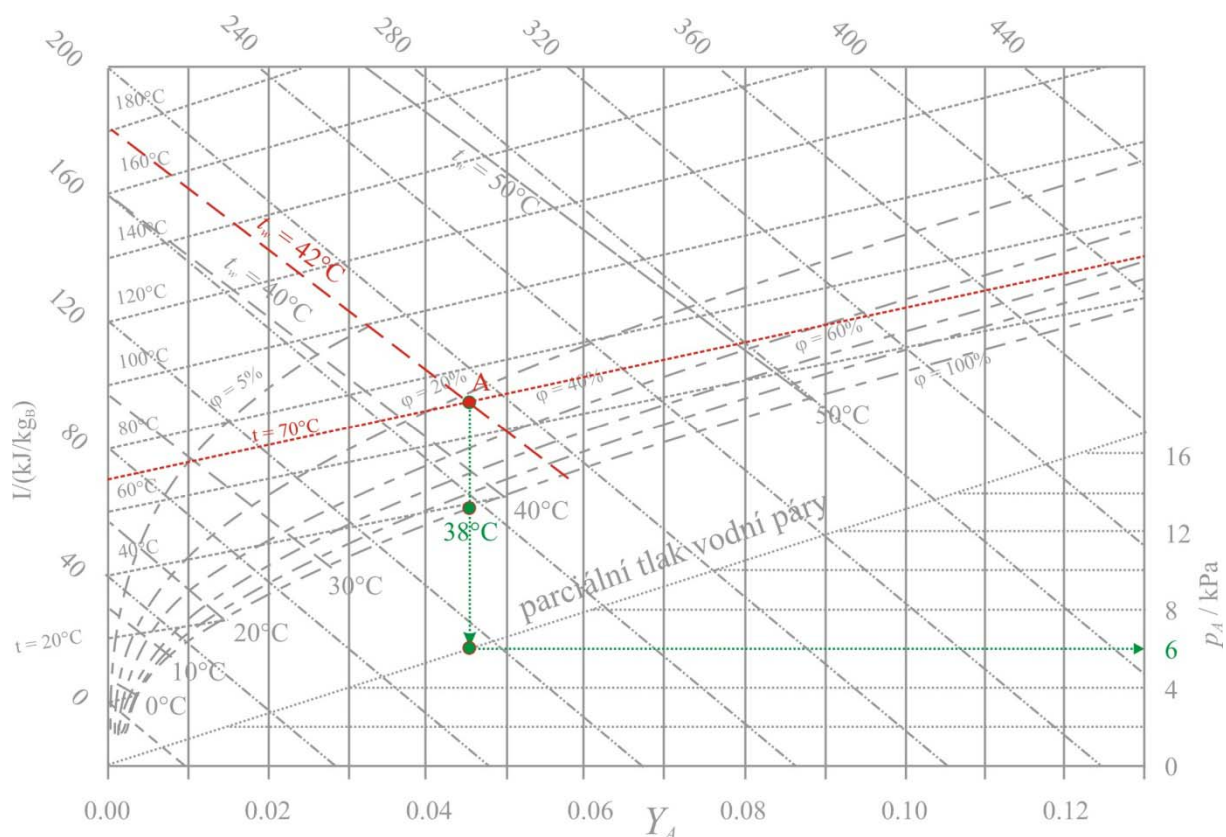
Sušení je trojnožková jednotková operace. Obvyklé označení bilančně významných složek je následující A – vlhkost, B – Suchý vzduch, C – suchý materiál. Klíčovou pomůckou při popisu sušení je entalpický diagram vlhkého vzduchu, viz kapitola **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** V diagramu jsou obsaženy informace o relativní vlhkosti vzduchu φ , teplotě t , teplotě vlhkého teploměru t_w , parciálním tlaku vodní páry p_A a relativní měrné entalpii vlhkého vzduchu I v závislosti na relativním hmotnostním zlomku vlhkosti Y .

Postup: V diagramu vlhkého vzduchu nalezneme průsečík čáry teploty 70°C a čáry teploty vlhkého teploměru 42°C . V diagramu označeno červeně. Teplota rosného bodu vzduchu o daném relativním hmotnostním zlomku vlhkosti Y , odpovídá teplotě vlhkého teploměru t_w při 100% relativní vlhkosti φ . Takovou teplotu nalezneme následujícím způsobem:

Z průsečíku $t = 70^{\circ}\text{C}$ a $t_w = 42^{\circ}\text{C}$ spustíme kolmici k ose Y . V místě kde tato kolmice protne čáru $\varphi = 100\%$ relativní vlhkosti odečteme teplotu rosného bodu jako teplotu vlhkého teploměru.

