

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická

Řešení chemicko-inženýrských úloh pomocí tabulkových kalkulátorů:
Absorpce binárních směsí

Jarmila Češková

2014

University of Pardubice
Faculty of chemical technology

Solving chemical-engineering problems using spreadsheet programs:
Absorption of binary systems

Jarmila Češková

2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jarmila Češková**
Osobní číslo: **C11052**
Studijní program: **B2802 Chemie a technická chemie**
Studijní obor: **Chemie a technická chemie**
Název tématu: **Řešení chemicko-inženýrských úloh pomocí tabulkových kalkulátorů: Absorpce binárních směsí**
Zadávací katedra: **Ústav environmentálního a chemického inženýrství**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Provedte literární rešerši týkající se problematiky řešení absorpce binárních směsí se spojitým a stupňovým stykem fází a metody řešení popište v teoretické části práce.
2. Zaměřte se na problematiku řešení izotermní absorpce pro netěkavý absorbent a pohlcování jediné složky z plynné fáze.
3. Navrhněte způsoby aproximace rovnovážných dat binárních systémů pro využití v tabulkových kalkulátorech (Excel, OpenOffice Calc apod.).
4. Ve vybraném tabulkovém kalkulátoru vytvořte postupy pro
 - výpočet celkové bilance absorbéru,
 - sestrojení rovnovážného grafu,
 - výpočet rozměrů absorpční kolony či počtu teoretických pater.
5. Vytvořené algoritmy prezentujte na konkrétních příkladech .
6. Bakalářskou práci zpracujte v souladu se Směrnicí UPa č. 9/2012 "Pravidla pro zveřejňování závěrečných prací a jejich základní jednotnou formální úpravu".

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Bedřich Šiška, CSc.

Ústav environmentálního a chemického inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

20. ledna 2014

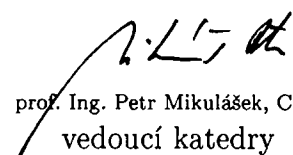
Termín odevzdání bakalářské práce:

18. července 2014



prof. Ing. Petr Lošťák, DrSc.
děkan

L.S.



prof. Ing. Petr Mikulášek, CSc.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 20. ledna 2014

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně

V Pardubicích dne

Jarmila Češková

PODĚKOVÁNÍ:

Tímto bych ráda poděkovala svému vedoucímu práce Ing. Bedřichu Šiškovi, CSc. za jeho odbornou pomoc, poskytnuté materiály, cenné rady a spoustu trpělivosti, které mi umožnily zpracování bakalářské práce.

ANOTACE

Tato práce se zabývá řešením celkové bilance absorpce binárních směsí se spojitým a stupňovitým stykem fází a výpočtu rozměrů absorpční kolony či počtu teoretických pater pomocí programu Microsoft Excel.

KLÍČOVÁ SLOVA

Absorpce, Microsoft Excel, Chemické inženýrství

ANNOTATION

This work concerned solution of general balance binary systems with continual contact of phase and with stepwise contact of phase and calculation dimension of absorber or calculation number of theoretical stage by using program Microsoft Excel.

KEYWORDS

Absorption, Microsoft Excel, Chemical engineering

OBSAH

1	Úvod.....	11
2	Absorpce	12
2.1	Absorpce – teoretické základy	12
2.2	Látková bilance	13
2.2.1	Obecná látková bilance	13
2.2.2	Látková bilance pomocí relativních koncentrací	15
2.3	Rovnováha při absorpci.....	16
2.4	Rovnice pracovní čáry, přímky	17
3	Výpočet základních rozměrů absorbérů	20
3.1	Absorbéry se spojitým stykem fází	20
3.1.1	Stanovení výšky absorbéru integrace základní rovnice, když je součinitel prostupu hmoty konstantní.....	22
3.1.2	Stanovení výšky absorbéru na základě analyticky vyjádřené hnací síly lineárním vztahem	22
3.2	Absorbéry se stupňovitým stykem fází	25
3.2.1	Grafická metoda.....	25
3.2.2	Modifikovaná grafická metoda	27
3.2.3	Metoda absorpčního faktoru	29
4	Řešení úloh pomocí tabulkového kalkulátoru excel.....	32
4.1	Aproximace rovnovážných dat	32
4.2	Celková bilance	35
4.3	Postup zadávání do výpočetních listů	35
4.4	Praktická aplikace uvedených řešení	37
4.4.1	Celková bilance.....	37
4.4.2	Absorbér se spojitým stykem fází.....	38
4.4.3	Absorbér se stupňovitým stykem fází.....	40

5	Závěr	44
6	Použitá literatura	45
7	Elektronické přílohy	45

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr. 2-1: Obecné schéma protiproudé absorpce s označením proudů plynu a kapaliny a jejich koncentracích.	13
Obr. 2-2: Rovnovážná křivka a součinitele fázové rovnováhy.....	17
Obr. 2-3: Průběh pracovní čáry při protiproudé absorpci v diagramu $y_A(x_A)$	18
Obr. 2-4: Pracovní přímka při protiproudé absorpci v diagramu $Y_A(X_A)$	19
Obr. 2-5: Polohy pracovních přímek při a) minimální spotřebě rozpouštědla, b) maximální spotřebě rozpouštědla	19
Obr. 2-6: Poloha pracovní přímky při konkávním průběhu při minimální spotřebě rozpouštědla.	20
Obr. 3-1: Schéma protiproudé absorpce se spojitým stykem fází, s označením proudů plynu a kapaliny.....	21
Obr. 3-2: Obecné schéma protiproudé absorpce se stupňovitým stykem fází, s označením proudů plynu a kapaliny a s vyznačením m -tého patra kolony.....	25
Obr. 3-3: Stanovení počtu rovnovážných stupňů protiproudého vícestupňového absorberu grafickou metodou	27
Obr. 4-1: Graf rovnovážné křivky systému aceton – H ₂ O při teplotě 20 °C vytvořenou pomocí náhradní funkce.....	34
Obr. 4-2: Graf rovnovážné křivky systému NH ₃ – H ₂ O při teplotě 20 °C vytvořenou pomocí funkce spojnice trendu.	34
Obr. 4-3: Výpočetní list pro celkovou bilanci	37
Obr. 4-4: Závislost koncentrace pohlcované složky v plynné fázi na složení pohlcované složky v kapalně fázi.....	39
Obr. 4-5: Výpočetní list pro výpočet rozměrů kolony integrací základní rovnice	39
Obr. 4-6: Výpočetní list pro výpočet rozměrů kolony metodou střední hnací síly	40
Obr. 4-7: Výpočetní list pro výpočet počtu teoretických pater kolony metodou absorpčního faktoru.....	41
Obr. 4-8: Graf rovnovážné křivky a pracovní čáry s vyjádřením počtu rovnovážných stupňů při absorpci.	42
Obr. 4-9: Výpočetní list pro výpočet počtu teoretických pater kolony modifikovanou grafickou metodou	43

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

\dot{n}	látkový tok	[mol]
\dot{m}	hmotnostní tok	[kg]
\dot{V}	objemový průtok	[m ³ /s]
y	molový zlomek v plynu	[-]
x	molový zlomek složky v kapalině	[-]
y'	hmotnostní zlomek v plynu	[-]
x'	hmotnostní zlomek složky v kapalině	[-]
Y	relativní molový zlomek v plynu	[-]
X	relativní molový zlomek složky v kapalině	[-]
Y'	relativní hmotnostní zlomek v plynu	[-]
X'	relativní hmotnostní zlomek složky v kapalině	[-]
p	tlak	[Pa]
c	molární koncentrace	[mol/dm ³]
T	teplota	[K]
Ψ	součinitel fázové rovnováhy daný rovnicí (2-15)	[-]
m	součinitel fázové rovnováhy daný rovnicí (2-16)	[-]
K_p	úhrnný součinitel prostupu hmoty vyjádřený v plynné fázi	[kmol/(m ² .h.Pa)]
a	měrný mezifázový povrch	[m]
u_G	rychlost plynu	[m/s]
A	absorpční faktor	[-]
φ	absorpční účinek	[-]
N	počet pater	[-]
V	objem náplně	[m ³]
S	plocha kolony	[m ²]
Z	výška kolony	[m]
d	průměr kolony	[m]
R	univerzální plynová konstanta	[J/(K.mol)]
M	molární hmotnost	[kg/kmol]

INDEXY

A	pohlcovaná složka
G	plynná fáze
L	kapalná fáze

I inert
R čisté rozpouštědlo
* rovnovážné údaje

1 ÚVOD

Práce se zabývá řešením absorpčních úloh pomocí tabulkových kalkulačků, konkrétně s využitím programu Microsoft Excel a jeho softwarových prostředků, především k využití ke studijním účelům. Vlastní řešení absorpce se zaměřuje na úlohy protiproudé absorpce binárních směsí se spojitým a stupňovitým stykem fází, při izotermní absorpci s netěkavým absorbentem a pohlcování jediné složky z plynné fáze. Při řešení absorpčních úloh jde především o stanovení celkové bilance absorbéru a zjištění rozměrů absorpční kolony či počtu pater kolony, tak aby bylo dosaženo požadovaného účinku.

Práce je rozdělena do několika kapitol, kdy v první kapitole je uveden obecný popis absorpce, látkové bilance a rovnovážných údajů pro systémy plyn – kapalina. V další kapitole jsou uvedeny základní vztahy pro výpočty rozměrů či zjištění počtu pater absorbérů.

Poslední kapitola se věnuje řešením absorpčních úloh a jsou zde uvedeny aplikace zvolených postupů výpočtu na příkladech. Absorpční úlohy se běžně řeší na seminářích ručně, graficky, pomocí milimetrového papíru. Při tomto způsobu řešení závisí výsledky na přesnosti rýsování a správném odečítání potřebných hodnot. Jelikož se jedná o značně časově náročný postup, který je závislý na přesnosti rýsování, cílem této práce tedy bylo nalézt modifikovaný způsob grafického řešení absorpčních úloh za pomoci softwarových prostředků programu Excel. Dále se vytvořily postupy pro řešení absorpčních úloh jako celková bilance, metoda absorpčního faktoru či metoda střední hnací síly.

2 ABSORPCE

2.1 ABSORPCE – TEORETICKÉ ZÁKLADY

Absorpce je separační difuzní operace sloužící k rozdělování plynných směsí. Rozdělování je založeno na rozdílné rozpustnosti plynných složek směsi v rozpouštědle, kdy přivádíme plynnou směs do styku s kapalinou. Absorpci lze tak charakterizovat jako pohlcování plynu kapalinou, ve které jsou některé složky plynu rozpustné a jiné jsou prakticky nerozpustné a chovají se vůči kapalině inertně. Plynnou směs tedy dělíme na složky pohlcované a inertní a rozpouštědlo, které označujeme jako absorbent. Separace složek je tedy podmíněna různou rozpustností složek plynné směsi v absorbentu.[2], [3]

Absorpci můžeme rozdělit na dva základní druhy a to jednoduchou (fyzikální) absorpci, při níž probíhá pouze difuze, kde nedochází k úplnému pohlcení plynné složky a k pohlcování dochází pouze do té doby, než se vyrovná parciální tlak pohlcované složky v plynné fázi s jejím tlakem nad absorbentem (pohlcování vlhkost ze zemního plynu). Druhým typem je absorpce spojená s chemickou reakcí, při níž pohlcovaná složka reaguje s absorbentem a její tlak nad kapalinou je v některých případech zanedbatelný a tedy může dojít až k úplnému pohlcení separované složky plynu (např. absorpce CO_2 ve vodných roztocích ethanolaminu).

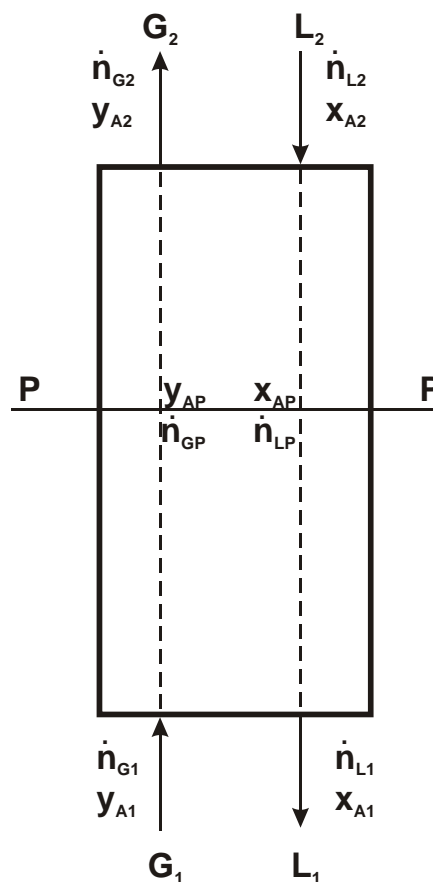
Absorpce je v chemické technologii důležitým procesem používaným pro získávání cenných složek ze směsi plynu, odstraňování nežádoucích složek směsi nebo získávání kapalných roztoků obohacených o chtěnou složku [1].

