

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta chemická

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2023

Maksim Menshikh



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV CHEMIE A TECHNOLOGIE OCHRANY ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

INSTITUTE OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY OF ENVIRONMENTAL PROTECTION

SEPARACE PACHOVÝCH LÁTEK ZE VZDUŠIN

SEPARATION OF ODOROUS SUBSTANCES FROM AIR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Maksim Menshikh

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Josef Kalivoda, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Číslo práce: FCH-DIP1869/2022 Akademický rok: 2022/23
Ústav: Ústav chemie a technologie ochrany
životního prostředí
Student: **Maksim Menshikh**
Studijní program: Environmentální chemie a technologie
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Josef Kalivoda, Ph.D.**

Název diplomové práce:

Separace pachových látek ze vzdušín

Zadání diplomové práce:

- 1) Literární rešerše
 - teorie výměny hmoty
 - typů výměníků hmoty
 - technologií separace pachových látek v průmyslu
- 2) Volba tří pachových látek pro separaci
- 3) Projekce separačního zařízení pro odstranění vytipovaných pachových látek
- 4) Návrh postupu pro experimentální ověření funkčnosti naprojektovaného zařízení

Termín odevzdání diplomové práce: 8.5.2023:

Diplomová práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu.
Toto zadání je součástí diplomové práce.

Maksim Menshikh
student

Ing. Josef Kalivoda, Ph.D.
vedoucí práce

vedoucí ústavu

V Brně dne 1.2.2023

prof. Ing. Michal Veselý, CSc.
děkan

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem absorpčního zařízení pro separaci pachových látek. Hlavním cílem práce je navrhnout efektivní zařízení, které by umožnilo absorpci vybraných látek (H_2S , kyselina propionová, kyselina butanová) z plynné fáze do kapalně fáze. Práce se zaměřuje na studium absorpčních procesů a různých typů absorpčních zařízení. Na základě těchto poznatků jsou navrženy dvě varianty vlastních zařízení, která využívají speciální absorbent pro efektivní separaci cílových látek. Dále jsou prezentovány výsledné charakteristiky a postup pro experimentální ověření navrženého absorbéru. Tato práce představuje přínos v oblasti procesů čištění plynů, kde je separace látek z plynné fáze velmi důležitá.

KLÍČOVÁ SLOVA

absorpce plynů, ochrana ovzduší, absorpce s chemickou reakcí, absorpční zařízení

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the design of an absorption device for the separation of odorous substances. The main objective of the thesis is to design an efficient device that would enable the absorption of selected substances (H_2S , propionic acid, butanoic acid) from the gas phase to the liquid phase. The work focuses on the study of absorption processes and different types of absorption devices. Based on these findings, two variants of devices that use a special absorbent for efficient separation of the substances are designed. Furthermore, the resulting characteristics and the procedure for experimental verification of the proposed absorber are presented. This work represents a contribution in the field of gas cleaning processes where separation of gas phase species is of great importance.

KEYWORDS

absorption of gases, air protection, absorption with chemical reaction, absorption equipment

MENSHIKH, Maksim. *Separace pachových látek ze vzdušín*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149098>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie a technologie ochrany životního prostředí, 51 s. Vedoucí práce Josef Kalivoda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FCH VUT.

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych vyjádřil své upřímné poděkování svému vedoucímu práce, panu Ing. Josefu Kalivodovi Ph.D., za cenné rady, trpělivost, odborný dohled a vedení během celého procesu psaní diplomové práce, a za to, že po celou dobu mého studia byl pro mě učitelem v pravém smyslu slova.

Děkuji panu prof. Ing. Tomáši Svěrákovi, CSc. za odborné rady, vstřícný přístup a přínosné diskuze.

Poděkování patří panu Ing. Ondřeji Křištofovi Ph.D. za odbornou pomoc a vstřícnost při vypracování grafické části diplomové práce.

Dále pak děkuji celému odbornému týmu chemických inženýrů pod vedením prof. Ing. Tomáše Svěráka, CSc. z fakulty chemické a fakulty strojního inženýrství za ochotnou spolupráci a podporu.

Chtěl bych také poděkovat celé fakultě za poskytnutí možnosti studovat na této vynikající instituci a za veškerou podporu a vedení, které jsem během svého studia obdržel.

Za podporu, inspiraci, a poskytnuté příležitosti v neposlední řadě děkuji mamě, tátovi a bratrovi. Za trpělivost, laskavost a nesmírnou podporu nejen během psaní práce ale i v průběhu života, mnohokrát děkuji své manželce. Bez Vás by to všechno nebylo možné.

OBSAH

ÚVOD.....	1
1. TEORETICKÁ ČÁST	2
1.1. Problematika vybraných pachových sloučenin	2
1.2. Technologie snižování emisí pachových složek	2
1.3. Absorpce.....	3
1.4. Typy absorpčních zařízení.....	4
1.4.1. Absorpční zařízení se souvislým kontaktem fází	4
1.4.2. Absorpční zařízení se stupňovitým kontaktem fází.....	7
1.5. Teorie absorpce.....	8
1.5.1. Fyzikální absorpce	11
1.5.2. Absorpce s chemickou reakcí.....	14
1.5.3. Absorpce směsi plynů	16
2. PRAKTICKÁ ČÁST.....	18
2.1. Diskuze výsledků	38
3. ZÁVĚR.....	40
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	41
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	44
SEZNAM OBRÁZKŮ	47
SEZNAM TABULEK.....	48
PŘÍLOHY	49

ÚVOD

Pachové látky jsou látky, vyvolávající pachový vjem. Emise pachových látek, jejich vliv na obyvatelstvo, omezení emisí těchto látek ze zdrojů znečišťování ovzduší, byly zavedena do systému ochrany ovzduší právní ochranou v roce 2002. Negativní vjemy způsobené touto skupinou látek jsou důležitým faktorem při výběru koupě nemovitosti za účelem bydlení. Vybudování zábavních a obchodních center v blízkosti zdrojů pachových látek může vést v konečném důsledku ke snížení výdělečnosti těchto center. Dalším negativním důsledkem je vliv na lidské zdraví. Dlouhodobé vystavení vysokým koncentracím pachových látek může způsobit otupění jednoho ze základních lidských smyslů – čichu, nevolnost až zvracení, dýchací nebo psychické problémy, bolesti hlavy.

Diplomová práce se zabývá separací pachových látek ze vzdušín a je rozdělena do několika kapitol. První kapitola je zaměřena na obecné principy separace pachových složek s podrobnějším popisem vybraného průmyslového procesu jejich odstranění.

V následující kapitole je detailně popsán návrh separačního stupně odstranění vybraných pachových složek na základě skutečných požadavků průmyslového partnera.

1. TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část je rozdělena do dvou celků. První část je stručným popisem problematiky vybraných chemických sloučenin způsobujících nepříjemné pachy. V druhé části je rozbor chemicko-inženýrských procesů snižování koncentrací těchto látek ze vzdušín.

1.1. Problematika vybraných pachových sloučenin.

Vjem pachů je velmi subjektivní, jehož podstatou je evoluční vývoj. Reakce organismu na pachy může být prvním varovným stupněm nebezpečnosti některých látek. Příkladem mohou být zkažené potraviny vylučující charakteristický odér, upozorňující na jejich stav [17].

Tabulka 1: Některé pachové složky vyskytující se v prostředí [17]

Odorant	Zdroj
Kyselina propionová (máselná)	Zkažené máselné výrobky
Diallyl disulphide Alicin	Česnek
Allyl propyl sulfide	Cibule
Ethantiol	Shnilé zelí
Methanthiol	Fekálie

Tabulka 2: Převládající pachové složky v procesu sušení kalů odpadních vod

Kyselina propionová
Kyselina butanová
Pyridin
Anilin
3-methylbutanová kyselina
Kyselina heptanová
Oxid siřičitý
Kyselina pentanová

Tabulka 2 obsahuje dominantní látky stanovené z reálných analýz odebraných z čistírenského kalu čistírny odpadních vod Boskovice.

1.2. Technologie snižování emisí pachových složek

Snižování emisí pachových složek je velmi variabilní skupinou chemicko-inženýrských procesů, které vycházejí z rozličné fyzikálně-chemické podstaty. Práh pachu každé látky se stanovuje olfaktometricky a je závislý na vlastnostech látky. Při návrhu technologie se vychází z údajů publikovaných v specializované literatuře obsahující minimální pachové koncentrace.

V současné době se aplikuje pět základních procesů pro snížení pachových emisí, adsorpce, termická katalytická/nekatalytická oxidace, netermická oxidace, biologické procesy čištění plynů. [16]:

Adsorpce

Adsorpce je proces odstraňování nežádoucích látek sorpcí na povrch sorbentu. Nejčastěji aplikovaným sorbentem v průmyslu je aktivní uhlí, oxidy hliníku, silikagel, nebo zeolity.