Parciální tlak vodní páry nalezneme jako průsečík stejné kolmice jako v případě rosného bodu s čárou parciálního tlaku vodní páry. Hodnotu tlaku odečteme na tlakové ose diagramu vpravo. Postup je naznačen na obrázku, když hledaný průsečík zadaných hodnot je naznačen červeně a dílčí kroky vedoucí k nalezení teploty rosného bodu a parciálního tlaku vodní páry zeleně.

Odečtení z diagramu:



Odpověď: Teplota rosného bodu za daných podmínek je 38°C a parciální tlak vodní páry je 6 kPa .

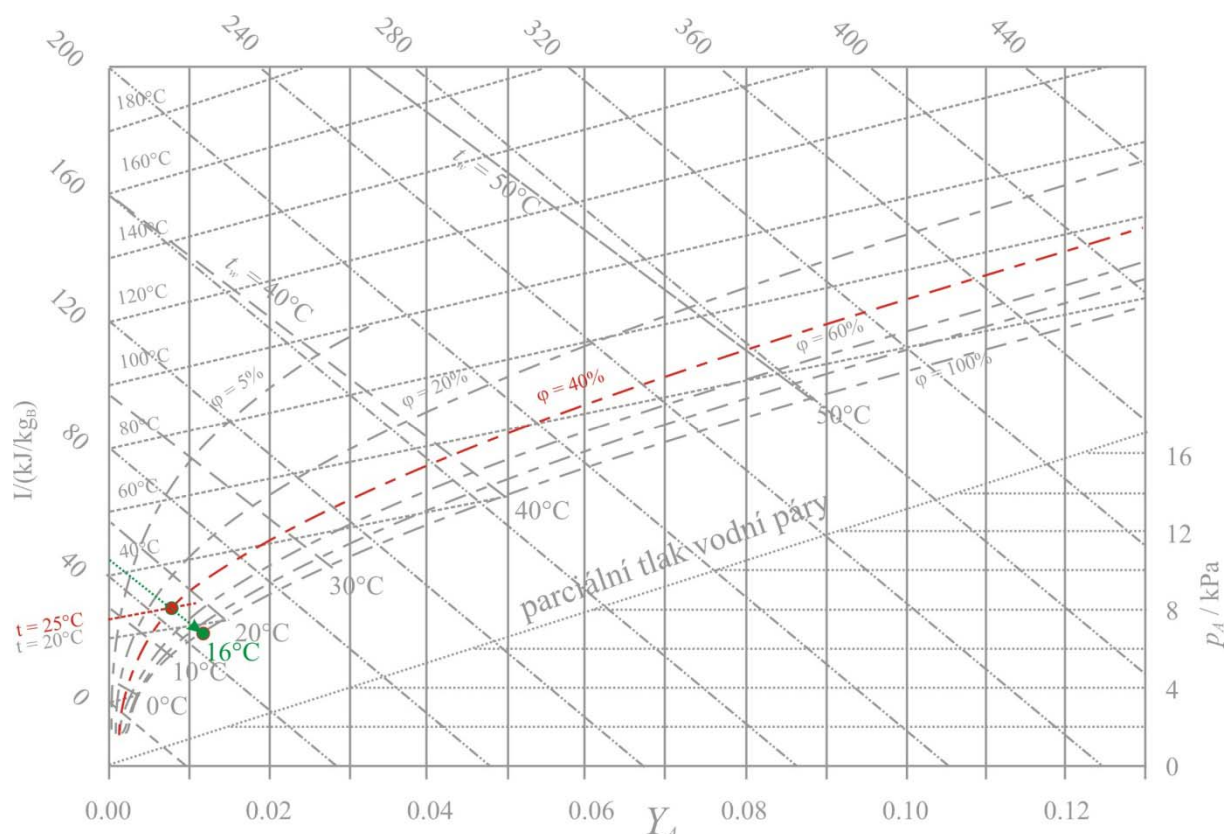
Příklad 5.3.