Zařízení používaná pro absorpci se nazývají absorbéry. Množství absorbovaných složek v jednotkovém čase a objemu absorbéro je tím větší, čím je větší povrch styku plynu s kapalinou v tomto objemu a čím je větší rychlost absorpce dané složky. Základní dělení absorbéro dle toku fází je na souprouté nebo protiprouté uspořádání. Souprouté uspořádání se používá pouze zřídka. Další dělení je podle druhu styku fází. V prvním typu se plyn pohlcuje ve vrstvě kapaliny (absorbéry se skrápěnou stěnou, věže s výplní), v dalším se plyn rozptyluje ve formě bublin v kapalině (patrové věže) a ve třetím typu absorbéro se rozptylují kapky absorbentu do plynné fáze (sprchové absorbéry) [3]. Tato práce se zabývá prvním a druhým typem absorbéro v protiproutém uspořádání při izotermní absorpci a netěkavém

absorbentu, kdy se pohlcuje jen jedna plynná složka směsi bez chemické reakce mezi pohlcovanou složkou a absorbentem.

2.2 LÁTKOVÁ BILANCE

Množství a koncentrace pohlcované složky v proudech jsou vázány látkovou bilancí a tudíž ze tří známých proudů je možno určit čtvrtý. Zároveň musíme respektovat rovnovážné poměry a podle nich určit podmínky absorpce. V průběhu absorpce se množství pohlcované složky v plynné směsi zmenšuje a zvětšuje se množství v kapalně fázi, díky převodu hmoty přes fázové rozhraní.[1], [3]



Obr. 2-1: Obecné schéma protiproudé absorpce s označením proudů plynu a kapaliny a jejich koncentracích.

2.2.1 OBECNÁ LÁTKOVÁ BILANCE

Látková bilance pro pohlcovanou složku A je pro protiproudé uspořádání zobrazeném na obr. 2-1. Označí-li se průřezy absorbéru na vstupu plynné směsi do absorbéru a na výstupu plynné směsi z absorbéru indexy 1 a 2, lze psát pro složkovou bilanci vztah:

$$\dot{n}_{G1}y_{A1} + \dot{n}_{L2}x_{A2} = \dot{n}_{L1}x_{A1} + \dot{n}_{G2}y_{A2} \quad (2-1)$$

kde \dot{n} ...látkový tok plynu resp. kapaliny (\dot{n}_G resp. \dot{n}_L),

y_A ...molový zlomek složky A v plynu,

x_A ...molový zlomek složky A v kapalině.

Pro rychlost absorpce složky A, kterou lze vyjádřit látkovým tokem \dot{n}_A , lze pak z rovnice (2-1) vyjádřit vztah

$$\dot{n}_A = \dot{n}_{G1}y_{A1} - \dot{n}_{G2}y_{A2} = \dot{n}_{L1}x_{A1} - \dot{n}_{L2}x_{A2} \quad (2-2)$$

Vztah mezi toky fází je na základě celkové bilance proudů dán výrazem

$$\dot{n}_{G1} - \dot{n}_{G2} = \dot{n}_{L1} - \dot{n}_{L2} \quad (2-3)$$

Podle toho jak bude vyjádřeno složení toků, můžeme bilanční rovnice vyjadřovat i jiným způsobem, tak že můžeme nahradit látkové toky za hmotnostní. Vyjádření rovnic s hmotnostními toky je následující

$$\dot{m}_{G1} - \dot{m}_{G2} = \dot{m}_{L1} - \dot{m}_{L2} \quad (2-4)$$

$$\dot{m}_{G1}y'_{A1} - \dot{m}_{G2}y'_{A2} = \dot{m}_{L1}x'_{A1} - \dot{m}_{L2}x'_{A2} \quad (2-5)$$

kde \dot{m} ...hmotnostní tok plynu resp. kapaliny,

y'_A ...hmotnostní zlomek složky A v plynu,

x'_A ...hmotnostní zlomek složky A v kapalině.

V případě netěkavého absorbentu lze rovnici (2-3) použít i k bilancování toku pohlcované složky. Pokud se pohlcuje pouze jedna složka směsi je pak látkový tok složky A roven změně látkových toků plynu a kapaliny při průchodu absorbérem

$$\dot{n}_A = \dot{n}_{G1} - \dot{n}_{G2} = \dot{n}_{L1} - \dot{n}_{L2} \quad (2-6)$$

Z rovnic (2-2) a (2-6) pak plyne pro tok absorbované složky z plynu do kapaliny

$$\dot{n}_A = \frac{\dot{n}_{G1}(y_{A1}-y_{A2})}{1-y_{A2}} = \frac{\dot{n}_{G2}(y_{A1}-y_{A2})}{1-y_{A1}} \quad (2-7)$$

Tok absorbované složky lze vyjádřit také na základě kapalné fáze a to ve tvaru

$$\dot{n}_A = \frac{\dot{n}_{L1}(x_{A1}-x_{A2})}{1-x_{A2}} = \frac{\dot{n}_{L2}(x_{A1}-x_{A2})}{1-x_{A1}} \quad (2-8)$$

Tyto rovnice slouží ke stanovení toku pohlcované složky A, jsou-li známy průtoky fází a koncentrace plynu či kapaliny.

2.2.2 LÁTKOVÁ BILANCE POMOCÍ RELATIVNÍCH KONCENTRACÍ

Bilance se značně zjednoduší předpokladem, že látkový tok inertu (nepohlcované složky plyné směsi, které lze označit jako inertní plyn) a čistého absorbentu jsou konstantní: $\dot{n}_I = \text{kons}$ a $\dot{n}_R = \text{konst}$, a lze je považovat za spojovací látky.

Látkovou bilanci pak sestavíme s využitím uvedených spojovacích látek a zavedením relativních koncentrací. Rovnice (2-2) pak přechází na tvar

$$\dot{n}_A = \dot{n}_I(Y_{A1} - Y_{A2}) = \dot{n}_R(X_{A1} - X_{A2}) \quad (2-9)$$

Pro látkové toky inertu a čistého absorbentu platí:

$$\dot{n}_I = \dot{n}_{G1}(1 - y_{A1}) = \dot{n}_{G2}(1 - y_{A2}) \quad (2-10)$$

$$\dot{n}_R = \dot{n}_{L1}(1 - x_{A1}) = \dot{n}_{L2}(1 - x_{A2}) \quad (2-11)$$

Jsou-li známy vstupní a výstupní koncentrace proudů a hodnota průtoku inertního plynu, je hodnota \dot{n}_R na základě rovnice (2-9)

$$\dot{n}_R = \dot{n}_I \frac{Y_{A1}-Y_{A2}}{X_{A1}-X_{A2}} \Rightarrow \frac{\dot{n}_R}{\dot{n}_I} = \frac{Y_{A1}-Y_{A2}}{X_{A1}-X_{A2}} \quad (2-12)$$

Hodnota (\dot{n}_R/\dot{n}_I) je označována jako měrná spotřeba rozpouštědla.

Při použití hmotnostních toků pak pravá část rovnice přejde na tvar

$$\frac{\dot{m}_R}{\dot{m}_I} = \frac{Y'_{A1}-Y'_{A2}}{X'_{A1}-X'_{A2}} \quad (2-13)$$

kde (\dot{m}_R/\dot{m}_I) je stejně jako v předchozím případě měrná spotřeba čistého absorbentu, ale vyjádřená pro hmotnostní tok.

2.3 ROVNOVÁHA PŘI ABSORPCI

Při absorpci máme systém dvou fází tvořený plynem a kapalinou, obsahující 3 složky, tj. pohlcovanou složku, inertní plyn a rozpouštědlo. Podle Gibsova fázového pravidla má tedy systém 3 stupně volnosti. Pokud máme teplotu a tlak dány pak třetí volností může být například koncentrace pohlcované složky v plynné nebo kapalně fázi. Rovnovážné koncentrace těchto systémů jsou určovány experimentálně pro každý systém zvlášť a můžeme je najít v tabulkách nebo jsou zpracovány graficky. Tato data nejsou souhrnně vydávány, ale pro některé typy rovnovážných systémů je můžeme nalézt např. v literatuře [2] a příloze A.

Rovnovážná data můžeme rozdělit na dvě oblasti a to na údaje platné v širokém rozmezí koncentrací a na údaje platné omezeně (oblasti nízkých koncentrací). První oblast je vedena v literatuře pomocí tabulek nebo graficky. Nejčastěji jsou vyjádřené jako závislosti parciálního tlaku pohlcované složky na složení roztoku. Závislost lze vyjádřit vztahem

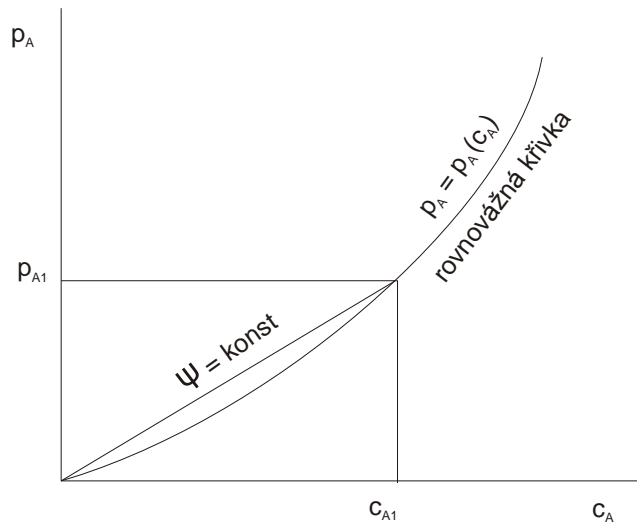
$$p_A^* = f(c_A)_{T,P} \quad (2-14)$$

kde c_A je obecná koncentrace pohlcované složky v roztoku při konstantní teplotě a tlaku. V oblasti nízkých koncentrací můžeme tyto závislosti většinou aproximovat lineární závislostí a rovnovážné údaje jsou reprezentovány pomocí součinitelů fázové rovnováhy [1].

Křivka znázorňující výše uvedené závislosti se nazývá rovnovážná. Podle povahy použitých koncentrací má různý průběh, ale její charakter je stále stejný. Pokud vyjádříme rovnovážnou křivku obecným způsobem, součinitel fázové rovnováhy kteréhokoli bodu na každém grafu (obr. 2-2) můžeme vyjádřit jako

$$\Psi_A = \frac{p_A}{c_A} \quad (2-15)$$

Pro $\Psi = konst$ je rovnovážná křivka přímkou.[2]



Obr. 2-2: Rovnovážná křivka a součinitele fázové rovnováhy

Jiné vyjádření součinitele fázové rovnováhy je

$$m = \frac{y_A}{x_A} \quad (2-16)$$

2.4 ROVNICE PRACOVNÍ ČÁRY, PŘÍMKY

Sestavíme-li bilanční rovnici pro úsek absorberu, vymezený zvoleným průřezem (obr. 2-1) a vstupem do absorberu pro pohlcovanou složku dostáváme následující vztah [1]

$$\dot{n}_{G1}y_{A1} - \dot{n}_{GP}y_{AP} = \dot{n}_{L1}x_{A1} - \dot{n}_{LP}x_{AP} \quad (2-17)$$

Při netěkavém absorbentu ($\dot{n}_R = konst$) platí

$$\dot{n}_{G1} - \dot{n}_{GP} = \dot{n}_{G1}y_{A1} - \dot{n}_{GP}y_{AP} \quad (2-18)$$

$$\dot{n}_{L1} - \dot{n}_{LP} = \dot{n}_{L1}x_{A1} - \dot{n}_{LP}x_{AP} \quad (2-19)$$

Z rovnice pak můžeme vyjádřit toky plynu a kapaliny v daném průřezu

$$\dot{n}_{GP} = \dot{n}_{G1} \frac{1-y_{A1}}{1-y_{AP}} \quad (2-20)$$

$$\dot{n}_{LP} = \dot{n}_{L1} \frac{1-x_{A1}}{1-x_{AP}} \quad (2-21)$$

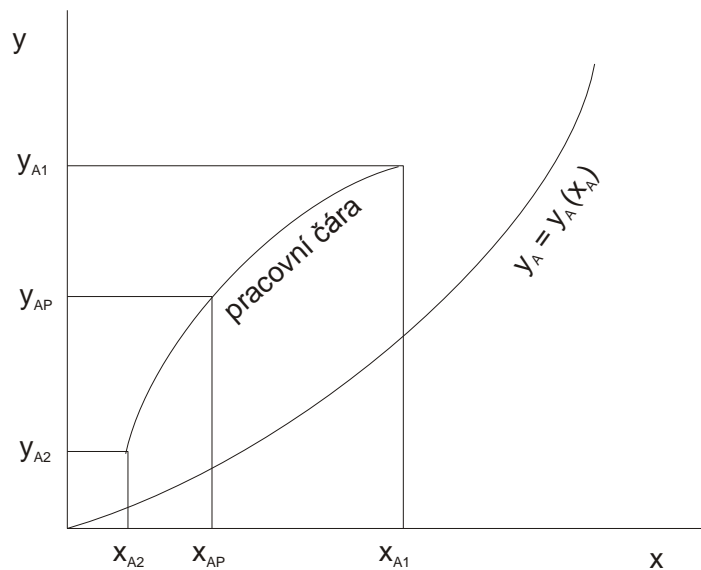
Při dosazení za hodnoty \dot{n}_{GP} a \dot{n}_{LP} do rovnice (2-17) získáme po úpravě

$$y_{AP} = \frac{(y_{A1} - \beta x_{A1}) - (y_{A1} - \beta)x_{AP}}{(1 - \beta x_{A1}) - (1 - \beta)x_{AP}} \quad (2-22)$$

Označení β znázorňuje poměr ($\dot{n}_{L1}/\dot{n}_{G1}$) na vstupu plynu do absorbéru, tedy průřez označený indexem 1. Při spojení s rovnicemi (2-10) a (2-11) pak získáme:

$$\beta = \frac{\dot{n}_{L1}}{\dot{n}_{G1}} = \frac{\dot{n}_R}{\dot{n}_I} \frac{1 - y_{A1}}{1 - x_{A1}} \quad (2-23)$$

Rovnice (2-22) je pak rovnicí pracovní čáry a vyjadřuje závislost mezi koncentracemi v proudech pohlcované složky.