Termická katalytická/nekatalytická oxidace

Spalování plynných složek za vysokých teplot bez katalyzátoru (1 300 °C) nebo s katalyzátorem (120–530 °C).

Netermická oxidace

Oxidace složek s využitím pokročilých oxidačních procesů: peroxidem vodíku, ozónem, chlórem.

Biologické procesy

Jsou aplikovatelné v případech, kdy plyn obsahuje biodegradabilní složky a neobsahuje složky negativně působící na mikroorganismy.

Absorpce

Proces absorpce je detailněji popsán v následující kapitole.

1.3. Absorpce

Absorpce je proces, který je charakterizován koexistencí dvou fází, a sice plynné a kapalné, přičemž probíhá transport hmoty z plynné fáze do fáze kapalné skrze mezifázové rozhraní. Pohlcované plyny se nazývají *absorbovanými složkami*, a složky neúčastnící se absorpce – inerty. Kapalná fáze obsahuje rozpouštědlo a absorbovanou složku. V případě absorpce s chemickou reakcí (chemisorpce) je rozpouštědlem roztok chemicky aktivní složky, která se účastní chemické reakce s absorbovanou složkou [1, 3, 11, 12].

Absorpci lze rozdělit na dva typy, *fyzikální absorpci*, a *absorpci s chemickou reakcí*. Fyzikální absorpce se řídí fyzikálními podmínkami procesu, zatímco při absorpci s chemickou reakcí děj ovlivňuje i reakční kinetika. [1, 11, 12].

Druh absorpce se volí na základě účelu, kterého má být dosaženo. V případě, když se do roztoku absorbuje cenná složka, součástí technologie je *desorpční jednotka* pro vypuzení této složky. Takto zregenerovaný absorpční roztok se využívá v dalším cyklu absorpce. Při vypírce odpadních plynů v případě nemožnosti regenerace vypíracího roztoku, musí být adekvátně zlikvidován. V současné době se ale v souladu s celosvětovou cirkulární ekonomikou přistupuje mnohem častěji k regeneračním technologiím [1].

1.4. Typy absorpčních zařízení

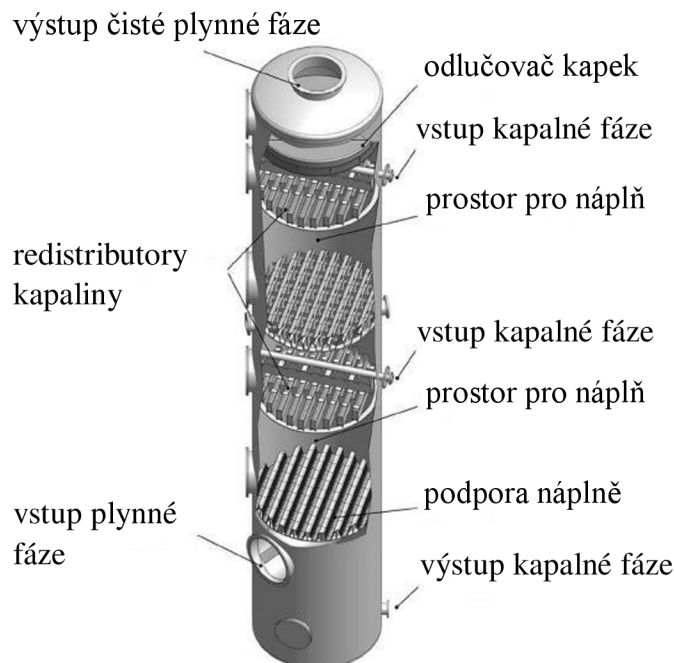
Výměníky hmoty se dělí na dva základní typy. Absorbéry se souvislým a stupňovitým kontaktem fází.

1.4.1. Absorpční zařízení se souvislým kontaktem fází

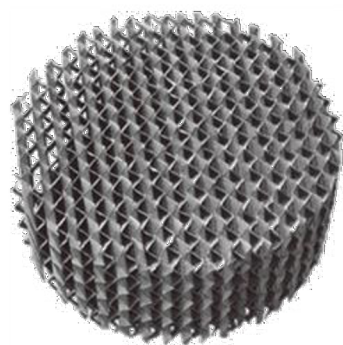
Skupinu absorbérů se souvislým kontaktem fází tvoří zařízení s ustáleným povrchem. Geometrický tvar náplňových elementů určuje styčnou plochu. Mezi zařízení se souvislým kontaktem fází se řadí *náplňové kolony*, *probublávané kolony*, *kolony se smáčenou stěnou*, *sprchové kolony* [1].

Náplňové kolony

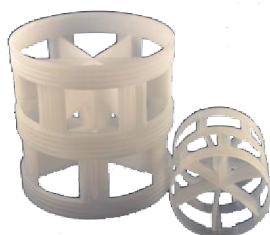
Náplňové absorpční kolony jsou nejběžnějším typem výměníku hmoty. Tyto kolony obsahují různé typy náplňových elementů lišících se tvarem. Druhým druhem náplně je orientovaná náplň. Kontakt plynné a kapalně fáze se uskutečňuje na smáčeném povrchu náplně. Náplň je uložena na nosných roštích. Dostatečně velká plocha specifického povrchu náplně na jednotku objemu zajišťuje vyšší rychlost prostupu hmoty [1].



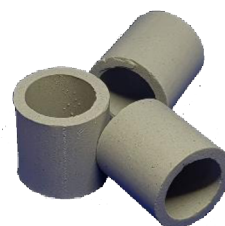
Obrázek 1: Schéma náplňové kolony [25]



Orientovaná náplň



Pall kroužky



Raschigovy kroužky



Berlovo sedlo

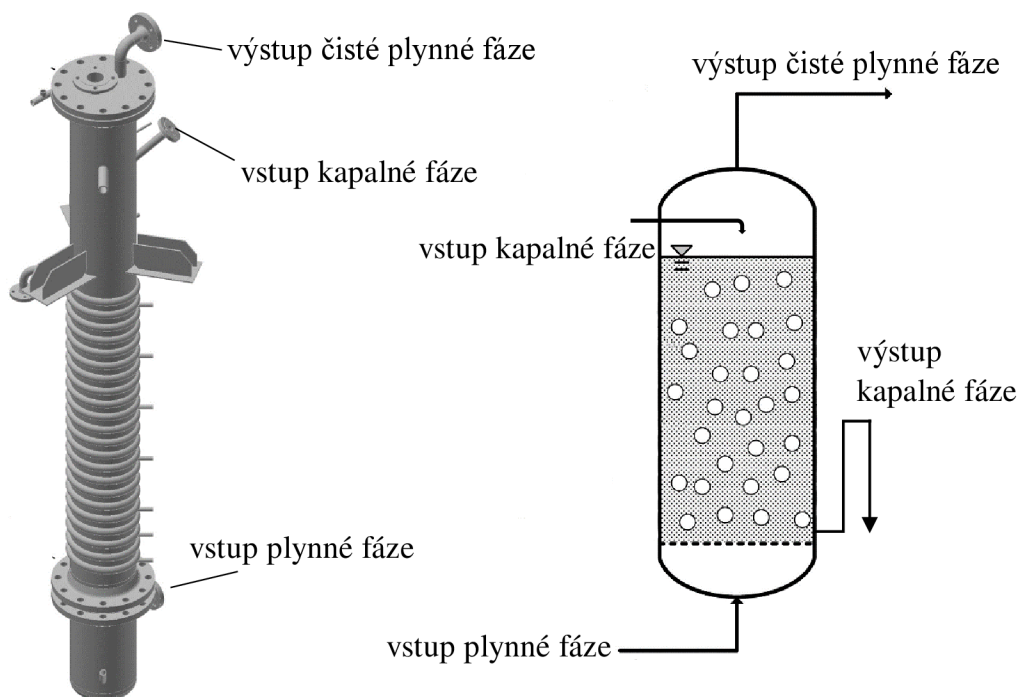


Kaskádový kroužek

Obrázek 2: Příklady typů náplně [25]

Proublávané kolony

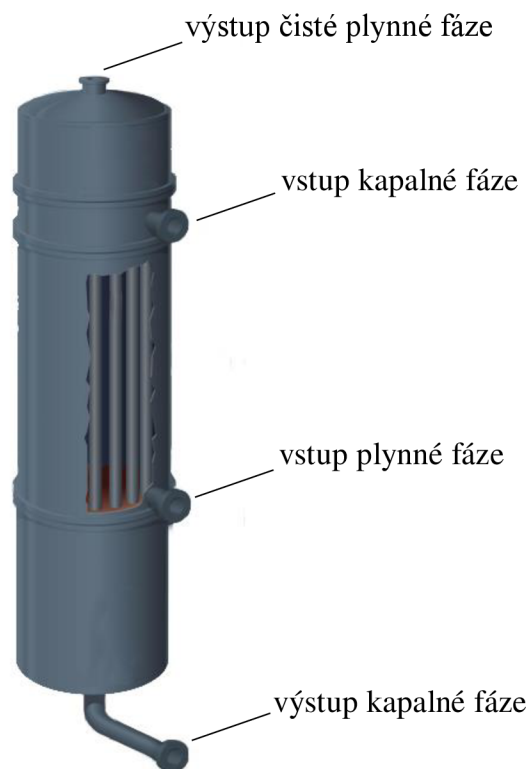
Kontakt plynné a kapalně fáze se zajišťuje probubláváním, dispergované bubliny plynu procházejí skrz vrstvu kapaliny. Bubliny musí zajišťovat co největší povrch styku fází a zároveň probublávání zajišťuje intenzivní promíchávání fáze. Oproti náplňovým kolonám jsou menší a dávají možnost pracovat s kapalinami o vyšších hustotách [1].