Teplota vlhkého teploměru

Na jakou nejnižší teplotu je možno ochladit kapalinu v lahvi, obalíme-li láhev vlhkou tkaninou a proudí-li kolem ní dostatečnou rychlostí vzduch o teplotě 25°C a relativní vlhkosti 40% .

Postup: Z popisu situace vyplývá, že hledaná nejnižší teplota odpovídá hodnotě teploty vlhkého teploměru. Tuto teplotu pro vzduch zadaných parametrů nalezneme následujícím způsobem: Nejprve nalezneme průsečík čáry relativní vlhkosti $\phi = 40\%$ s čarou teploty $t = 25^\circ\text{C}$. Tento je v diagramu označen červeně. Poté vedeme bodem rovnoběžku s čarami teploty vlhkého teploměru. V místě kde tato rovnoběžka protne čáru relativní vlhkosti $\phi = 100\%$, odečteme teplotu vlhkého teploměru. Bod je označen zeleně.

Odečtení z diagramu:



Odpověď: Kapalinu v lahvi je možno ochladit nejnižší na 16°C. Tuto teplotu nalezneme jako teplotu vlhkého teploměru v entalpickém diagramu vlhkého vzduchu pro kolem proudící vzduch zadaných parametrů.

Příklad 5.4.

Spotřeba tepla na ohřátí vzduchu

Vzduch, jehož teplota rosného bodu je 16°C, se ohřeje v kaloriferu z 26°C na 82°C. Vypočítejte spotřebu energie v kaloriferu na jednotkovou hmotnost suchého vzduchu.

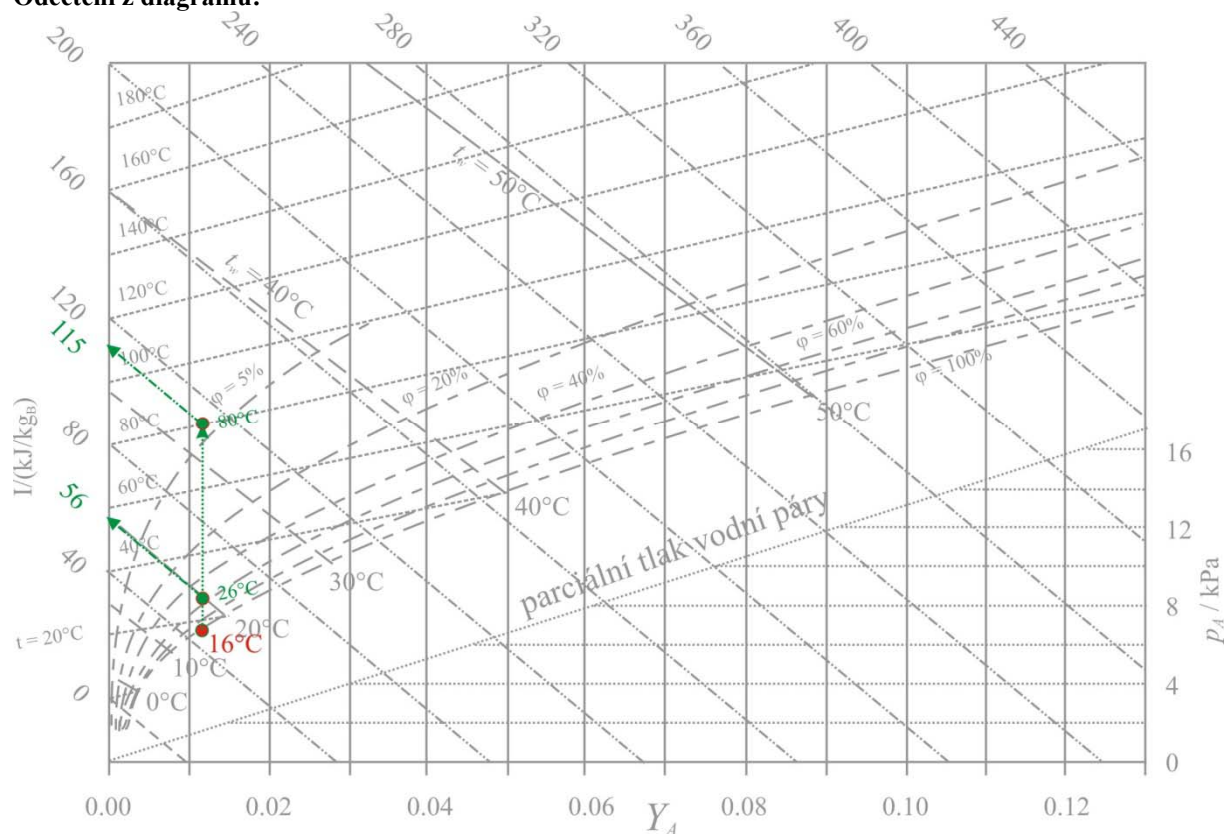
Postup: Pro zadané parametry procesu nalezneme relativní měrné entalpie vzduchu při vstupní I_i a výstupní teplotě I_e . Zapišeme entalpickou bilanci kaloriferu a stanovíme potřebné teplo na jednotkovou hmotnost vzduchu.