Obr. 2-3: Průběh pracovní čáry při protiproudé absorpci v diagramu $y_A(x_A)$.

Pokud je koncentrace pohlcované složky nízká, můžeme zanedbat změnu toku fází při průchodu absorbérem, tak že je \dot{n}_L a \dot{n}_G konstantní v celém absorbéru pak z rovnice (2-17) dostaneme:

$$\dot{n}_A = \dot{n}_G(y_{A1} - y_{AP}) = \dot{n}_L(x_{A1} - x_{AP}) \quad (2-24)$$

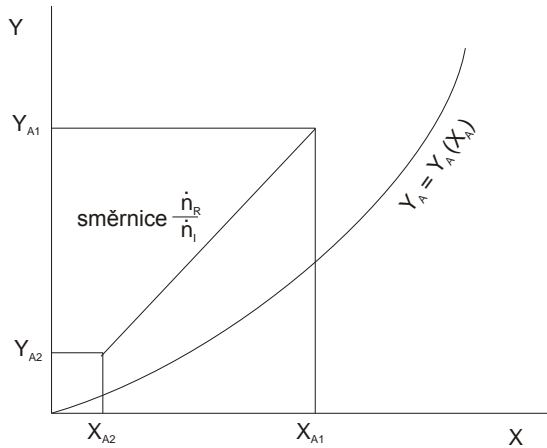
Pokud rovnici upravíme na tvar

$$(y_{A1} - y_{AP}) = \frac{\dot{n}_L}{\dot{n}_G}(x_{A1} - x_{AP}) \quad (2-25)$$

dostáváme rovnici pracovní přímky v diagramu $y_A(x_A)$. Dále pokud předpokládáme $\dot{n}_I = konst$ a $\dot{n}_R = konst$ a při zavedení relativních koncentrací dostaneme tvar rovnice pracovní přímky

$$Y_{A1} - Y_{A2} = \frac{\dot{n}_R}{\dot{n}_I} (X_{A1} - X_{A2}) \quad (2-26)$$

Za uvedených předpokladů ($\dot{n}_I = konst$ a $\dot{n}_R = konst$) je v systému $Y_A(X_A)$ vztah (2-26), jak již bylo uvedeno, rovnicí pracovní přímky a poměr (\dot{n}_R/\dot{n}_I) je jeho směrnici.

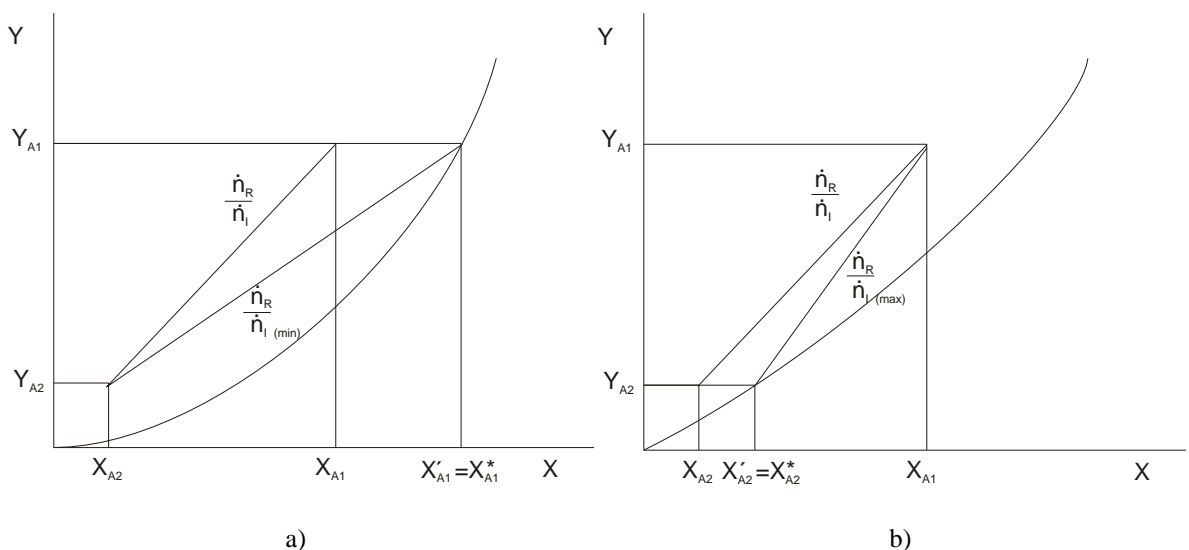


Obr 2-4: Pracovní přímka při protiproudé absorpci v diagramu $Y_A(X_A)$.

Pokud máme poměrem (\dot{n}_R/\dot{n}_I) danou měrnou spotřebu rozpouštědla musíme vymežit dva mezní případy odpovídající maximální a minimální spotřebě rozpouštědla. Mezní hodnoty těchto případů ovlivňují hodnoty v proudu kapaliny X_{A1} a X_{A2} kdy svých nejvyšších hodnot dosáhnou v rovnováze X_{A1}^* a X_{A2}^* . Tedy rovnice pro určení minimální a maximální měrné spotřeby jsou následující:

$$\left(\frac{\dot{n}_R}{\dot{n}_I}\right)_{min} = \frac{Y_{A1} - Y_{A2}}{X_{A1}^* - X_{A2}} \quad (2-27)$$

$$\left(\frac{\dot{n}_R}{\dot{n}_I}\right)_{max} = \frac{Y_{A1} - Y_{A2}}{X_{A1} - X_{A2}^*} \quad (2-28)$$



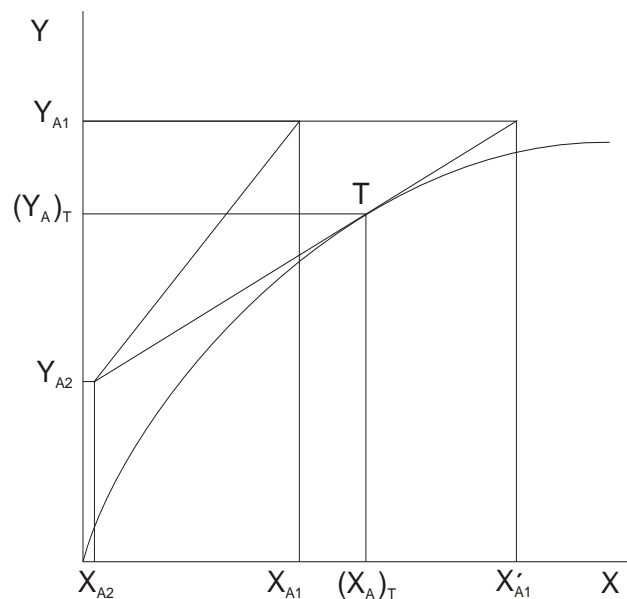
Obr. 2-5: Polohy pracovních přímek při a) minimální spotřebě rozpouštědla, b) maximální spotřebě rozpouštědla

Hodnota X'_A odpovídá koncentraci pohlcované složky při minimální či maximální spotřebě rozpouštědla. Skutečné množství rozpouštědla se tedy volí v tomto rozmezí

$$(\dot{n}_R)_{min} < \dot{n}_R < (\dot{n}_R)_{max} [1].$$

Pro konkávní průběh rovnovážné křivky se musíme řídit tečnou pracovní přímkou a rovnovážné křivky (viz obr. 2-6). Rovnice pro výpočet $(\dot{n}_R)_{min}$ je dána vztahem

$$\left(\frac{\dot{n}_R}{\dot{n}_I}\right)_{min} = \frac{(Y_A)_T - Y_{A2}}{(X_A)_T - X_{A2}} \quad (2-29)$$



Obr. 2-6: Poloha pracovní přímky při konkávním průběhu při minimální spotřebě rozpouštědla.

3 VÝPOČET ZÁKLADNÍCH ROZMĚRŮ ABSORBÉRŮ

3.1 ABSORBÉRY SE SPOJITÝM STYKEM FÁZÍ

Pro absorbéry se spojitým stykem fází jsou zásadní dva rozměry a to průměr kolony a výška náplně. Průměr kolony vypočítáme se znalostí objemového průtoku plynu a jeho rychlosti

$$d = \sqrt{\frac{\dot{V}_G \cdot 4}{u_G \cdot \pi}} \quad (3-1)$$

kde \dot{V}_G ...objemový průtok plynu.

u_G ...mimovrstvová rychlost plynu.

Pro výpočet výšky kolony existuje více postupů podle zvolených pracovních podmínek, ale všechny vycházejí ze základní výpočtové rovnice absorberu

$$-\dot{n}_l dY_A = K_p P a \frac{(Y_A - Y_A^*)}{(1 + Y_A)(1 + Y_A^*)} dV \quad (3-2)$$

kde K_p ...součinitel prostupu hmoty,

a ...měrný mezifázový povrch náplně,

P ...pracovní tlak absorpce.

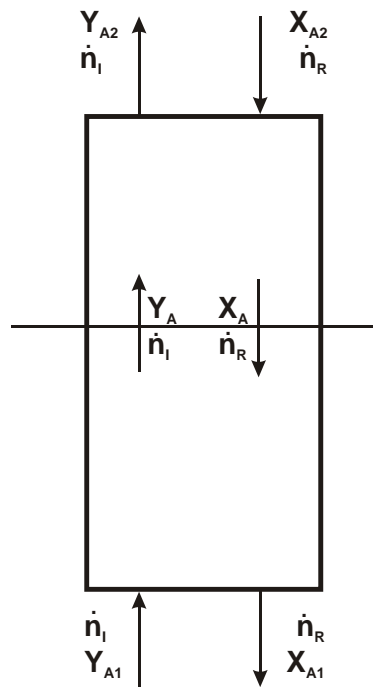
Po separaci proměnných a vymezení limitních podmínek odpovídajících podmínkám na obou koncích absorberu: vstup plynu $Y_A = Y_{A1}$ $V = 0$

výstup plynu $Y_A = Y_{A2}$ $V = V_n$

dostaneme rovnici ve tvaru

$$\int_{Y_{A2}}^{Y_{A1}} \frac{(1 + Y_A)(1 + Y_A^*)}{(Y_A - Y_A^*)K_p} dY_A = \frac{Pa}{\dot{n}_l} \int_0^{V_n} dV = \frac{Pa}{\dot{n}_l} V_n \quad (3-3)$$

Více se některým postupům budeme věnovat v následující kapitole, a jejich odvození lze nalézt v literatuře [1], [2], [3] či [6].



Obr. 3-1: Schéma protiproudé absorpce se spojitým stykem fází, s označením proudů plynu a kapaliny.

3.1.1 STANOVENÍ VÝŠKY ABSORBÉRU INTEGRACE ZÁKLADNÍ ROVNICE, KDYŽ JE SOUČINITELEL PROSTUPU HMOTY KONSTANTNÍ

Součinitel prostupu hmoty se obecně mění podél absorbéru, ale v mnoha případech je tato změna zanedbatelná a proto lze brát veličinu za konstantní. Za předpokladu tedy, že $K_p = konst$ a vyjádření objemu náplně pomocí výšky Z a průřezu kolony S získáme vztah

$$\int_{Y_{A2}}^{Y_{A1}} \frac{(1+Y_A)(1+Y_A^*)}{(Y_A - Y_A^*)} dY_A = \frac{K_p P a S Z}{\dot{n}_I} \quad (3-4)$$

Součinitel prostupu hmoty v této rovnici vyjadřuje jeho střední hodnotu, kterou získáme např. jako aritmetický průměr z hodnot odpovídajícím vstupu a výstupu z kolony. Hodnoty Y_A^* získáme pomocí rovnovážné křivky vyjádřené tabulkově, graficky nebo vztahem. V případě tabulkově zadaných rovnovážných dat bude potřeba využít interpolaci k získání Y_A^* . Při grafickém vyjádření rovnováhy, potřebné Y_A^* odečteme přímo z grafu. Následně pak integrál v rovnici (3-4) vypočítáme numericky např. pomocí Simpsonova pravidla či lichoběžníkové metody. Pro rovnováhu zadanou analytickým vztahem, který lze získat někdy přímo z literatury nebo proložením tabulkových či grafických dat tzv. náhradní funkcí, hodnoty Y_A^* získáme dosazením odpovídajících dat do tohoto vztahu. Tudiž bychom mohli vypočítat integrál analyticky, ale vzhledem k tomu, že náhradní funkce mohou být vyjádřeny i ve složitějším tvaru, je vhodné pro tyto případy řešit integrál v rovnici (3-4) opět numericky.