Obrázek 3: Schéma probublávacího absorbéru [25]

Kolony se smáčenou stěnou

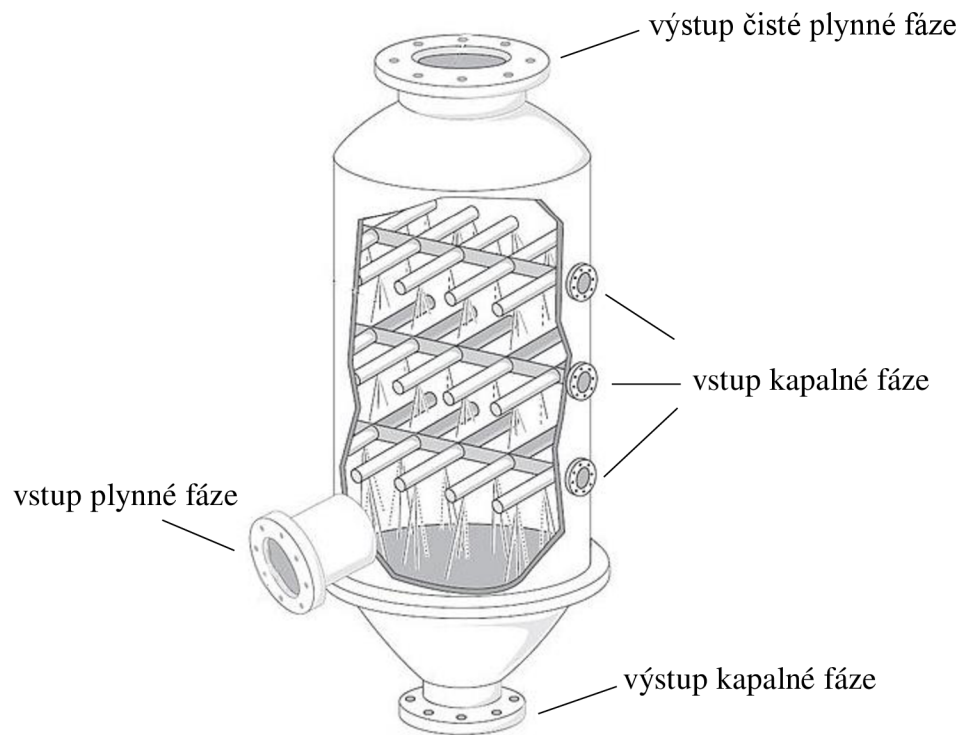
Kolony se smáčenou stěnou si můžeme představit jako válcovou nádobu se systémem trubek. Po povrchu těchto trubek stéká kapalina ve formě tenkého filmu. Uvnitř těchto trubek proudí teplotně nosné médium. Plyná fáze proudí v mezitrubkovém prostoru, čímž je zajištěn styk obou fází. Tyto absorpční zařízení se používají, tam kde je potřeba odvést teplo vznikající v průběhu absorpce. Vzhledem k malé ploše kontaktního povrchu jsou využitelné jen v případech, kdy má absorbovaná složka relativně velkou rozpustnost [1].



Obrázek 4: Schéma kolony se smáčenou stěnou [25]

Sprchové absorpční zařízení

Jedná se o jednoduchou prázdnou kolonu, v které se kapalina rozprašuje do proudu plynu. K prostupu hmoty dochází na povrchu kapek, které jsou vytvořeny systémem trysek podél kolony. Účinnost kolony narůstá s účinnější atomizací kapek, jelikož narůstá specifický povrch. Tento typ zařízení má nižší tlakové ztráty. [1]

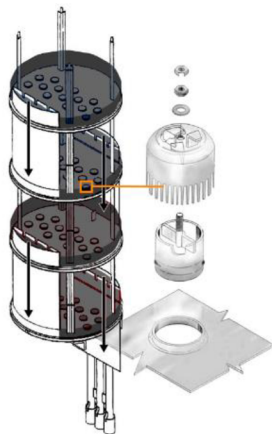


Obrázek 5: Schéma sprchové kolony [25]

1.4.2. Absorpční zařízení se stupňovitým kontaktem fází

Patrové kolony

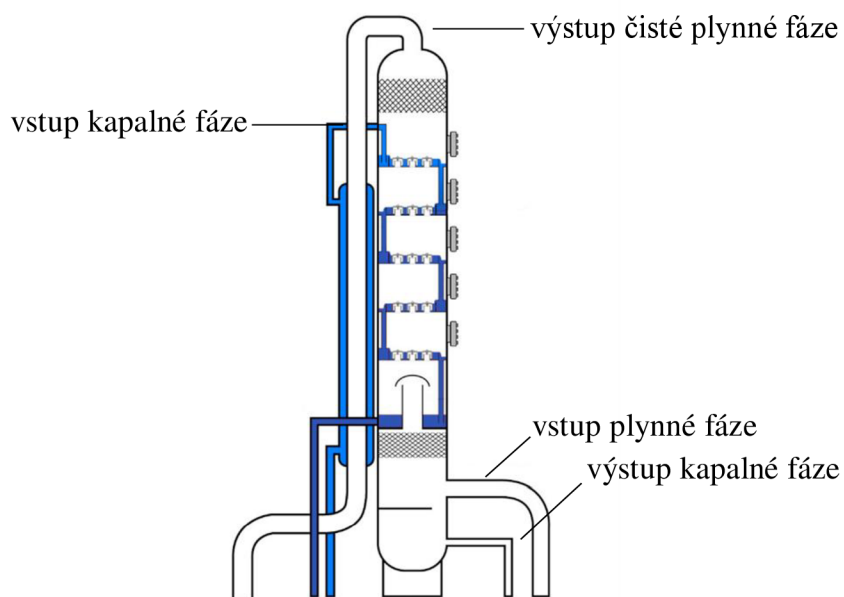
Tento typ zařízení nalézá rozsáhlé využití v procesech separace plynů. Patra jsou tvořeny různě upravenými plechy. Díky delší zadržce kapaliny na patrech jsou charakteristické delší kontaktní dobu obou fází a vyšší účinností. [1]



Umístění pater v koloně



Uspořádání kloboučků v patře



Schématický výkres patrové kolony

Obrázek 6: Schéma patrové kolony [25]

1.5. Teorie absorpce

Vícefázové systémy lze charakterizovat Gibbsovým fázovým zákonem [1, 6, 16]:

$$f + v_s = s + 2 \quad (1.1)$$

kde f je počet fází v systému, v_s je počet stupňů volnosti, s je počet složek systému.

Pro výpočet stupňů volnosti Gibbsův fázový zákon přechází do tvaru:

$$v_s = s + 2 - f \quad (1.2)$$

Systém, který se skládá ze dvou fází $f = 2$ a tří složek $s = 3$ (absorbovaná složka, rozpouštědlo, inert) má počet stupňů volnosti 3.

Každý systém pracuje za určitých tlaků a teploty. Z Gibbsova fázového zákona plyne:

$$y_A = f(x_A)_{T,p} \quad (1.3)$$

kde x_A je molový zlomek složky A v kapalné fázi, y_A je molový zlomek složky A v plynné fázi.

Pomocí relativních molových zlomků lze důsledek Gibbsova fázového pravidla při absorpci vyjádřit:

$$Y_A = f(X_A)_{T,P} \quad (1.4)$$

kde X_A je relativní molový zlomek složky A v kapalně fázi, Y_A je molový zlomek složky A v plynné fázi. Pro převod molového zlomku na relativní a naopak platí [3]:

$$X = \frac{x}{1-x} \quad (1.5)$$

$$x = \frac{X}{1+X} \quad (1.6)$$

$$Y = \frac{y}{1-y} \quad (1.7)$$

$$y = \frac{Y}{1+Y} \quad (1.8)$$

Další možnost je vyjádření pomocí parciálního tlaku absorbované složky v plynné fázi [3]:

$$P_A = f(X_A)_{T,P} \quad (1.9)$$

$$P_A = f(C_A)_{T,P} \quad (1.10)$$

kde P_A je parciální tlak absorbované složky A v plynné fázi, C_A je molární koncentrace složky A v kapalně fázi.