Teplotu rosného bodu nalezneme jako průsečík $t_w = 16^\circ\text{C}$ a $\varphi = 100\%$, je označena červeně. Z průsečíku vedeme kolmici k ose Y směrem k vyšším teplotám. Nalezneme průsečíky kolmice s čarami $t = 26^\circ\text{C}$ a $t = 82^\circ\text{C}$ což jsou vstupní a výstupní teplota vzduchu v procesu.

Vedeme rovnoběžku s čarami konstantní entalpie směrem k entalpické ose a odečteme hodnoty entalpie I_i a I_e . Tyto pak dosadíme do entalpické bilance sušárny.

Entalpická bilance kaloriferu: $\dot{m}_B I_i + Q = \dot{m}_B I_e$

Odečtení z diagramu:



Výpočet

Z diagramu jsme odečetli $I_i = 56 \text{ kJ/Kg}$ a $I_e = 115 \text{ kJ/Kg}$

Entalpickou bilanci sušárny upravíme na tvar: $\frac{Q}{m_B} = I_e - I_i = 115 - 56 = 59 \text{ kJ/kg}$

Odpověď: Spotřeba energie v kaloriferu při daných podmínkách je 59 kJ na 1kg vzduchu.

Rozpustnost plynů v kapalině, absorpce



Čas ke studiu: 1,5 hodin



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- zopakovat zásady rovnováhy při rozpouštění plynu v kapalinách
- popsat principy absorpce, desorpce rozpuštěného plynu
- porovnat vhodnost kolonových zařízení pro destilaci a absorpci



Výklad

□ Rozpustnost plynů v kapalině, absorpce

□ Fyzikálně chemický základ

Rozpustnost plynů v kapalině bývá poměrně malá a za těchto podmínek se dá většinou přijmout platnost **Henryho zákona**: v rovnováze je koncentrace plynu, rozpuštěného v kapalině přímo úměrná parciálnímu tlaku tohoto plynu nad kapalinou. Konstanta H_A úměrnosti ve vztahu

$$p_A = H_A x_A$$

má rozměr tlaku a nazývá se Henryho konstanta.

Pozn.: jazykovědci v poslední době dávají přednost tvaru Henryův zákon, Henryova konstanta. Protože rozpuštěný plyn má kapalně skupenství, je rozpouštění plynů (stejně jako kondenzace) exotermní proces a podle le Chatelierova principu se tedy plyny rozpouštějí při vyšší teplotě hůře (H_A je větší). Rozpustnost plynů samozřejmě závisí i na povaze plynu a rozpouštědla; lepší rozpustnost lze očekávat mají-li molekuly těchto látek schopnost vytvářet nějaké vzájemné vazby.

Pro rozpouštění plynů ve vodě při 20°C je přibližně:

plyn	He	N ₂	O ₂	CH ₄	CO ₂	H ₂ S	SO ₂	NH ₃
H_A , MPa	12500	8040	4010	3800	140	50	15	0,08

Pro závislost rozpustnosti kyslíku ve vodě na teplotě je přibližně:

teplota °C	0	10	20	30	40	60	80
H_A , MPa	2480	3220	4010	4810	5760	7670	10700

Také můžeme nalézt další způsoby vyjádření rozpustnosti jako např.