3.1.2 STANOVENÍ VÝŠKY ABSORBÉRU NA ZÁKLADĚ ANALYTICKY VYJÁDŘENÉ HNACÍ SÍLY LINEÁRNÍM VZTAHEM

Jestliže můžeme vyjádřit závislost hnací síly na složení příslušné fáze lineárním vztahem, lze se vyhnout výpočtu integrálu v základní výpočtové rovnici. Uvedenou rovnici (3-4) v předchozí kapitole lze tedy zjednodušit tehdy, když rovnovážnou křivku můžeme nahradit v určeném rozmezí koncentrací přímkou, (tzv. oblast pracovních koncentrací) která nemusí nutně vycházet z počátku souřadných os.

$$Y_A^* = mX_A + q \quad (3-5)$$

Pokud takto vyjádříme rovnovážnou čáru, můžeme použít střední hnací síly na celou kolonu.

Uvažujeme-li opět $K_p = konst$ a nízké koncentrace pohlcované složky, je základní výpočtová rovnice dána vztahem

$$\int_{Y_{A2}}^{Y_{A1}} \frac{dY_A}{Y_A - Y_A^*} = \frac{K_p P a S Z}{\dot{n}_I} \quad (3-6)$$

Hodnotu integrálu lze v daném případě řešit analyticky. Před vlastním řešením integrálu je nutné provést určité úpravy. Látková bilance pro určitý okruh (vuz. obr. 3-1) je dána vztahem

$$\dot{n}_I Y_A + \dot{n}_R X_{A2} = \dot{n}_I Y_{A2} + \dot{n}_R X_A \quad (3-7)$$

Odtud vyjádříme X_A

$$X_A = \frac{\dot{n}_I(Y_A - Y_{A2})}{\dot{n}_R} + X_{A2} = \frac{\dot{n}_I}{\dot{n}_R} Y_A + p \quad (3-8)$$

kde veličina p označuje výraz

$$p = -\frac{\dot{n}_I}{\dot{n}_R} Y_{A2} + X_{A2} = konst \quad (3-9)$$

Do rovnice (3-5) dosadíme rovnici (3-8)

$$Y_A^* = mX_A + q = m \frac{\dot{n}_I}{\dot{n}_R} Y_A + mp + q = m \frac{\dot{n}_I}{\dot{n}_R} Y_A + b \quad (3-10)$$

kde

$$b = mp + q \quad (3-11)$$

Provedeme substituci z rovnice (3-10) do integrálu z rovnice (3-6)

$$\int_{Y_{A2}}^{Y_{A1}} \frac{dY_A}{Y_A - Y_A^*} = \int_{Y_{A2}}^{Y_{A1}} \frac{dY_A}{Y_A - m \frac{\dot{n}_I}{\dot{n}_R} Y_A - b} = \int_{Y_{A2}}^{Y_{A1}} \frac{dY_A}{Y_A \left(1 - m \frac{\dot{n}_I}{\dot{n}_R}\right) - b} \quad (3-12)$$

Integrací a úpravou pak dostaneme výraz

$$\int_{Y_{A2}}^{Y_{A1}} \frac{dY_A}{Y_A - Y_A^*} = \frac{1}{1 - m \frac{\dot{n}_I}{\dot{n}_R}} \ln \frac{Y_{A1} - Y_{A1} m \frac{\dot{n}_I}{\dot{n}_R} - b}{Y_{A2} - Y_{A2} m \frac{\dot{n}_I}{\dot{n}_R} - b} \quad (3-13)$$

a pro další úpravy si musíme vyjádřit výraz $m(\dot{n}_I/\dot{n}_R)$.

Z rovnice látkové bilance si pro celý absorbér vyjádříme \dot{n}_I/\dot{n}_R

$$\frac{\dot{n}_I}{\dot{n}_R} = \frac{X_{A1} - X_{A2}}{Y_{A1} - Y_{A2}} \quad (3-14)$$

a směrnici rovnovážné přímky si vyjádříme z podmínky rovnováhy vztahem

$$m = \frac{Y_{A1}^* - Y_{A2}^*}{X_{A1} - X_{A2}} \quad (3-15)$$

Pak dosazením z rovnice (3-14) do (3-15) dostaneme vztah

$$m \frac{\dot{n}_I}{\dot{n}_R} = \left[\frac{Y_{A1}^* - Y_{A2}^*}{X_{A1} - X_{A2}} \right] \left[\frac{X_{A1} - X_{A2}}{Y_{A1} - Y_{A2}} \right] = \frac{Y_{A1}^* - Y_{A2}^*}{Y_{A1} - Y_{A2}} \quad (3-16)$$

Výrazy z rovnice (3-13) lze dle (3-10) zapsat

$$-Y_{A1} m \frac{\dot{n}_I}{\dot{n}_R} - b = -Y_{A1}^* \quad (3-17)$$

$$-Y_{A2} m \frac{\dot{n}_I}{\dot{n}_R} - b = -Y_{A2}^* \quad (3-18)$$

Po dosazení těchto výrazů do rovnice (3-13) dostaneme tvar

$$\int_{Y_{A2}}^{Y_{A1}} \frac{dY_A}{Y_A - Y_A^*} = \frac{1}{1 - \frac{Y_{A1}^* - Y_{A2}^*}{Y_{A1} - Y_{A2}}} \ln \frac{Y_{A1} - Y_{A1}^*}{Y_{A2} - Y_{A2}^*} = \frac{Y_{A1} - Y_{A2}}{(Y_{A1} - Y_{A1}^*) - (Y_{A2} - Y_{A2}^*)} \ln \frac{Y_{A1} - Y_{A1}^*}{Y_{A2} - Y_{A2}^*} \quad (3-19)$$

V konečném tvaru je tedy vyjádření integrálu dáno vztahem

$$\int_{Y_{A2}}^{Y_{A1}} \frac{dY_A}{Y_A - Y_A^*} = \frac{Y_{A1} - Y_{A2}}{(Y_A - Y_A^*)_{ls}} \quad (3-20)$$

kde

$$(Y_A - Y_A^*)_{ls} = \frac{(Y_{A1} - Y_{A1}^*) - (Y_{A2} - Y_{A2}^*)}{\ln \frac{Y_{A1} - Y_{A1}^*}{Y_{A2} - Y_{A2}^*}} \quad (3-21)$$

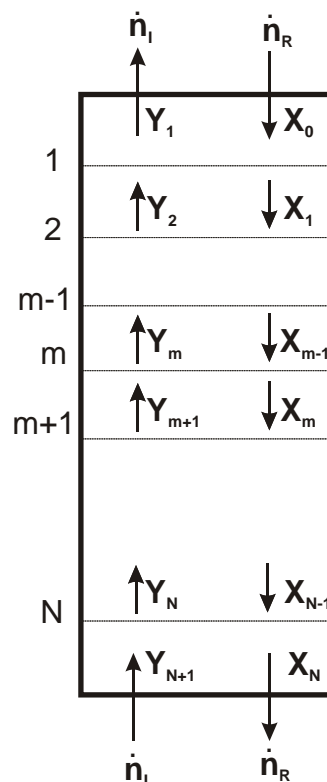
Střední hnací síla je tedy v případě, kdy lze rovnovážnou čáru nahradit lineárním vztahem a pohlcovaná složka se vyskytuje v nízkých koncentracích, dána logaritmickým středem koncových hnacích sil, definovaným rovnicí (3-21).

Vztah pro stanovení výšky absorberu ze základní rovnice (3-6) je tedy pak

$$Z = \frac{\dot{n}_I}{a \cdot S \cdot K_P} \cdot \frac{Y_{A1} - Y_{A2}}{\Delta Y_{ls}} \quad (3-22)$$

3.2 ABSORBÉRY SE STUPŇOVITÝM STYKEM FÁZÍ

Pro absorbéry se stupňovitým stykem fází, se pro rozměry kolony určuje počet rovnovážných stupňů. Počet rovnovážných stupňů (pater) se při nemožnosti využití výpočetní techniky nejčastěji určuje graficky pomocí milimetrového papíru. Pro velmi zředěné směsi lze použít analytickou metodu absorpčního faktoru. Popis obecných principů metod můžeme nalézt v literatuře [1], [3], [6]. Modifikace grafického způsobu s ohledem k využití softwarových produktů a postup analytické metody jsou uvedeny v následující části. Pro přehlednost je vynechán index A označující pohlcovanou složku.



Obr. 3-2: Obecné schéma protiproudé absorpce se stupňovitým stykem fází, s označením proudů plynu a kapaliny a s vyznačením m -tého patra kolony.

3.2.1 GRAFICKÁ METODA

Grafická metoda vychází z rovnovážného vztahu mezi fázemi a látkové bilance znázorněné v rovnovážném diagramu rovnovážnou křivkou a pracovní čarou. Je to obecná metoda, jelikož nevyžaduje zavedení žádných předpokladů týkajících se průběhu rovnovážné křivky ani pracovní čáry.

K bilancování absorbérů, za předpokladu uvedeného v kapitole 2.2.2., je vhodné použít relativní koncentrace. Pro bilanci libovolného úseku absorpční kolony tedy můžeme psát

$$\dot{n}_I Y_{m+1} + \dot{n}_R X_{m-1} = \dot{n}_I Y_m + \dot{n}_R X_m \quad (3-23)$$

Pro část kolony vymezenou horní částí kolony a m -tého patra (obr.3-2) je bilance

$$\dot{n}_I Y_{m+1} + \dot{n}_R X_0 = \dot{n}_I Y_1 + \dot{n}_R X_m \quad (3-24)$$

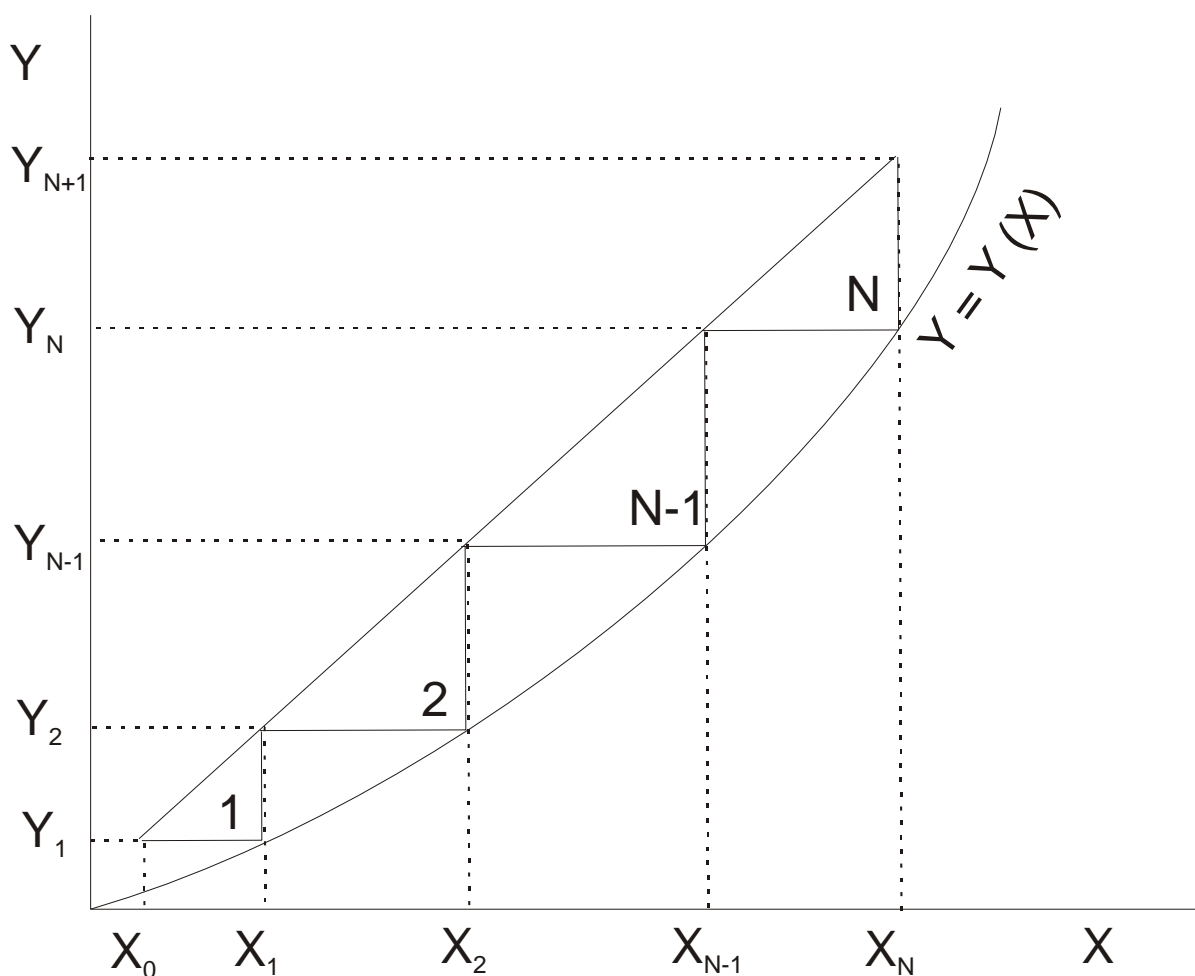
Úpravou získáme rovnici pracovní přímky absorbérů