Složení plynné fázi se vyjadřuje pomocí parciálních tlaků jednotlivých složek, pro složku A lze napsat:

$$P_A = y_A \cdot P \quad (1.11)$$

kde P je celkový tlak plynné fáze.

Když kapalina dosahuje stavu nasycení, mezi plynnou a kapalnou fází se ustaví dynamická rovnováha. Při zvýšení parciálního tlaku složky nad roztokem za izotermických a izobarických podmínek narůstá množství rozpuštěné složky v roztoku. Při zvýšení koncentrace složky v roztoku její parciální tlak nad roztokem vzroste. Tento děj popisuje Henryho zákon [3, 16]:

$$P_A = H_A^{cp} \cdot x_A \quad (1.12)$$

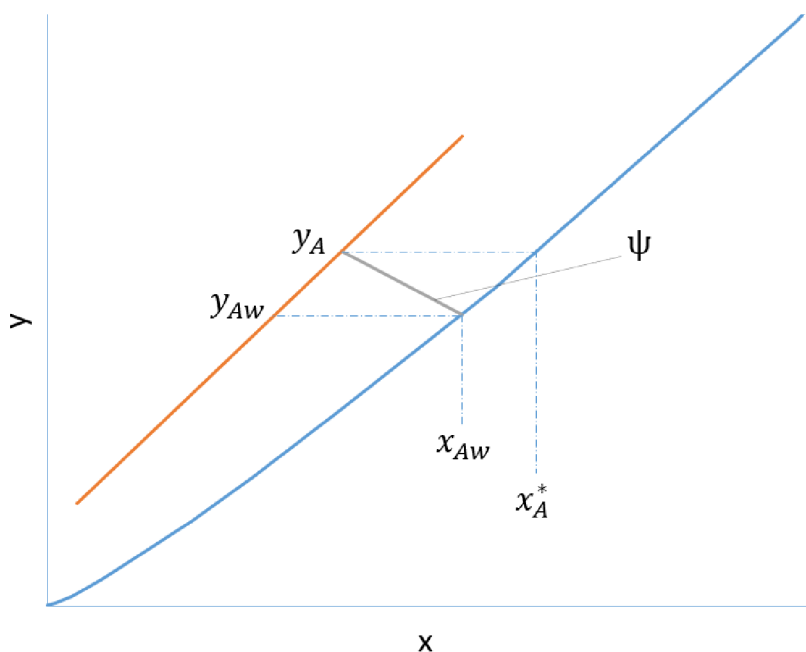
kde H_A^{cp} je Henryho konstanta složky A.

Henryho konstanta může být vyjádřena různou formou, která se liší jednotkou a fyzikálním významem. Například Henryho konstanta H_A^{cp} , již zmíněná dříve, je Henryho konstantou rozpustnosti, vyjadřuje poměr koncentrace rozpuštěné složky v kapalně fázi

a parciální tlak složky nad roztokem a má jednotku $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{Pa}^{-1}$. Její převrácená hodnota je Henryho konstanta těkavosti k_H^{pc} , která vyjadřuje poměr parciálního tlaku složky a její koncentraci v kapalně fázi. Jednou z nejdůležitějších Henryho konstant v procesech absorpce je bezrozměrová Henryho konstanta těkavosti k_H^{cc} a je nezbytným parametrem v technologických výpočtech, když složení fází není možné stanovit graficky. Jelikož pro výpočet součinitele prostupu hmoty platí [5, 8]:

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{\psi}{k_x} \quad (1.13)$$

kde K_y je součinitel prostupu hmoty, k_y je součinitel přestupu hmoty v plynné fázi, k_x je součinitel přestupu hmoty v kapalně fázi, ψ je směrnice úsečky spojující bod hodnot koncentrací složky na fázovém rozhraní mezi kterými platí rovnovážný vztah (x_{Aw}, y_{Aw}) na rovnovážné křivce a bod hodnot koncentrací složky (x_A^*, y_A) na pracovní přímce [5, 12].



Obrázek 7: Směrnice úsečky ψ

Další variantou pro výpočet součinitele prostupu hmoty je vztah [1]:

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{k_H^{cc}}{k_x} \quad (1.14)$$

Henryho konstanta těkavosti k_H^{cc} vyjadřuje poměr koncentrace složky v plynné fázi a koncentrace složky v kapalně fázi.

Za podmínek špatné rozpustnosti plynu v roztoku a nekonečně zředěného roztoku se absorbovaná složka chová jako ideální plyn a kapalný roztok se chová jako ideální roztok.

V tomto případě je Henryho konstanta nezávislá na koncentraci složky v roztoku, ale závisí na teplotě a tlaku. Tuto závislost lze vyjádřit [9]:

$$\left(\frac{\partial \ln H_A}{\partial T}\right) = -\frac{\Delta H_A^{ent\text{ rozp}}}{R \cdot T^2} \quad (1.15)$$

kde $\Delta H_A^{ent\text{ rozp}}$ je změna rozpouštěcí entalpie složky A v nekonečně zředěném roztoku, R je univerzální plynová konstanta, T je termodynamická teplota.

Pokud $\Delta H_A^{ent\text{ rozp}}$ lze v určitém teplotním intervalu považovat za konstantní, lze rovnici upravit:

$$\int d \ln H_A = \int -\frac{\Delta H_A^{ent\text{ rozp}}}{R \cdot T^2} dT \Rightarrow \int d \ln H_A = -\frac{\Delta H_A^{ent\text{ rozp}}}{R} \cdot \int \frac{1}{T^2} dT \quad (1.16)$$

její integrací získáme:

$$H_A^T = H_A^* \cdot e^{\left(\frac{\Delta H_A^{ent\text{ rozp}}}{R \cdot T}\right)} \quad (1.17)$$

kde H_A^T je Henryho konstanta pro požadovanou teplotu, H_A^* je tabelovaná Henryho konstanta.

1.5.1. Fyzikální absorpce

Jestliže koexistující fáze oddělené mezifázovým rozhraním nejsou ve vzájemné rovnováze, probíhá mezi nimi výměna hmoty. Proces sdílení hmoty se skládá z dílčích kroků přestupu hmoty v jedné fázi, prostupu hmoty přes fázové rozhraní a prostupu hmoty v druhé fázi. Hybnou silou procesu výměny hmoty je rozdíl chemických potenciálů, který určuje nerovnováhu systému. Jestliže uvnitř fáze existuje gradient chemického potenciálu

$$\nabla \mu_A = \frac{d\mu_A}{dz} \quad (1.18)$$

kde μ_A je chemický potenciál složky A, z je směr přestupu hmoty přes povrch F, potom pro její přestup platí [1]:

$$W_A = -\frac{D_A C_A}{RT} F \frac{d\mu_A}{dz} \quad (1.19)$$

kde W_A je množství absorbované složky A za jednotku času, D_A je difuzní koeficient složky A, C_A je koncentrace složky A.

Lze vyjádřit gradient chemického potenciálu μ_A pomocí následné rovnice:

$$\mu_A = RT \ln(x_A \gamma_A) \quad (1.20)$$

kde γ_A je koeficient aktivity složky A. Tímto nahradíme gradient chemického potenciálu složky A její koncentračním gradientem a dostaneme:

$$W_A = -D_A F \left(1 + x_A \frac{d \ln \gamma_A}{d x_A} \right) \frac{d C_A}{d z} \quad (1.21)$$

Za předpokladu, že γ_A je nezávislá na koncentraci, $\frac{d \ln \gamma_A}{d x_A} = 0$ a

$$W_A = -D_A F \frac{d C_A}{d z} \quad (1.22)$$

Rovnice (1.22) vyjadřuje Fickův zákon, znak minus v rovnici ukazuje, že přestup probíhá do místa s nižší koncentrací. V procesech *přestupu* hmoty je hybnou silou rozdíl koncentrací v turbulentním jádru tekutina a na mezifázovém rozhraní. Pokud je tento rozdíl kladný, látka přestupuje z turbulentního jádra k fázovému rozhraní. V procesech *prostupu* hmoty je hybnou silou rozdíl mezi skutečnou koncentrací složky v jedné z fází a její rovnovážnou koncentrací [1, 6]. Obecně přestup hmoty látky k mezifázovému rozhraní lze popsat rovnicí:

$$W_A = k F \Delta c \quad (1.23)$$

kde k je součinitel přestupu hmoty, jímž se rozumí množství přenesené látky uvnitř fáze přes jednotku povrchu za jednotku času, Δc je hybná síla vyjádřená koncentrací. Součinitel přestupu hmoty se uvádí v jednotkách $[\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mol}^{-3}]$, když W_A se vyjadřuje v mol/s nebo $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (\text{jednotka hybné síly})^{-1}]$, když W_A [kg/s] [1].