- 9.3 g O₂/m³ vody 20°C v rovnováze se vzduchem za normálního tlaku;
- 0,29 mol O₂/m³ vody 20°C v rovnováze se vzduchem za normálního tlaku;
- 0.0065 norm.m³ O₂/m³ vody 20°C v rovnováze se vzduchem za normálního tlaku;
- 0.031 norm.m³ O₂/m³ vody 20°C v rovnováze s O₂ za normálního tlaku;

Pozor! Rozpouštění víceatomových plynů (vodík, dusík, atd.) v **kovech** (roztavených i pevných) není obvykle čistě fyzikálním procesem řízeným lineárním Henryho zákonem; hlavním řídicím dějem je zde disociace molekul plynu. Příslušný rovnovážný vztah se označuje jako zákon Sievertův!

Rozpustnosti plynů v kapalinách využíváme v řadě procesů, ve kterých obecně máme tři složky A, B a C, přičemž B (nosný plyn) se vyskytuje prakticky jen v plynné fázi, C prakticky jen v kapalně fázi a aktivní složka A přechází z jedné fáze do druhé:

□ Syčení kapaliny plynem (absorpce)

Cílem je přenést složku A z plynné fáze do kapalné fáze rozpuštěním A v C:

sycení odpadních vod vzduchem (aktivace) pro udržení funkce oživeného kalu v ČOV, sycení fermentačního substrátu kyslíkem pro aerobní fermentace (výroba penicilinu), sycení kyselinových břeček amoniakem pro neutralizaci (výroba minerálních hnojiv), pohlcování SO_3 do zředěné H_2SO_4 , chlorování vody plynným chlorem, sycení sladkých nápojů tlakovým oxidem uhličitým pro konzervaci

Účelem může být i **vypírání plynu kapalinou**; v tomto případě je plynem směs A a B.

oddělování oxidu uhličitého od vodíku vypíráním do alkalického roztoku, oddělování amoniaku z koksárenských plynů do kyselého roztoku, oddělování uhlovodíků z plynů vypíráním do netěkavého praciho oleje. Můžeme sem přiřadit i již zmíněné snižování vlhkosti vzduchu stykem se studenou vodou.

□ Vypuzování plynu z kapaliny (desorpce, stripování)

Cílem je odvádět složku A z kapalné směsi s C do plynné fáze:

odstraňování rozpuštěných plynů z roztavené oceli do proudu argonu, odstraňování nezreagovaného monomeru z polystyrenu pod vakuem, napěňování polystyrenu rozpuštěným propanem po zvýšení teploty, napěňování šlehačky rozpuštěným tlakovým N_2O po odtlakování, větrání piva a sodovky, uvolňování bublinek vzduchu ze zahřáté pitné vody, uvolňování bublinek dusíků z krve potápěčů při vynořování.

Účelem může být i **sycení plynu parami kapaliny**; v tomto případě se přenáší složka A z kapaliny do plynné směsi A s B:

Vlhčení vzduchu, odpařování benzinu do proudu vzduchu v automobilním karburátoru, voňavky.

Pro tyto procesy používáme vhodné metody kontaktování plynu s kapalinou.

Někdy postačuje k žádoucímu výsledku jednostupňový kontakt (**pračka**, **rozprašovač** kapaliny, probublávání), velmi často je zájem dostat maximální koncentrace přenášené složky v jedné vystupující fázi a minimální v druhé fázi. V takovémto případě je vhodné protiproudné uspořádání zařízení ve více stupních nebo v **kolonách**. Dělicí schopnost zařízení lze při zvoleném režimu charakterizovat objemovým součinitelem průchodu hmoty $K_L a$. Jinak teoretický stupeň nebo teoretické patro, se přisuzuje takové části zařízení, ze které odchází kapalina a plyn v rovnováze ve smyslu Henryho zákona. Návrh absorpční kolony se neliší zásadně od kolony destilační. Typickým případem je zde spíše absorpce s kontaktováním velkého objemu nízkotlakého plynu a menšího objemu kapaliny, pro což se hodí **kolony s výplní** (Tlaková ztráta při průtoku plynu zde totiž může být podstatně menší než v kolonách s probublávanou vrstvou kapaliny na patrech).



Stavba absorpční kolony pro 645 000 m³/h plynu, průměr 5,4 m, výška 62 m (Sasol, Jihoafr. Rep.)



Pojmy k zapamatování

Henryho zákon

Absorpce, desorpce

Pračka plynu, absorpční kolona