$$Y_{m+1} + Y_1 = \frac{\dot{n}_R}{\dot{n}_I} (X_m - X_0) \quad (3-25)$$

kde (\dot{n}_R/\dot{n}_I) představuje směrnici pracovní přímky. Tato přímka představuje závislost složení plynu odcházejícího z $m+1$ patra a složením kapaliny, z patra stékající z m -tého patra. Pokud provedeme bilanci pro celý absorbér dostaneme vztah

$$Y_{N+1} + Y_1 = \frac{\dot{n}_R}{\dot{n}_I} (X_N - X_0) \quad (3-26)$$

Pro stanovení počtu rovnovážných stupňů grafickou metodou (ruční) vyneseme do grafu pracovní přímku a zároveň rovnovážnou křivku. Počet rovnovážných stupňů je pak roven počtu pravoúhlých kroků sestavených mezi pracovní přímkou a rovnovážnou křivkou (obr. 3-3)



Obr. 3-3: Stanovení počtu rovnovážných stupňů protiproudého vícestupňového absorbéru grafickou metodou

3.2.2 MODIFIKOVANÁ GRAFICKÁ METODA

Modifikaci uvedené grafické metody lze obecně provést několika způsoby. Všechny navrhované postupy modifikace grafické metody jsou založeny na rovnicích látkové bilance a rovnováhy vyjádřené analyticky. U všech navrhovaných postupů vždy bude vhodné využít výpočetní techniky s příslušnými softwarovými produkty jako např. tabulkové kalkulátory (MS Excel, LibreOffice Calc apod.), matematický software (Scilab, Matlab apod.) atd.

U všech navrhovaných způsobů modifikace grafické metody se v prvním kroku, pokud není rovnováha dána již analytickým vztahem, vždy provede náhrada tabulkově či graficky zadaných rovnovážných dat náhradní funkcí pomocí softwarových prostředků.

Dalším krokem je vlastní výpočet počtu teoretických stupňů (pater). Ten lze v podstatě realizovat pomocí tří následujících postupů.

- a. V prvním případě lze sestavit na základě látkové bilance a analyticky vyjádřeného rovnovážného vztahu pro jedno patro soustavu dvou rovnic o dvou neznámých. Tato soustava je obecně nelineární, a proto v některých případech bude nutno hodnoty neznámých koncentrací zjistit pomocí numerických metod pro řešení soustavy nelineárních rovnic např. Newtonovu metodu nebo využít vhodných nástrojů softwarových produktů. Postupovat se dá od patra k patru a výpočet ukončit až bude dosaženo stejné či vyšší požadované koncentrace ve výstupním proudu kapaliny. Další možností je odhadnout počet pater, pro tento počet pater sestavit příslušnou soustavu rovnic ($2 \times N$) s daným počtem neznámých a vyřešit tuto soustavu rovnic, jak již bylo uvedeno, např. pomocí Newtonovy metody. Pokud bude koncentrace ve vystupující kapalině stejná či vyšší než požadovaná, výpočet ukončíme. Zde je ovšem nutné ještě provést kontrolu, pokud vyjde vyšší koncentrace, zda požadovaná koncentrace ve výstupním proudu kapaliny leží mezi koncentracemi X_{N-1} a X_N získanými řešením soustavy rovnic. V obou uvedených možnostech řešení můžeme dospět k tomu, že nám vyjde necelé patro. Výpočet necelého patra je uveden v dalším textu. Z hlediska nároků na výpočetní čas a sestavování soustav rovnic lze říci, že způsob od patra k patru by svou „jednoduchostí“ a názorností měl být výhodnější variantou při řešení stanovení počtu teoretických pater.
- b. Navrhovaný druhý způsob určení počtu teoretických stupňů je založen na následujícím algoritmu pro m-té patro:

- 1) Pro známou hodnotu Y_m určíme z rovnovážného vztahu X_m . Pokud není rovnovážný vztah lineární a X_m nelze vyjádřit explicitně, musíme použít pro řešení této rovnice nějakou numerickou metodu nebo nástroje softwarových produktů (např. u Excelu „Hledání řešení“ či „Řešitel“).
- 2) Z bilance m-tého patra dopočítáme Y_{m+1} a tím máme určeno plně m-té patro.
- 3) Zjistíme zda $X_m \geq X_N$.

Začínáme počítat od 1. patra, kde tedy známe hodnoty koncentrací na výstupu plynné fáze z absorbéru a na vstupu kapalně fáze do absorbéru. Za m tedy dosadíme 1 a počítáme od bodu 1) až do 3). Pokud u bodu 3) podmínka neplatí, pokračujeme

k dalšímu patru do té doby, dokud není splněna platnost bodu 3). Necelé patro pak dopočteme na základě postupu uvedeného v následujícím textu.

c. Na rozdíl od předchozích postupů budeme počítat rovnovážné stupně od spodní části kolony, protože analytickým vyjádřením rovnovážné křivky máme explicitně vyjádřenou hodnotu koncentrace pohlcované složky v plynné fázi. Proto musíme formálně změnit označení pater, spodní část kolony tedy bude označena jako $[X_1^{\sim}; Y_0^{\sim}]$ a vrchní část kolony jako $[X_{N+1}^{\sim}; Y_N^{\sim}]$. Postup je pak následující:

- 1) Pro známou hodnotu X_1^{\sim} zjistíme z rovnovážného vztahu Y_1^{\sim} , kterou vypočítáme pomocí analytického vyjádření rovnovážné křivky.
- 2) Z bilance m-tého patra dopočítáme hodnotu X_2^{\sim} , a tím máme určeno celé první patro.
- 3) Zjistíme zda $X_m^{\sim} \leq X_{N+1}^{\sim}$.

Začínáme tedy počítat od 1. patra, kde známe hodnoty koncentrací na výstupu kapalně fáze z absorberu a na vstupu plynné fáze do absorberu $[X_1^{\sim}; Y_0^{\sim}]$. Postupně zvyšujeme počet pater a počítáme od bodu 1) až do 3) do té doby než bude platit podmínka bodu 3). Necelé patro pak dopočteme na základě postupu uvedeného v následujícím textu.

Obvykle počet rovnovážných stupňů není celé číslo a poslední necelé patro se musí dopočítat. Hodnota necelého patra se počítá jako poměr rozdílu požadované koncentrace na výstupu z absorberu a koncentrace z předposledního patra k rozdílu koncentrace vypočteného celého teoretického patra a koncentrace z předposledního patra. Pak lze pro postupy a. a b. vyjádřit necelé patro vztahem (3-27a) a pro postup c. vtahem (3-27b):

$$N_{zbytkové} = \frac{X_N - X_{m-1}}{X_m - X_{m-1}} \quad (3-27a)$$

$$N_{zbytkové} = \frac{X_{N+1}^{\sim} - X_{m-1}^{\sim}}{X_m^{\sim} - X_{m-1}^{\sim}} \quad (3-27b)$$

3.2.3 METODA ABSORPČNÍHO FAKTORU

Používá se v případech, kdy rovnovážná křivka a pracovní čára mohou být považovány za přímky, pak se dá se určit počet rovnovážných stupňů analyticky. Toto nastává v případech hodně nízkých koncentrací plynných směsí a kapalin, když jsou konstantní nejen toky fází, ale i součinitel fázové rovnováhy.

Pokud je tedy množství pohlcované složky nízké pak celkový tok kapaliny na vstupu i výstupu zůstává konstantní a podobně to platí i pro proud plynu

$$\dot{n}_L = konst, \dot{n}_G = konst \quad (3-28)$$

V tomto případě konstantních toků fází bude mít pracovní čára přibližně přímkový průběh. A konstantu součinitele fázové rovnováhy lze vyjádřit vztahem

$$y_A^* = mx_A \quad (3-29)$$

Potom se dá na určení počtu teoretických pater použít metoda absorpčního faktoru. Tedy pro m -té patro je látková bilance:

$$\dot{n}_G(y_{m+1} - y_m) = \dot{n}_L(x_m - x_{m-1}) \quad (3-30)$$

Pro rovnovážný stupeň však platí

$$y_m = mx_m \quad (3-31)$$

Spojením rovnic pak dostaneme

$$\frac{\dot{n}_L}{\dot{n}_G m} (y_m - y_{m-1}) = y_{m+1} - y_m \quad (3-32)$$

Výraz před závorkou je tzv. absorpční faktor

$$A = \frac{\dot{n}_L}{\dot{n}_G m} \quad (3-33)$$

Z rovnice si pak vyjádříme koncentraci pohlcované složky v m -tém patře

$$y_m = \frac{y_{m+1} + Ay_{m-1}}{1+A} \quad (3-34)$$

Touto rovnicí vyjádříme horní patro kolony (obr. 3-2)

$$y_1 = \frac{y_2 + Ay_0}{1+A} \quad (3-35)$$

kde y_1 je molový zlomek pohlcované složky v plynu opouštějící 1. patro kolony a y_0 je zlomek rovnovážný ke vstupující kapalině o koncentraci x_0 . Takto postupně získáme obecnou rovnici pro m -té patro

$$y_m = \frac{(A^{m-1})y_{m+1} + A^m(A-1)y_0}{A^{m+1}-1} \quad (3-36)$$

Látková bilance pro celý okruh od vrchu kolony pro m -té patro

$$\dot{n}_G y_{m+1} + \dot{n}_L x_0 = \dot{n}_G y_1 + \dot{n}_L x_m \quad (3-37)$$

Po zavedení absorpčního faktoru a úpravě

$$A(y_m - y_0) = y_{m+1} - y_1 \quad (3-38)$$

Úpravou a spojením s rovnicí (3-36)

$$\frac{y_{m+1} - y_1 + Ay_0}{A} = y_m = \frac{(A^{m-1})y_{m+1} + A^m(A-1)y_0}{A^{m+1}-1} \quad (3-39)$$

Postupnými úpravami této rovnice se dostaneme až k tvaru

$$\frac{y_{m+1} - y_1}{y_{m+1} - y_0} = \frac{A^{m+1} - A}{A^{m+1} - 1} \quad (3-40)$$

Zobecněním pro celý absorber o N patrech (obr. 3-2) a vyjádřením y_0 z rovnice

$$y_0 = mx_0 \quad (3-41)$$

dostaneme vztah

$$\frac{y_{n+1} - y_1}{y_{n+1} - mx_0} = \frac{A^{n+1} - A}{A^{n+1} - 1} \quad (3-42)$$

Tato rovnice je tzv. Kremser-Brown-Soudersova rovnice. Zlomek na levé straně se označuje jako absorpční účinek a udává poměr mezi skutečnou a maximální teoreticky možnou změnou, která by nastala při dosažení rovnováhy odcházejícího plynu se vstupující kapalinou.

$$\varphi = \frac{y_{m+1} - y_1}{y_{m+1} - y_0} = \frac{y_{n+1} - y_1}{y_{n+1} - mx_0} \quad (3-43)$$

Velikost absorpčního účinku je vždy menší než 1 a pokud by byl roven jedné, znamenalo by to dosažení rovnováhy mezi vystupujícím plynem a vstupující kapalinou.

Rovnice (3-41) je analytická závislost mezi absorpčním účinkem, absorpčním faktorem a počtem pater. Tudíž můžeme vyjádřit přímý počet pater úpravou této rovnice

$$N = \frac{\log \frac{A-\varphi}{1-\varphi}}{\log A} - 1 \quad (3-44)$$

4 ŘEŠENÍ ÚLOH POMOCÍ TABULKOVÉHO KALKULÁTORU EXCEL

Vlastní výpočet protiproudé absorpce se stupňovitým či spojitým stykem fází je rozdělen na několik samostatných kroků. Prvním krokem je aproximace rovnovážných dat náhradní funkcí pomocí softwarových prostředků programu Excel (grafy, spojnice trendu) nebo nalezením náhradní funkce, která vyhovuje dané závislosti z pomoci tzv., Řešitele, který je součástí Excelu. Dalším dílčím krokem je sestavení celkové látkové bilance absorbéru na základě zadaných a požadovaných vstupních a výstupních veličin. V posledním kroku následuje vlastní určení počtu rovnovážných stupňů při absorpci se stupňovitým stykem fází nebo určení výšky a průměru absorbéru se spojitým stykem fází. Bližší popis a metodika výpočtu jednotlivých kroků jsou uvedeny v následujících kapitolách.