Součinitele přestupu hmoty se vyjadřují v různých formách v závislosti na použité jednotce hybné síly, ale největší užití v technologických výpočtech získal způsob vyjádření přes molární hustoty fází [1, 7]. Tak pro součinitel přestupu hmoty v plynné fázi platí vztah:

$$k_y = k_{gC} \cdot \theta_g \quad (1.24)$$

kde k_{gC} je parciální součinitel přestupu hmoty látky v plynné fázi, θ_g je molární hustota plynné fáze ($\theta_g = \frac{P}{RT}$), pro součinitel přestupu hmoty v kapalně fázi:

$$k_x = k_{lC} \cdot \theta_l \quad (1.25)$$

kde k_{lC} je parciální součinitel přestupu hmoty látky v kapalně fázi, θ_l je molární hustota kapalně fáze [5].

Parciální součinitele přestupu hmoty se dá spočítat různými metodami. Metoda se volí na základě dat, které inženýr má k dispozici. V této práci je uvedena metoda výpočtu pomocí kritériálních rovnic.

Kritériální rovnice je závislostí mezi jakýmsi stanoveným kritériem podobnosti a určujícím kritériem podobnosti, mají stejnou hodnotu v modelovém systému

a v odpovídajícím velkém průmyslovém zařízení. V procesech absorpce nejdůležitějšími kritérii jsou [5]:

- Re – Reynoldsovo číslo charakterizující chování proudící kapaliny
- Sc – Schmidtovo číslo charakterizuje poměr kinematické viskozity a difuzního koeficientu látky
- Sh – Sherwoodovo číslo charakterizuje poměr rychlosti přestupu látky a rychlosti difuze
- Ha – Hattovo číslo charakterizuje poměr hodnoty součinitele přestupu hmoty při vlivu chemické reakce a hodnoty přestupu hmoty v systému nedoprovázeném chemickou reakcí.

Všechny vztahy se stanovují empiricky a jsou individuální pro každé navrhované zařízení. Diplomová práce se věnuje návrhu náplňové kolony, proto následující vztahy jsou použitelné pro výpočet parciálních součinitelů přestupu hmoty pro náplňovou kolonu. Tak pro součinitel přestupu hmoty v plynné fázi platí [5]:

$$Sh_g = \frac{k_y}{\theta_g a_t D_{AB}} = \frac{k_{cg}}{a_t D_{AB}} \quad (1.26)$$

kde a_t je měrná hustota povrchu vybraného typu náplně, D_{AB} je difuzivita složky A v složce B.

$$Sh_g = C_g Re_g^{3/4} Sc_g^{1/3} [\varepsilon(\varepsilon - z_l)]^{-1/2} \quad (1.27)$$

kde C_g je tabelovaná hodnota konstanty pro určitou náplň, ε je mezerovitost náplně, z_l je zádrž kapaliny na náplni, pro kterou platí vztah:

$$z_l = \left(12 \frac{\dot{m}_l a_t^2 \mu_l}{g S \rho_l^2} \right)^{1/3} \quad (1.28)$$

kde \dot{m}_l je hmotnostní průtok kapaliny, μ_l je dynamická viskozita kapaliny, g je gravitační zrychlení, S je plocha průřezu kolony (skrz vrstvu náplně), ρ_l je hustota kapaliny. V rovnici (1.27) pro Reynoldsovo číslo:

$$Re_g = \frac{\dot{m}_g}{a_t S \mu_g} \quad (1.29)$$

kde \dot{m}_g je hmotnostní průtok plynu, μ_g je dynamická viskozita plynu. Pro Schmidtovo číslo:

$$Sc_g = \frac{\mu_g}{\rho_g D_{AB}} \quad (1.30)$$

kde ρ_g je hustota plynu

Pro kapalnou fázi:

$$\frac{k_x}{\theta_l} \left(\frac{\rho_l}{\eta_l g} \right)^{1/3} = k_{cl} \left(\frac{\rho_l}{\mu_l g} \right)^{1/3} = C_l Re^{1/3} Sc_l^{-1/2} \left(\frac{a_t}{\varepsilon} \right)^{1/2} \left(\frac{\mu_l^2}{g \rho_l^2} \right)^{1/6} \quad (1.31)$$

kde C_l je tabelovaná hodnota konstanty pro určitou náplň. V rovnici (1.31) pro Reynoldsovo číslo:

$$Re_l = \frac{\dot{m}_l}{a_t S \mu_l} \quad (1.32)$$

Pro Schmidtovo číslo:

$$Sc_l = \frac{\mu_l}{\rho_l D_{AC}} \quad (1.33)$$

Součinitelem prostupu hmoty se rozumí celkový převod z jádra jedné fáze do jádra druhé fáze. Vztah pro výpočet součinitele prostupu hmoty v plynné fázi byl zmíněn dříve viz rovnice (1.13), pro součinitel prostupu hmoty v kapalně fázi platí: [5, 12]:

$$\frac{1}{K_x} = \frac{1}{k_x} + \frac{1}{\psi k_y} \quad (1.34)$$

1.5.2. Absorpce s chemickou reakcí

Při absorpci doprovázenou chemickou reakcí dochází v kapalně fázi k reakci mezi absorbovanou složkou a kapalinou. Část složky přechází do chemicky vázaného stavu a tímto koncentrace absorbované složky se snižuje, čímž koncentrační gradient narůstá a zvyšuje se rychlost absorpce. V případě okamžité reakce může nastat stav, kdy rychlost absorpce závisí na rychlostí difuze reagující složky v kapalně fázi k mezifázovému rozhraní. Obecně však platí, že čím nižší je odpor na straně kapalně fáze, tím vyšší je rychlost absorpce, přičemž velký odpor na straně plynně fáze absorpci zpomaluje. Přidáním chemického reagentu do kapalně fáze se sníží odpor na straně kapalně fáze [1].

Řád chemické reakce

Řád chemické reakce určuje závislost rychlosti chemické reakce na koncentraci složek. V chemické kinetice reakce můžeme rozdělit na:

1. Reakce prvního řádu
2. Reakce druhého řádu
3. Reakce třetího řádu

Reakci prvního řádu popisuje rovnice:

$$v_A = k_1 \cdot (c_A)^1 \cdot (c_B)^0 \quad (1.35)$$

kde v_A je rychlost chemické reakce difundující složky A, k_1 je rychlostní konstanta reakce prvního řádu a mocnitéle jsou stechiometrické koeficienty příslušných složek. V procesech absorpce plynů však reakce prvního řádu jsou velmi vzácné a téměř se nevyskytují.

Pro reakce druhého řádu platí:

$$v_A = k_2 \cdot (c_A)^2 \cdot (c_B)^0 \quad (1.36)$$

nebo

$$v_A = k_2 \cdot (c_A)^1 \cdot (c_B)^1 \quad (1.37)$$

kde k_2 je rychlostní konstanta reakce druhého řádu. Pro reakce třetího řádu:

$$v_A = k_3 \cdot (c_A)^3 \cdot (c_B)^0 \quad (1.38)$$

nebo

$$v_A = k_3 \cdot (c_A)^2 \cdot (c_B)^1 \quad (1.39)$$

kde k_3 je rychlostní konstanta reakce třetího řádu [1, 2, 19].

Vliv rychlosti chemické reakce

V procesech absorpce se rozlišují následné charaktery rychlosti chemické reakce:

- Okamžitá reakce
- Rychlá reakce
- Pomalá reakce
- Velmi pomalá reakce

A následné kinetické režimy:

- Příklad A – Okamžitá reakce
- Příklad B – Rychlá reakce druhého řádu
- Příklad C – Reakce s přebytkem koncentrace aktivní složky rozpouštědla (pseudoprvní řád)
- Příklad D – Pomalá reakce

Pokud je chemická reakce ve srovnání s rychlostí přenosu hmoty velmi pomalá, je kinetika omezujícím krokem rychlosti absorpce. Když reakce je rychlá nebo okamžitá, faktorem omezujícím rychlost absorpce je přenos hmoty. Výsledné charakteristiky absorpčního

zařízení jsou závislé na kinetickém režimu, podle kterého se systém provozuje. Pro posouzení vlivu chemické reakce na proces a určení kinetického režimu byly zavedeny Hattovo číslo Ha (viz kapitola 1.5.2.) a reakční faktor E , který vyjadřuje koeficient zrychlení absorpce v kapalně fázi při chemické reakci. Pro výpočet Hattová čísla se uvádí vztah [1, 2, 12]:

$$Ha = \sqrt{\frac{r_A \cdot D_{AB}}{c_A \cdot (k_{IC})^2}} \quad (1.40)$$

kde D_{Al} je difuzní koeficient absorbované složky A v roztoku, c_{Cl} je koncentrace aktivní složky rozpouštědla.

Pro výpočet reakčního faktoru potom platí:

$$E = \frac{\sqrt{Ha \frac{E_i - E}{E_i - 1}}}{\tanh \sqrt{Ha \frac{E_i - E}{E_i - 1}}} \quad (1.41)$$

kde E_i je limitní hodnota reakčního faktoru v případě okamžité reakce.

Z důvodu, že analyticky spočítat hodnotu reakčního faktoru není možné, používá se reakční faktor okamžité reakce E_i , pro jeho výpočet:

$$E_i = 1 + \frac{D_{Cl} \cdot c_{Cl}}{n \cdot D_{Al} \cdot c_{Af}} \quad (1.42)$$

kde D_{Cl} je difuzní koeficient aktivní složky roztoku v kapalně fázi, c_{Af} je koncentrace absorbované složky A na mezifázovém rozhraní.

Analýzou hodnot Ha a E_i lze určit kinetický režim systému:

$Ha < 1$, $E \approx 1$ - systém má kinetický režim D

$Ha < E_i$ - systém má kinetický režim C

$1 < Ha < E_i$ - systém má kinetický režim B

$Ha > E_i$ - systém má kinetický režim A

1.5.3. Absorpce směsi plynů

Ve vícesložkovém systému přítomnost ostatních složek ovlivňuje rovnováhu a rychlosti difuze jednotlivých složek. Jestliže složky směsi difundují ve stejném směru, rychlost difuze se snižuje. Avšak během protisměrné difuze se rychlost difuze absorbované složky zvyšuje.

Vícesložkový systém se chová podobně jako binární systém, ale jednotlivé parametry se řeší pomocí matic. Například pro součinitel prostupu hmoty platí [1, 20]:

$$[K_y] = \begin{bmatrix} K_{AA}K_{AB} & \cdots \\ K_{BA}K_{BB} & \cdots \\ \vdots & \end{bmatrix} \quad (1.43)$$

Analogicky lze řešit ostatní parametry procesu.

V případě, když koncentrace absorbované složky je nízká, vliv přítomnosti ostatních složek je zanedbatelný a lze dospět ke zjednodušení vztahů:

$$(W_i) = K_{yi}F(y_i - y_i^*) \quad (1.44)$$

kde W_i je množství i -té absorbované složky za jednotku času, K_{yi} je součinitel prostupu hmoty i -té složky, y_i je molový zlomek i -té složky v plynné fázi, y_i^* je molový zlomek i -té složky v plynné fázi v rovnovážném stavu. Z důvodu nelinearity složení plynné fáze podél absorberu byl zaveden pojem *klíčová složka*. Jedná se o takovou složku systému, jejíž Hodnota Henryho konstanty těkavosti klíčové složky k_H^{cc} se blíží k hodnotě hydraulického zatížení kolony. Změnou hydraulického zatížení kolony se dá libovolná složka systému zvolit jako klíčová. Složky těkavější než klíčová složka se absorbují hůř, a tudíž se volba nejtěkavější složky jako klíčové, jeví jako racionální rozhodnutí [1, 21].

2. PRAKTICKÁ ČÁST

Technologický výpočet

Hlavním požadavkem zařízení je účinnost odstranění pachových složek ze vzdušiny pod pachový limit.

Tabulka 3: Vstupní parametry plynu

Teplota [°C]	Tlak [Pa]	Objemový průtok plynu [m ³ _N /h]	Obsah polutantů [mg/m ³ _N]		
			H ₂ S	Kyselina propionová	Kyselina butanová
25	101 325	2 500	15	10	10

Tabulka 4: Pachové limity polutantů [g/m³]

H ₂ S	Kyselina propionová	Kyselina butanová
7·10 ⁻⁷	8,4·10 ⁻⁵	1·10 ⁻⁶

Průtok plynu za pracovních podmínek:

$$\dot{V}_{g_{prac}} = \frac{T_{prac}}{273,15} \cdot \frac{101\,325}{p_{prac}} \cdot \dot{V}_{g_N} \quad (2.1)$$

$$\dot{V}_{g_{prac}} = \frac{298,15}{273,15} \cdot \frac{101\,325}{101\,325} \cdot 2\,500 = 2\,728,812 \text{ m}^3/\text{h}$$

kde $\dot{V}_{g_{prac}}$ je pracovní průtok plynu, T_{prac} je pracovní termodynamická teplota, p_{prac} je pracovní tlak, \dot{V}_{g_N} je průtok plynné fáze za normovaných podmínek.

Koncentrace polutantů za pracovních podmínek:

$$c_N \cdot \dot{V}_{g_N} = c_{prac} \cdot \dot{V}_{g_{prac}} \quad (2.2)$$

kde c_N je koncentrace polutantu ve vzdušině za normálních podmínek, c_{prac} je koncentrace polutantu ve vzdušině za pracovních podmínek

$$c_{H_2S_{prac}} = \frac{c_{H_2S_N} \cdot \dot{V}_{g_N}}{\dot{V}_{g_{prac}}} = \frac{0,015 \cdot 2\,500}{2\,728,81200} = 1,374 \cdot 10^{-2} \text{ g/m}^3 \quad (2.3)$$

$$c_{KP_{prac}} = 9,16 \cdot 10^{-3} \text{ g/m}^3$$

$$c_{KB_{prac}} = 9,16 \cdot 10^{-3} \text{ g/m}^3$$

Molární koncentrace složek:

$$c = \frac{c_{hm}}{M} \quad (2.4)$$

$$c_{\text{H}_2\text{S}} = \frac{0,01374}{34,08} = 4,032\ 348\ 5 \cdot 10^{-4} \text{ mol/m}^3$$

$$c_{\text{KP}} = 1,236\ 7 \cdot 10^{-4} \text{ mol/m}^3$$

$$c_{\text{KB}} = 1,039\ 779 \cdot 10^{-4} \text{ mol/m}^3$$

Molový průtok složek:

$$\dot{G}_M = c \cdot \dot{V}_{\text{prac}} \quad (2.5)$$

Molový průtok sulfanu:

$$\dot{G}_{M_{\text{H}_2\text{S}}} = 4,032\ 348\ 5 \cdot 10^{-4} \cdot 2\ 728,812\ 00 = 1,100\ 352 \text{ mol/h}$$

Molový průtok kyseliny propionové:

$$\dot{G}_{M_{\text{KP}}} = 0,337\ 473 \text{ mol/h}$$

Molový průtok kyseliny butanové:

$$\dot{G}_{M_{\text{KB}}} = 0,283\ 736 \text{ mol/h}$$

Molový zlomek složky v plynné fázi na vstupu do absorbéru:

$$y_1 = \frac{\dot{G}_M}{\dot{G}_{M_{\text{celk}}}} \quad (2.6)$$

kde $\dot{G}_{M_{\text{celk}}}$ je celkový molový průtok plynné fáze, pro jeho výpočet:

$$\dot{G}_{M_{\text{celk}}} = \frac{\dot{V}_{gN}}{22,4 \cdot 1000} = \frac{2500}{22,4 \cdot 1000} = 111\ 607,142\ 9 \text{ mol/h} \quad (2.7)$$

$$y_{1_{\text{H}_2\text{S}}} = \frac{1,100\ 352}{111\ 607,142\ 9} = 9,859 \cdot 10^{-6}$$

$$y_{1_{\text{KP}}} = 3,023 \cdot 10^{-6}$$

$$y_{1KB} = 2,542 \cdot 10^{-6}$$

Potřebná účinnost odstranění:

$$\varphi = 100 - \frac{100 \cdot c_{\text{prah}}}{c_{\text{prac}}} \quad (2.8)$$

kde φ je procentní účinnost odstranění složky, c_{prah} je koncentrace pachového prahu složky.

$$\varphi_{\text{H}_2\text{S}} = 100 - \frac{100 \cdot 7 \cdot 10^{-7}}{1,374 \cdot 10^{-2}} = 99,994\%$$

$$\varphi_{\text{KP}} = 99,083\%$$

$$\varphi_{\text{KB}} = 99,989\%$$

Pro určení složení kapalně fáze na výstupu z absorberu je potřeba nejprve zjistit Henryho konstantu rozpustnosti H^{cp} pro každou složku:

Tabulka 5: Hodnoty H^{cp} polutantů [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1}$] [9]

H ₂ S	Kyselina propionová	Kyselina butanová
1·10 ⁻³	70	44

Pro přepočítání na Henryho konstantu těkavosti k_H^{px} použijeme tabulku:

Tabulka 6: Vztahy pro přepočítání Henryho konstant [9]