4.1 APROXIMACE ROVNOVÁŽNÝCH DAT

Pro řešení úloh je nejprve nutné nalézt pro daný systém plyn – kapalina vhodná rovnovážná data a ty pak vhodným způsobem aproximovat náhradní funkcí. Při ručním řešení úloh se rovnovážné údaje vynášejí na milimetrový papír a následně jsou, pomocí např. křivítka, proloženy křivkami. Jako náhrada těchto ručně proložených křivek je v programu Excel možné proložení tabelovaných hodnot náhradní funkcí vyjádřenou v analytické formě. Např. při vykreslení grafu tabelovaných dat v Excelu pomocí spojnice trendu (nejčastěji polynomickým typem funkce) a zároveň s použitím funkce ohraničení tzn., že křivka prochází bodem [0;0] ve zvoleném souřadnicovém systému. Tento nástroj programu Excel (spojnice trendu, typ trendu a regrese) není vhodný pro prokládání všech rovnovážných dat a při hledání vhodné závislosti musíme použít i jiné typy náhradních funkcí k proložení experimentálních dat.

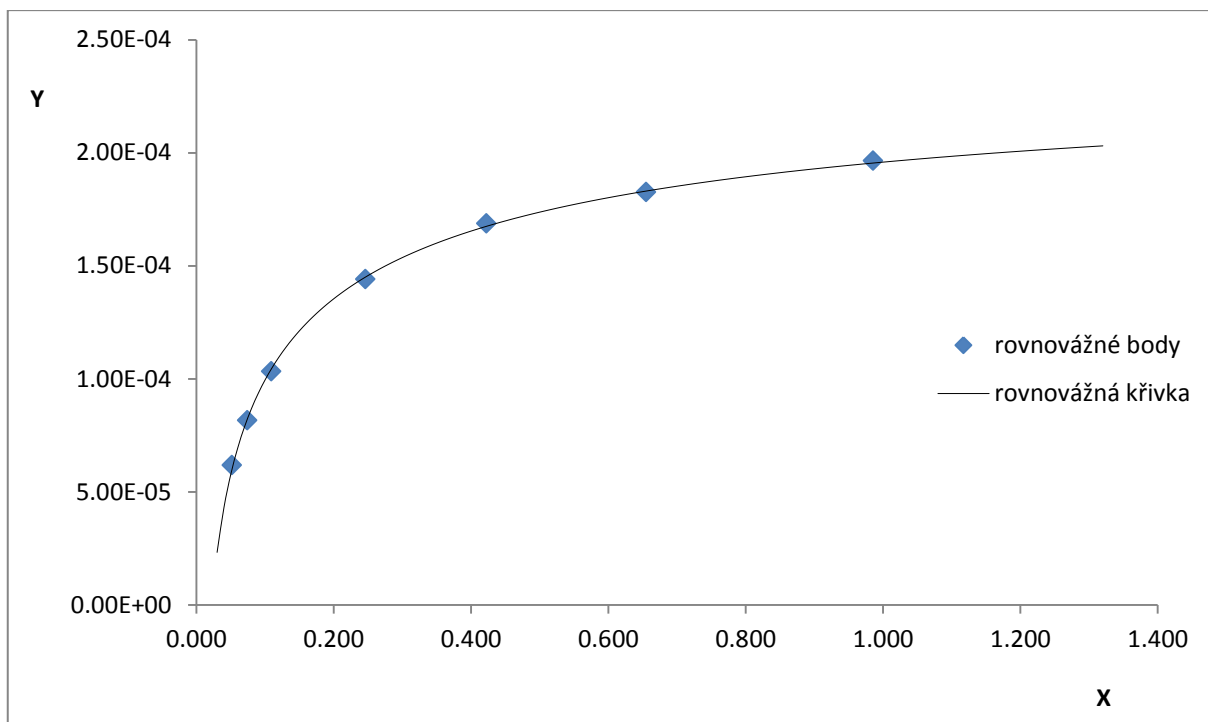
Pro zjištění náhradní funkce je možné postupovat tak, že pomocí srovnání grafického znázornění tabelovaných hodnot s průběhem různých funkcí odhadneme její tvar. Tyto funkce můžeme nalézt např. v literatuře [5]. Toto srovnání nám, ale poskytuje pouze odhad typu

funkce. Pro ověření správnosti našeho odhadu, použijeme doplněk programu Excel Řešitel pro výpočet přesných parametrů námi odhadnuté funkce. Při použití doplňku Řešitel pro zjištění parametrů náhradní funkce se zadají známé vstupní hodnoty a provede se odhad hodnot parametrů. Pro výpočet použijeme metodu absolutní chyby, kdy porovnáváme rovnovážné hodnoty s hodnotami vypočítaných pomocí náhradní funkce. Vyjádříme rozdíl mezi těmito hodnotami a tyto rozdíly sečteme jako sumu čtverců, kterou použijeme jakožto účelovou funkci pro optimalizaci řešené úlohy. Buňka obsahující sumu čtverců je tedy v doplňku Řešitel použita jako nastavovaná, s cílem její hodnotu minimalizovat. A jako měněné buňky jsou nastaveny neznámé hodnoty parametrů náhradní funkce. Na výstupu pak dostaneme hodnoty parametrů náhradní funkce. Vhodnost náhrady funkce určíme podle hodnoty minimalizované buňky a zároveň vykreslením vypočtené funkce do grafu. Pokud je hodnota minimalizované buňky nízká a tvar vykreslené funkce odpovídá rovnovážným datům, můžeme tuto funkci a vypočtené parametry použít jako výchozí rovnici pro výpočet rovnovážných dat. V případě že je hodnota minimalizované buňky vysoká a křivky se neshodují, musíme opakovat celý postup znovu s jinou náhradní funkcí či s novým odhadem příslušných parametrů, protože funkce může mít více minim a Řešitel nalezne vždy nejbližší hodnotu minima pro zadaný odhad parametrů.

Pro doplněk Řešitel byly nastaveny následující hodnoty: maximální čas výpočtu 100 s, počet iterací 200, přesnost 10^{-9} , hodnota konvergence 10^{-9} , extrapolace lineární, derivace standardní, metoda řešení Newtonova. Omezující podmínky zadány nebyly.

Ukázku konečné podoby zde popsaných postupů vidíte na obr.: (4-1) a (4-2), celé postupy jsou k nahlédnutí v příloze A.

Jako zdroj pro rovnovážná data pro systémy plyn – kapalina byla použita literatura [7] Další zdroj rovnovážných dat můžeme nalézt v literatuře [2] a v různých skriptech a příručkách pro chemické inženýrství.

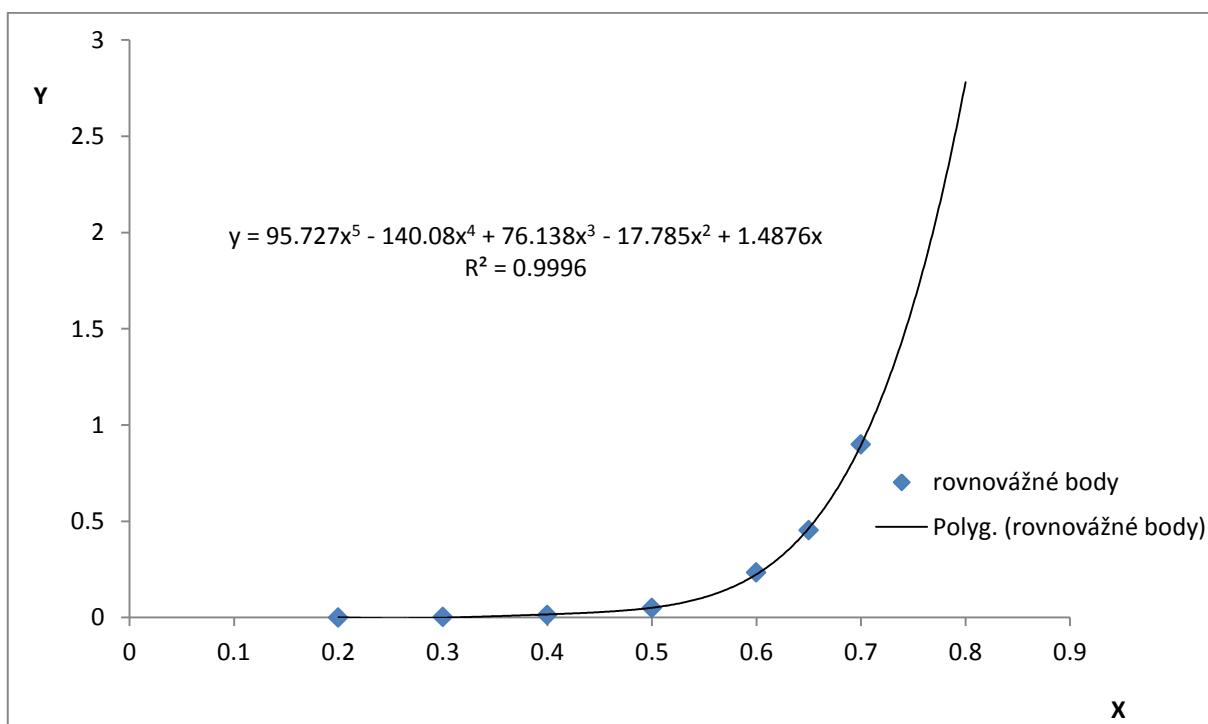


Obr. 4-1: Graf rovnovážné křivky systému aceton – H₂O při teplotě 20 °C vytvořenou pomocí náhradní funkce.

Rovnovážná křivka na obr.: (4-1) je analyticky vyjádřena rovnicí

$$Y = 1,96 \cdot 10^{-4} + 6,36 \cdot 10^{-4} \cdot \log X + (-3,26 \cdot 10^{-4}) \cdot \log^2 X$$

Obecný tvar této rovnice nalezneme v literatuře [5] na straně 97.



Obr. 4-2: Graf rovnovážné křivky systému NH₃ – H₂O při teplotě 20 °C vytvořenou pomocí funkce spojnice trendu.

4.2 CELKOVÁ BILANCE

Při výpočtu bilancí se většinou setkáme na straně plynné fáze se zadanými údaji o množství zpracovávané suroviny, jejím složením a požadavku na koncentraci absorbované složky na výstupu. Dále na straně rozpouštědla máme nejčastěji k dispozici údaj o složení na vstupu do absorberu. Cílem výpočtu celkové bilance je tedy zjistit koncentrace absorbované složky na vstupu a výstupu z kolony v kapalně i plynné fázi a spotřebu rozpouštědla potřebné k dosažení požadované koncentrace pohlcované složky na výstupu plynné fáze. Tato část je poměrně jednoduchá a postačí odpovídajícím způsobem zadat výpočtové vztahy do programu Excel.

Pro výpočet celkové bilance jsou použity vztahy uvedené v kapitole 2.2.

4.3 POSTUP ZADÁVÁNÍ DO VÝPOČETNÍCH LISTŮ

U každého příkladu si nejprve musíme uvědomit, co máme zadáno a dle toho zvolit správný postup výpočtu (výpočetní list).

- a. Celková bilance: vložíme pouze zadané údaje, kdy je velice důležité si uvědomit, v jakých jednotkách máme zadané veličiny a popřípadě je musíme převést na jednotky uvedené vedle zadávací buňky veličiny. Zvláštní pozornost pak musíme věnovat vyjádření koncentrací v jednotlivých fázích, je totiž nutné vyjádřit koncentrace tak abychom je mohli použít pro výpočet. Převody koncentrací týkající se binárních směsí a některých veličin můžeme nalézt v literatuře [1], [7]. V sešitě pro výpočet celkové bilance je vložen list, který obsahuje základní převody mezi koncentracemi.
- b. Absorbéry se spojitým stykem fází:
 - 1) Metoda analyticky vyjádřené hnací síly lineárním vztahem: vložíme pouze zadané údaje v uvedených jednotkách.
 - 2) Integrací základní rovnice za předpokladu konstantního součinitele prostupu hmoty:
 - i. vložíme zadané údaje v uvedených jednotkách,
 - ii. vložíme data rovnovážné křivky, postup je uveden dále v textu,

- iii. do tabulky pro výpočet N_{0G} zadáme do sloupce Y_i^* analyticky vyjádřenou rovnici rovnovážné křivky. Jako hodnoty pro výpočet použijeme data ze sloupce X_i .
- c. Absorbéry se stupňovitým stykem fází:
- 1) Metoda absorpčního faktoru: vložíme pouze zadané údaje v uvedených jednotkách.
 - 2) Modifikovaná grafická metoda (pro výpočet jsme zvolili postup c. uvedený v kapitole 3.2.2 z důvodu explicitně vyjádřené hodnoty Y_m v rovnovážném proudu, čímž se nám značně zjednoduší výpočetní postup):
 - i. vložíme zadané údaje v uvedených jednotkách
 - ii. vložíme data rovnovážné křivky, postup je uveden dále v textu
 - iii. do tabulky pro „počet pater“ zadáme do podbarvených buněk výpočet Y_m z rovnice rovnovážné křivky. Jako hodnoty pro výpočet použijeme odpovídající hodnotu X_i z rovnovážného proudu.
 - iv. pro výpočet zbytkového patra zadáme do podbarvených buněk uvedené rozdíly koncentrací.
- d. Pro zadání rovnovážné křivky existují dva způsoby:
- 1) První je případ kdy rovnovážné data lze nahradit pomocí funkce spojnice trendu v programu Excel, kde do tabulky „rovnovážná křivka“ vložíme hodnoty a pak ve vykresleném grafu proložíme spojnici trendu a v možnostech zvolíme ohraničení = 0, zobrazit rovnici regrese a zobrazit hodnotu spolehlivosti R. Pak tedy jako analytické vyjádření rovnovážné křivky je rovnice regrese zobrazená v příslušném grafu.
 - 2) Druhý způsob je vyjádření rovnovážné křivky pomocí náhradní funkce, pro kterou dopočítáme parametry pomocí doplňku Řešitel. Do tabulky „rovnovážná křivka“ vložíme tedy hodnoty vypočítané z této náhradní funkce. Při vkládání hodnot funkce je pro vykreslení grafu vhodné použít menší rozmezí mezi jednotlivými hodnotami, proto aby vykreslená křivka měla hladký průběh.

4.4 PRAKTICKÁ APLIKACE UVEDENÝCH ŘEŠENÍ

4.4.1 CELKOVÁ BILANCE

Příklad 4-1:

Do spodní části absorpční náplňové kolony přichází 5000 m³/h plynné směsi amoniaku se vzduchem o teplotě 30 °C a tlaku 157 kPa, obsahující 5 obj.% amoniaku. Protiproudně se v horní části kolony přivádí 10 t/h zředěné čpavkové vody obsahující 1 g NH₃/ kg čisté vody. Absorpci vzduchu do vody a odpar vody do plynné směsi lze zanedbat. Účinnost absorpce je 95%.

Určete: 1. látkový tok inertu (vzduchu) v plynné směsi,

2. látkový tok rozpouštědla (vody) v absorbentu,

3. množství absorbovaného amoniaku v kg/h

Řešení: 1. Pro tok inertu použijeme rovnici ideálního plynu, přepočítaný pro čistý vzduch

2. Pro tok čistého rozpouštědla, nejprve přepočítáme hmotnostní průtok absorbentu na látkový a ten pak přepočítáme na čisté rozpouštědlo.

3. Pro hmotnostní tok pohlcované složky znovu použijeme rovnici látkové bilance

Výpočetní list pro tento případ vidíme na obr.: (4-3).

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Zadané údaje				Výsledky			
2	V _G	5000	m ³ /h		n _L	555,5556	kmol/h	
3	t	303,15	K		n _i	295,8869	kmol/h	
4	p	157000	Pa		n _R	554,9678	kmol/h	
5	m _L	10000	kg/h		X ₁	0,027717	-	
6	M _A	17	kg/kmol		n _A	14,79434	kmol/h	
7	M _R	18	kg/kmol		m _A	251,5038	kg/h	
8	R	8314	J/(kmol.K)					
9	Y ₁	0,05	-					
10	Y ₂	0,002625	-					
11	x ₂	0,001058	-					
12	Y ₁	0,052632	-					
13	Y ₂	0,002632	-					
14	X ₂	0,001059	-					
15								
16								
17								

Vymazat zadávané údaje

Obr. 4-3: Výpočetní list pro celkovou bilanci

4.4.2 ABSORBÉR SE SPOJITÝM STYKEM FÁZÍ

Příklad 4-2: Příklad se zabývá protiproudou absorpcí se spojitým stykem fází, kdy je pohlcovaná složka plynný amoniak, vzduch je považován za inert a jako absorbent se používá čistá voda. Dále se předpokládá konstantní hodnota úhrnného součinitele prostupu hmoty.

Do absorpční věže vyplněné Raschigovými kroužky je přiváděno 3000 m³/h plynné směsi obsahující 23,2 obj. % amoniaku, zbytek je vzduch. Z této plynné směsi je amoniak vypírán čistou vodou. V odcházejícím plynu má zůstat 5 % z původního množství amoniaku přiváděného do kolony. Absorpce probíhá při teplotě 30°C a tlaku 760 Torr.

Další údaje: Úhrnný součinitel prostupu hmoty vztažený na hnací sílu vyjádřenou na základě plynné fáze je 8,6 kg/(m².h.at). Měrný mezifázový povrch je roven přibližně měrnému povrchu náplně a $\cong 85 \text{ m}^{-1}$. Rychlost plynu ve volném průřezu kolony, tzv. mimovrstvá rychlost, má činit 80 % z rychlosti na mezi zahlcení, přičemž rychlost na mezi zahlcení $u_{G,ZAHL} = 0,5 \text{ m/s}$.

Určete: 1. množství vody, potřebné k dosažení koncentrace absorbátu 12,5 g NH₃/ 100 g čisté H₂O (kmol/h)

2. rozměry absorpční kolony, tj. její průměr a výšku náplně.

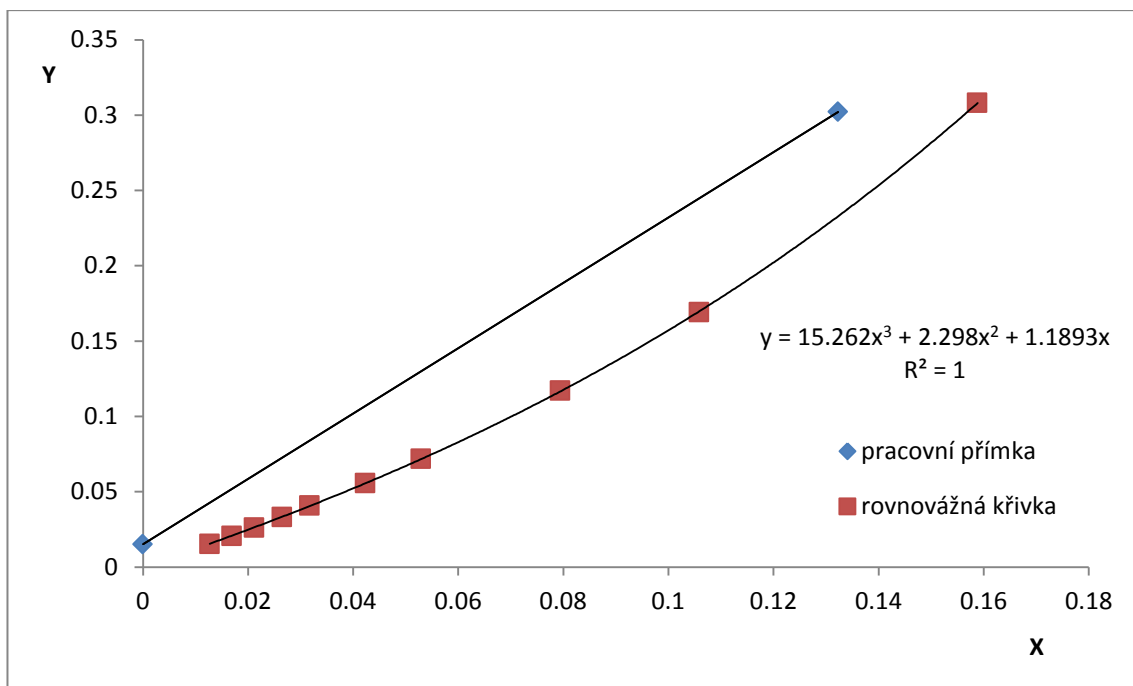
Řešení: první bod se zabývá řešením celkové bilance a pro výpočet můžeme použít výpočetní list pro celkovou bilanci a z tohoto výpočtu použijeme informace potřebné k výpočtu rozměrů kolony. Průměr kolony vypočítáme ze vztahu (3-1). Výšku kolony dále vypočítáme podle základní výpočtové rovnice (3-4), kdy předpokládáme, že součinitel prostupu hmoty je konstantní. Integraci dále vypočítáme použitím Simpsonova pravidla. Kdy počet kroků zvolíme $n = 10$ a tomu odpovídající výška kroku je $h = 0,0287$.

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{b-a}{3n} \cdot [f(x_0) + 4f(x_1) + 2f(x_2) + 4f(x_3) + \dots + 2f(x_{n-2}) + 4f(x_{n-1}) + f(x_n)]$$

$$\text{kde, } f(x) = \frac{(1+Y).(1+Y^*)}{(Y-Y^*)} \quad a = Y_2 \quad b = Y_1$$

Hodnoty Y^* dostaneme z analytického vyjádření rovnovážné křivky pomocí náhradní funkce (viz obr. 4-4):

$$Y^* = 15,262X^3 + 2,298X^2 + 1,1893X$$



Obr. 4-4: Závislost koncentrace pohlcované složky v plynné fázi na složení pohlcované složky v kapalně fázi.

Výpočetní list pro tento případ vidíme na obr.: (4-5).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Zadané údaje			výpočet N_{OS} pomocí Simpsonova pravidla							rovnovážná křivka		pracovní přímka			
2	n_i	92,6	kmol/h	n = 10		h = 0,0287		dílčí výpočty		X_i	Y_i	X	Y			
3	n_a	200,1	kmol/h	Y_i	X_i	Y_i^*	$f(x)$			0,012706	0,015362	0	0,0151			
4	Y_1	0,3021	-	0,0151	-0,00051	-0,00061	64,56964	1	64,56964	0,016941	0,020547	0,1323	0,3021			
5	Y_2	0,0151	-	0,0438	0,012767	0,01559	37,57784	4	150,3114	0,021176	0,026056					
6	X_1	0,1323	-	0,0725	0,026048	0,032808	27,90723	2	55,81446	0,026471	0,03317					
7	X_2	0	-	0,1012	0,03933	0,051258	23,17981	4	92,71922	0,031765	0,040715					
8	V_a	0,8333	m^3/s	0,1299	0,052611	0,071154	20,60213	2	41,20426	0,042353	0,055701					
9	K_p	5,16E-06	kmol/($m^2 \cdot h \cdot Pa$)	0,1586	0,065893	0,09271	19,2141	4	76,8564	0,052941	0,071929					
10	u_a	0,4	m/s	0,1873	0,079174	0,116142	18,62317	2	37,24633	0,079412	0,117159					
11	a	85	m^{-2}	0,216	0,092456	0,141663	18,67516	4	74,70064	0,105882	0,169228					
12	p	101323	Pa	0,2447	0,105737	0,169488	19,35408	2	38,70816	0,158824	0,308085					
13				0,2734	0,119019	0,199832	20,76802	4	83,07207							
14				0,3021	0,1323	0,232909	23,202	1	23,202							
15	Průměr kolony															
16	d	1,628642	m													
17	S	2,08325	m^2													
18	Výška kolony															
19	N_{OS}	7,06407	-													
20	H_{OS}	1,000214	m													
21	Z	7,065582	m													
22																

Obr. 4-5: Výpočetní list pro výpočet rozměrů kolony integrací základní rovnice

Příklad 4-3: Příklad se zabývá protiproudou absorpcí se spojitým stykem fází, kdy je pohlcovaná složka metanol, a jako absorbent se používá čistá voda. Dále se předpokládá konstantní hodnota úhrnného součinitele prostupu hmoty a rovnováha je zde určena rovnicí, tudíž je pro výpočet vhodné postupovat metodou vyjádřenou na základě analyticky vyjádřené hnačí síly.

Z 1000 m³/h plynu obsahujícího 50 g metanolu na 1 m³ plynu se v náplňové koloně vypírá metanol čistou vodou. Množství plynu jsou uvedeny za normálních podmínek (T = 0°C, p = 101,3 kPa). Na výstupu z absorberu má mít voda 67 % maximálně možné koncentrace a má být absorbováno 98 % ze vstupujícího množství metanolu. Fiktivní rychlost na vstupu do absorberu $u_G = 0,55$ m/s při teplotě T = 27°C a tlaku p = 101,3 kPa, což jsou pracovní podmínky při absorpci. Náplň kolony tvoří Raschigovy kroužky o rozměrech 25x25x3 mm. Koeficient prostupu hmoty $K_X = 9$ kg/(m².h). Rovnovážný vztah pro rozpustnost metanolu ve vodě je $Y = 1,15.X$

Určete rozměry absorpční kolony, tj. její průměr a výšku náplně.

Řešení: Z celkové bilance se vyjádří koncentrace pohlcované složky ve všech proudech a toky inertu a čistého rozpouštědla. Dále se vyjádří hodnoty $Y_1^* a Y_2^*$ pomocí rovnováhy vyjádřené rovnicí $Y = 1,15.X$. Tyto údaje se dosadí do vztahu (3-22) a tím určíme výšku náplně. Průměr kolony vypočítáme ze vztahu (3-1)

Výpočetní list pro tento případ vidíme na obr.: (4-6).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Zadané údaje				Střední hnací síla					
2	m	1,15000	-		ΔY_1	0,01156				
3	n_1	43,10000	kmol/h		ΔY_2	0,00070				
4	Y_1	0,03502	-		Y_{1s}	0,00387				
5	Y_2	0,00070	-							
6	X_1	0,02040	-		Průměr kolony					
7	X_2	0,00000	-		d	0,84061	m			
8	Y_1^*	0,02346	-		S	0,66021	m ²			
9	Y_2^*	0,00000	-		Výška kolony					
10	V_G	0,30524	m ³ /s		Z	8,94304	m			
11	K_p	3,19E-06	kmol/(m ² .h.Pa)		Vymazat zadávané údaje					
12	u_G	0,55	m/s							
13	a	200	m ⁻¹							
14	p	101300	Pa							
15										
16										
17										

Obr. 4-6: Výpočetní list pro výpočet rozměrů kolony metodou střední hnací síly

4.4.3 ABSORBÉR SE STUPŇOVITÝM STYKEM FÁZÍ

Příklad 4-4: Příklad se zabývá protiproudou absorpcí se stupňovitým stykem fází, kdy je pohlcovanou složkou propylen, vzduch tady vystupuje jako inert. Rovnováha je zde určena rovnicí, tudíž je pro výpočet vhodné postupovat metodou absorpčního faktoru.

Do patrové absorpční kolony je přiváděno 2200 m³/h (za normálních podmínek) plynu obsahujícího 4,5 obj. % propylenu zbytek tvoří vzduch. Přípustný obsah propylenu v odcházejícím plynu je 0,3 obj. %. Množství absorbentu použité při absorpci je o 22 % větší než množství minimální. Za podmínek absorpce je možné rovnováhu vyjádřit rovnicí $Y = 0,21.X$.

Určete počet teoretických pater kolony nutných k provedení absorpce při použití absorbentu s obsahem 0,1 mol % propylenu.

Řešení: Z celkové bilance se vyjádří koncentrace pohlcované složky ve všech proudech a toky inertu a čistého rozpouštědla, dále se vyjádří hodnota Y^* pomocí rovnováhy vyjádřené z rovnice $Y = 0,21.X$. Poté máme všechny potřebné údaje pro dosazení do rovnice (3-44), ze které se vypočítá počet teoretických pater.

Výpočetní list pro tento případ vidíme na obr.: (4-7).

	A	B	C	D	E	F	G
1	Zadané údaje						
2	m	0,21	-				
3	n _i	93,75	kmol/h				
4	n _R	24,11	kmol/h				
5	Y ₁	0,00301	-				
6	Y _{N+1}	0,04500	-				
7	X ₀	0,00503	-				
8	X _N	0,17655	-				
9	Y ₁ [*]	0,00106	-				
10							
11	Výsledky						
12	A	1,2246349	-				
13	φ	0,9555408	-				
14	PTP	7,8850443	-				
15							
16	Vymazat zadávané údaje						
17							
18							
19							
20							
21							

Obr. 4-7: Výpočetní list pro výpočet počtu teoretických pater kolony metodou absorpčního faktoru

Příklad 4-5: Příklad se zabývá protiproudou absorpcí se stupňovitým stykem fází, kdy je pohlcovanou složkou vzdušná vlhkost, která se pohlcuje vodným roztokem hydroxidu.

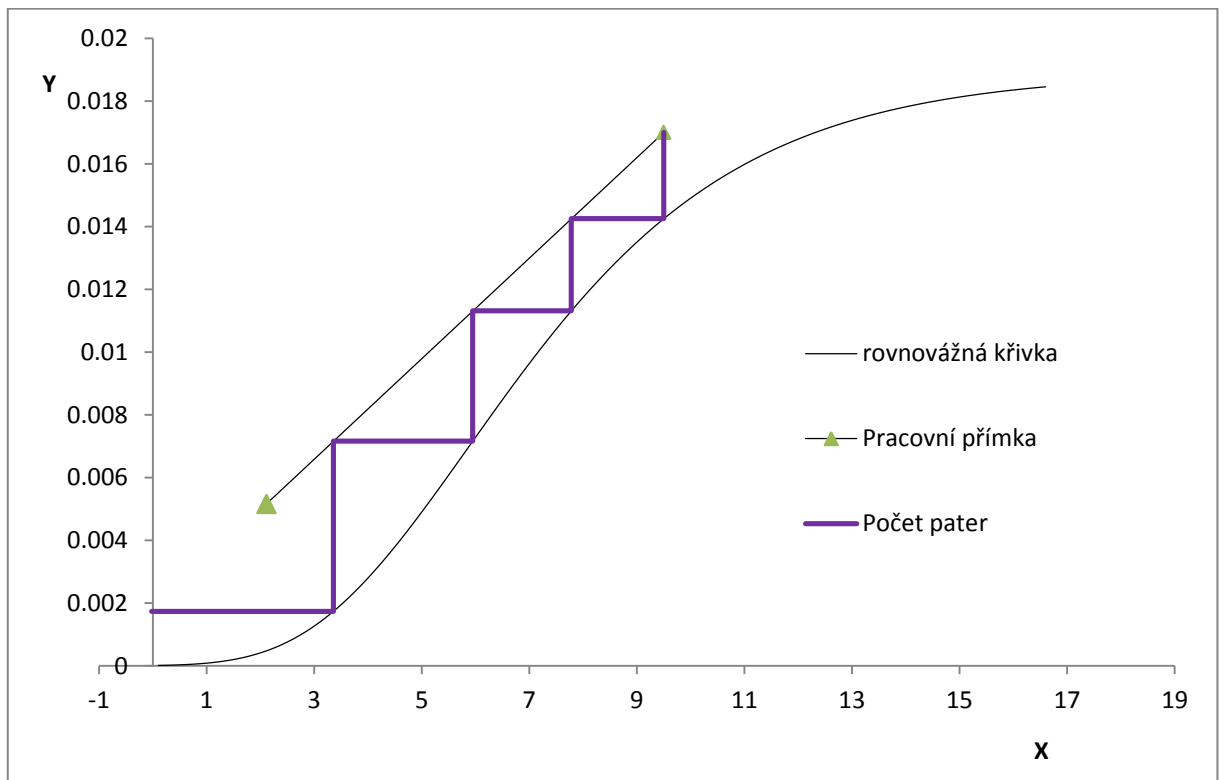
V patrové absorpční koloně se odstraňuje vlhkost ze vzduchu roztokem NaOH. Parciální tlak vodní páry ve vstupujícím vzduchu je 1693 Pa a má být snížen na hodnotu 520 Pa. Čerstvý absorpční roztok přiváděný do kolony obsahuje 60 hmot. % NaOH. Pracovní podmínky v absorberu: tlak $P = 101,3 \text{ kPa}$, teplota $T = 20^\circ\text{C}$.

Určete: počet teoretických.

Řešení: Z celkové bilance se vyjádří koncentrace pohlcované složky ve všech proudech a poměr toku čistého rozpouštědla a inertu. Poté se do grafu (obr.: 4-8) vynese pracovní přímka a rovnovážná křivka. Rovnice rovnovážné křivky zjištěné pomocí doplňku Řešitel je

$$Y^* = 0,0189 \cdot e^{-7,6663 \cdot e^{-0,3474 \cdot X}}$$

Poté se postupuje dle způsobu popsaného v kapitole 3.2.2. popsaným způsobem c.



Obr. 4-8: Graf rovnovážné křivky a pracovní čáry s vyjádřením počtu rovnovážných stupňů při absorpci.

Výpočetní list pro tento případ vidíme na obr.: (4-9).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L								
1	Zadané údaje				Pracovní přímka					rovnovážná křivka										
2	Y_0^v	0.01700	-		Y_N^v	0.00516	X_{N+1}^v	2.111		X_i^v	Y_i^v									
3	Y_N^v	0.00516	-		Y_0^v	0.017	X_1^v	9.5		0.1	1.15E-05									
4	X_1^v	9.50000	-							0.2	1.48E-05									
5	X_{N+1}^v	2.11100	-							0.3	1.89E-05									
6	n_p/n_l	0.00160	-							0.4	2.39E-05									
7										0.5	3.01E-05									
8										0.6	3.75E-05									
9	Počet pater				zbytkové patro					0.7	4.63E-05									
10	proud	patro	Y_i^v	X_i^v	$X_{N+1}^v - X_{m-1}^v$		-1.247798			0.8	5.69E-05									
11	střetný	0	0.017	9.5	$X_m^v - X_{m-1}^v$		-3.383862			0.9	6.93E-05									
12	rovnovážný	1	0.014246	9.5	$(X_N^v - X_{m-1}^v) / (X_m^v - X_{m-1}^v)$		0.36875			1	8.4E-05									
13	střetný	1	0.014246	7.781425	Vymazat zadané údaje															
14	rovnovážný	2	0.011309	7.781425																
15	střetný	2	0.011309	5.948596																
16	rovnovážný	3	0.007159	5.948596																
17	střetný	3	0.007159	3.358798																
18	rovnovážný	4	0.001737	3.358798																
19	střetný	4	0.001737	-0.025064																
20	rovnovážný	5	0	-0.025064																
21	střetný	5	0	-1.109206																
22	rovnovážný	6	0	-1.109206																
23	střetný	6	0	-1.109206																
24	rovnovážný	7	0	-1.109206																
																		1.1	0.000101	
																		1.2	0.000121	
																		1.3	0.000144	
																		1.4	0.00017	
										1.5	0.000199									
										1.6	0.000233									
										1.7	0.00027									
										1.8	0.000313									
										1.9	0.00036									
										2	0.000412									
										2.1	0.000469									
										2.2	0.000532									

Obr. 4-9: Výpočetní list pro výpočet počtu teoretických pater kolony modifikovanou grafickou metodou

5 ZÁVĚR

V rámci bakalářské práce byly modifikovány postupy pro řešení absorpčních úloh, týkající se protiproudé absorpce binárních směsí při izotermní absorpci. Postupy jsem modifikovala tak, aby bylo možné provádět výpočty v prostředí programu Microsoft Excel jakožto pravděpodobně nejpoužívanějšího tabulkového kalkulátoru.

Vytvořené způsoby řešení – proložení rovnovážných dat náhradními funkcemi, výpočet celkové bilance, výpočet rozměrů absorbérů se spojitým a stupňovitým stykem fází jsem z důvodu praktické ukázky aplikovala na příklady uvedené v kapitole 4.

Modifikované grafické řešení patrového absorbérů, kde na rozdíl od ručního postupu jsou využity některé nástroje Excelu pro prokládání rovnovážných křivek, je zvláště vhodné pro studijní účely, kdy se postupuje od patra k patru a studenti si mohou zvláště objasnit princip řešení patrových absorbérů.

Metody řešení – celkové bilance, stanovení výšky absorbérů integrací základní rovnice a na základě analyticky vyjádřené hnací síly a řešení patrového absorbérů metodou absorpčního faktoru může sloužit pro vlastní řešení absorpcí nebo pro kontrolu správnosti řešení při výuce. Při stanovení výšky absorbérů integrací základní rovnice si navíc studenti mohou osvojit numerické řešení problému vyjádřeného integrálním počtem.

6 POUŽITÁ LITERATURA

[1] VOLÁK, Zdeněk, KUHLER Milan a SÁKRA Tomáš. *Chemické inženýrství II*. Vyd. 4. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2007, 281 s. ISBN 978-80-7194-947-3.

[2] HOBLER, Tadeusz. *Absorpce*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1967, 449 s.

[3] MÍKA, Vladimír. *Základy chemického inženýrství*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1977, 870 s.

[4] PILAŘ, Antonín. *Chemické inženýrství: učebnice pro vys. školy chemickotechnologické*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1972, 340 s.

[5] PECHOČ, Vladimír. *Vyhodnocování měření a početní metody v chemickém inženýrství*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1981, 228 s.

[6] COULSON, J.M. *Chemical engineering*. 3rd ed.(S.I. units). Oxford: Pergamon, 1985. ISBN 0080229190.

[7] VOLÁK, Zdeněk. *Příručka k chemicko-inženýrským výpočtům II*. 1. vyd. Praha: STNL, 1982.

7 ELEKTRONICKÉ PŘÍLOHY

Příloha A Aproximace rovnovážných dat

Příloha B1 Celková bilance

Příloha B2 Náplňové absorbéry

Příloha B3 Patrové absorbéry