	$\frac{H^{cp}}{\text{mol} (\text{m}^3 \text{Pa})^{-1}}$	$\frac{H^{cp}}{\text{M atm}^{-1}}$	$\frac{H^{cc}}{1}$	$\frac{H^{bp}}{\text{mol} (\text{kg Pa})^{-1}}$	$\frac{H^{bp}}{\text{mol} (\text{kg atm})^{-1}}$	$\frac{H^{xp}}{1/\text{atm}}$	$\frac{\alpha}{1}$
$\frac{k_H^{px}}{\text{atm}}$	0.546182	55.3419	1353.95	5.47826×10^{-4}	55.5084	1.00000	1240.42
$\frac{k_H^{pc}}{\text{m}^3 \text{Pa mol}^{-1}}$	1.00000	101.325	2478.94	1.00301×10^{-3}	101.630	1.83089	2271.08
$\frac{k_H^{pc}}{\text{m}^3 \text{atm mol}^{-1}}$	9.86923×10^{-6}	1.00000×10^{-3}	0.0244652	9.89893×10^{-9}	1.00301×10^{-3}	1.80695×10^{-5}	0.0224138
$\frac{k_H^{cc}}{1}$	4.03398×10^{-4}	0.0408743	1.00000	4.04612×10^{-7}	0.0409973	7.38578×10^{-4}	0.916150

$$k_H^{px} \cdot H^{cp} = 0,546 182 \quad (2.9)$$

$$k_H^{px} = \frac{0,546 182}{H^{cp}}$$

$$k_{\text{H}_2\text{S}}^{px} = \frac{0,546 182}{1 \cdot 10^{-3}} = 546,182 \text{ atm} = 55,341 891 \text{ MPa}$$

$$k_{\text{HKP}}^{px} = 7,8026 \cdot 10^{-3} \text{ atm} = 790,6 \text{ Pa}$$

$$k_{\text{HKB}}^{px} = 1,241 \cdot 10^{-2} \text{ atm} = 1\,257,8 \text{ Pa}$$

$$x_2^* = \frac{p_{\text{prac}} \cdot y_1}{k_{\text{H}}^{px}} \quad (2.10)$$

kde x_2^* je molový zlomek složky v kapalně fázi v rovnovážném stavu.

$$x_{2\text{H}_2\text{S}}^* = \frac{101\,325 \cdot 9,859 \cdot 10^{-6}}{55\,341\,891} = 1,805 \cdot 10^{-8}$$

$$x_{2\text{KP}}^* = 3,875 \cdot 10^{-4}$$

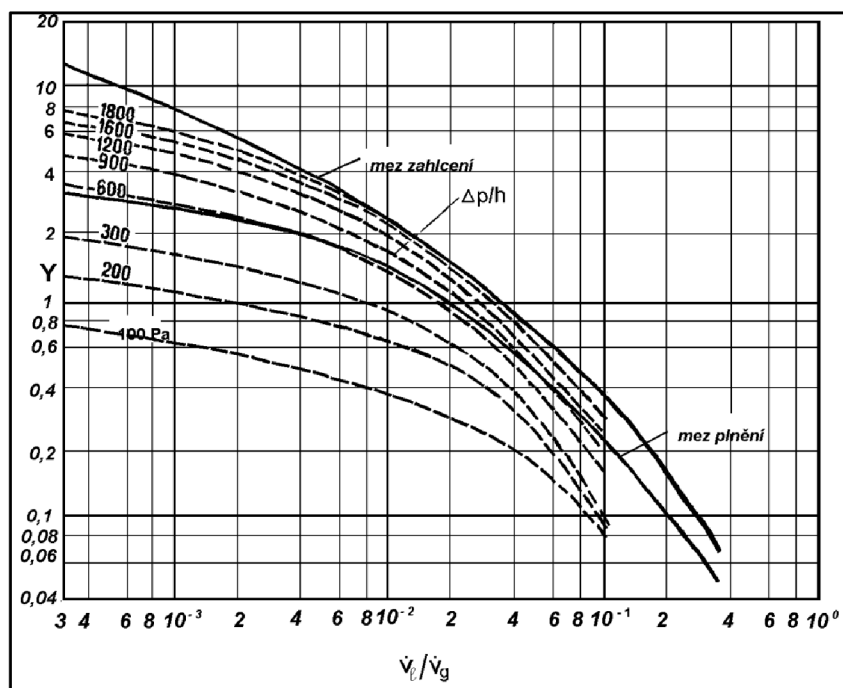
$$x_{2\text{KB}}^* = 2,048 \cdot 10^{-4}$$

Volba základních parametrů absorpčního zařízení:

Tabulka 7: Základní zvolené parametry kolony

Průměr [m]	Rozpouštědlo	Náplň
0,8	1% hm. roztok Na ₂ CO ₃	Plastové Pall kroužky, d 12 mm

Nejvyšší účinnost kolony se dosahuje, když kolona pracuje za podmínek blízkých k zahlcení. Tyto podmínky určuje hydraulické zatížení absorbéru – poměr objemových průtoků kapaliny a plynu. Pro určení objemového průtoku kapaliny potřebný pro režim zahlcení se používá Rammův diagram [1, 3]:



Obrázek 8: Rammův diagram [3]

$$Y = C \cdot \frac{w_g^2}{g \cdot d_p} \cdot \left(\frac{\mu_\lambda}{w_g \cdot d_p \cdot \rho_g} \right)^{0,1} \cdot \left(\frac{\rho_{H_2O}}{\rho_\lambda} \right)^2 \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_{vzduch}} \right)^{0,85} \quad (2.11)$$

kde C je tabelovaná konstanta pro použitou náplň, w_g^2 je mimovrstvová rychlost plynu, g je gravitační zrychlení, d_p je charakteristický průměr náplně, μ_l je dynamická viskozita roztoku, ρ_g je hustota plynu, ρ_{H_2O} je hustota vody, ρ_l je hustota roztoku, ρ_{vzduch} je hustota vzduchu.

Odhad parametrů 1% roztoku Na_2CO_3

Hustota

Tabulka 8: Závislost hustoty 1% vodního roztoku Na_2CO_3 na teplotě [g/cm^3] [13]

0 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	60 °C	80 °C	100 °C
1,0109	1,0103	1,0086	1,0058	1,0022	0,9929	0,9814	0,9683

Regresní rovnice závislosti hustoty 1% vodního roztoku Na_2CO_3 na teplotě:

$$y = -37\,963x^2 + 67\,084x - 32\,078$$

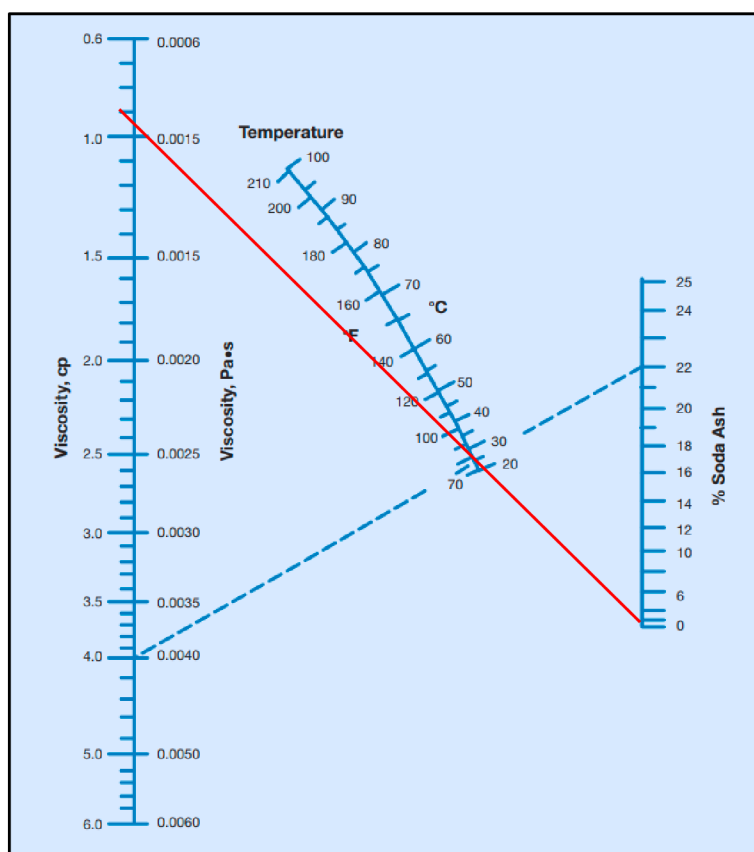
$$25 = -37\,963x^2 + 67\,084x - 32\,078$$

$$x = 1,0059$$

$$\rho_l = 1\,005,9 \text{ kg/m}^3$$

Viskozita

Viskozitu určíme z nomogramu [14]:



Obrázek 9: Nomogram viskozity Na_2CO_3

$$\mu_l = 1,41 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Odhad parametrů plynné směsi:

Hustota

Pro výpočet hustoty plynné směsi platí [20]:

$$\rho_g = \sum \rho_i \cdot y_i \quad (2.12)$$

kde ρ_g je hustota plynné směsi, ρ_i je hustota i -té složky směsi, y_i je molový zlomek i -té složky směsi. Hustota plynné směsi v absorberu:

$$\rho_g = \rho_{H_2S} \cdot y_{H_2S} + \rho_{KP} \cdot y_{KP} + \rho_{KB} \cdot y_{KB} + \rho_{vzduch} \cdot y_{vzduch}$$

$$\rho_g = 1,36 \cdot 9,859 \cdot 10^{-6} + 990 \cdot 3,023 \cdot 10^{-6} + 960 \cdot 2,542 \cdot 10^{-6} + 1,185 \cdot 0,999$$

$$\rho_g = 1,190\ 44\ \text{kg/m}^3$$

Viskozita

Viskozita plynné směsi:

$$\mu_{sm} = \frac{M_{sm}}{\sum(y_i \cdot \frac{M_i}{\mu_i})} \quad (2.13)$$

kde M_i je molární hmotnost i-té složky, μ_i je viskozita i-té složky, M_{sm} je molární hmotnost plynné směsi [20]:

$$M_{sm} = \sum(y_i \cdot M_i) \quad (2.14)$$

$$M_{sm} = 9,859 \cdot 10^{-6} \cdot 34,08 + 3,023 \cdot 10^{-6} \cdot 74,08 + 2,542 \cdot 10^{-6} \cdot 88,11 + 0,999 \cdot 28,97$$

$$M_{sm} = 28,970\ 66\ \text{g/mol}$$

$$\mu_{sm} = 1,837\ 02 \cdot 10^{-5}\ \text{Pa} \cdot \text{s}$$

Vypočet parametrů zařízení

Pro mimovrstvovou rychlost plynu:

$$w_g = \frac{\dot{V}_{gprac}}{\pi \cdot \frac{D^2}{4}} \quad (2.15)$$

kde D je průměr zařízení

$$w_g = \frac{\frac{2\ 728,812}{3\ 600}}{3,14 \cdot \frac{0,8^2}{4}} = \frac{0,758}{3,14 \cdot \frac{0,8^2}{4}} = 1,508\ 7\ \text{m/s}$$

Parametry zvolené náplně:

Tabulka 9: Parametry Pall kroužků [1, 5]

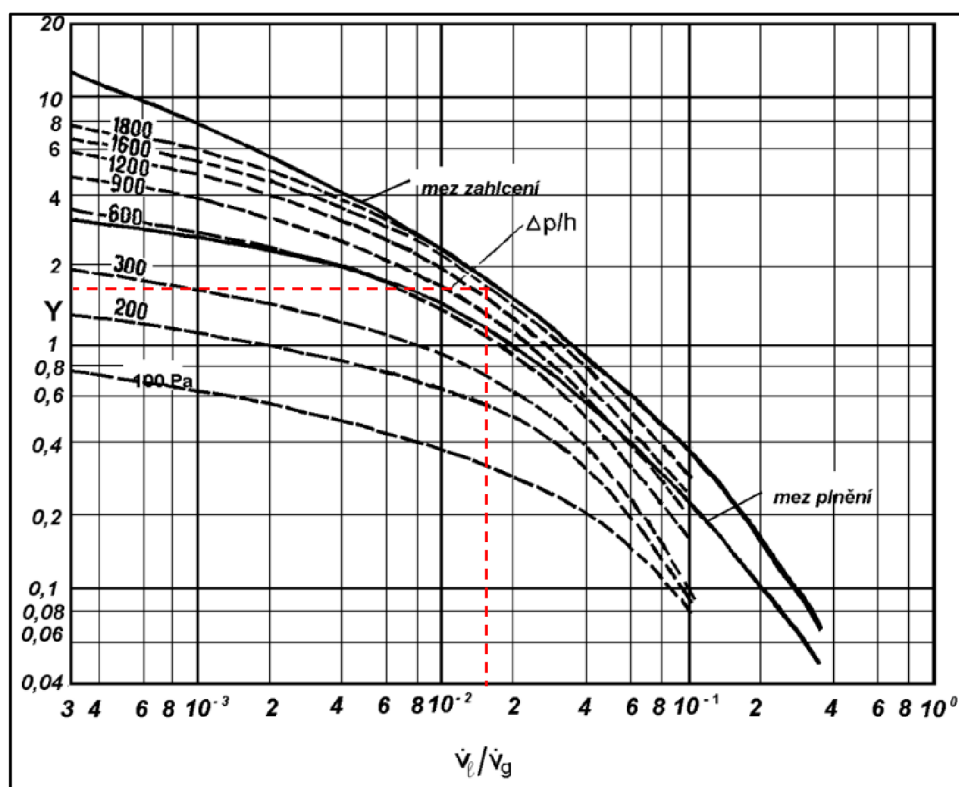
Průměr [mm]	Materiál	C	a_t [m ² /m ³]	ϵ	C_l	C_g
25	Plast	0,261	225	0,887	0,453	0,224

Výpočet parametru Y (viz rovnice 2.11):

$$Y = 0,261 \cdot \frac{1,5087^2}{9,81 \cdot 0,025} \cdot \left(\frac{1,41 \cdot 10^{-3}}{1,5087 \cdot 0,025 \cdot 1,19044} \right)^{0,1} \cdot \left(\frac{997}{1005,9} \right)^2 \cdot \left(\frac{1,19044}{1,185} \right)^{0,85}$$

$$Y = 1,69$$

Objemový průtok kapaliny stanovujeme graficky z Rammova diagramu, přičemž nastavujeme hodnotu tlakových ztrát co nejbližší k mezi zahlcení:



Obrázek 10: Určení poměru průtoků kapalina/plyn [3]

Čemuž odpovídá hodnota $\frac{V_l}{V_g}$ cca 0,01 714, a tlaková ztráta v koloně činí 1 600 Pa na 1 m náplně.

$$\dot{V}_l = 0,01714 \cdot \dot{V}_g = 0,01714 \cdot 2728,812 = 46,77 \text{ m}^3/\text{h} \quad (2.16)$$

Hmotnostní průtok kapaliny:

$$\dot{m}_l = \dot{V}_l \cdot \rho_l = 46,77 \cdot 1\,005,9 = 47\,047,79 \text{ kg/h} \quad (2.17)$$

Odhad difuzivit složek systému

Pro difuzivitu složky A v plynu B:

$$D_{AB} = \frac{3,20 \cdot 10^{-8} T^{1,75}}{p \left(v_A^{\frac{1}{3}} + v_B^{\frac{1}{3}} \right)^2} \cdot \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.18)$$

kde p je pracovní tlak, T je termodynamická teplota, v je molární objem příslušné složky, M je molární hmotnost příslušné složky. Molární hustoty složek se nacházejí v tabulkách nebo mohou být s dostatečnou přesností odhadnuty příspěvkovou metodou podle Le Base [5]:

Tabulka 10: Molární objemy látek v plynné fázi [4]

Prvek nebo sloučenina	$v/10^{-6} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$	Prvek nebo sloučenina	$v/10^{-6} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$
He	2,67	CO	18,0
Ne	5,98	CO ₂	26,9
Ar	16,2	NO ₂	35,9
Kr	24,5	NH ₃	20,7
Xe	32,7	H ₂ O	13,1
H ₂	6,12	SF ₆	71,3
D ₂	6,84	Cl ₂	38,4
N ₂	18,5	Br ₂	69,0
O ₂	16,3	SO ₂	41,8
vzduch	19,7		
C	15,9	Cl	21,0
H	2,31	Br	21,9
O	6,11	I	29,8
N	4,54	S	22,9
F	14,7	cyklus	-18,3

Difuzní koeficient složek ve vzduchu:

$$D_{\text{H}_2\text{S}/\text{vzduch}} = \frac{3,20 \cdot 10^{-8} 298,15^{1,75}}{101\,325 \cdot \left((27,52 \cdot 10^{-6})^{\frac{1}{3}} + (19,7 \cdot 10^{-6})^{\frac{1}{3}} \right)^2} \cdot \left(\frac{1}{0,03\,408} + \frac{1}{0,02\,896} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$D_{\text{H}_2\text{S}/\text{vzduch}} = 1,65 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$D_{\text{KP}/\text{vzduch}} = 9,85 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$D_{KB/vzduch} = 8,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Pro difuzivitu složky A v kapalině B platí:

$$D_{AB} = 5,88 \cdot 10^{-17} \cdot \frac{(q_B \cdot M_B)^{\frac{1}{2}} \cdot T}{v_A^{0,6} \mu_B} \quad (2.19)$$

kde q_B asociační parametr kapaliny. V kapalně fázi molární objemy mají jiné hodnoty:

Tabulka 11: Molární objemy látek v kapalně fázi [5]

Prvek nebo struktura	$v/10^{-6} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$	Prvek nebo struktura	$v/10^{-6} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$
C	14,8	Br	27,0
H	3,7	Cl	24,6
O :		F	8,7
methylestery a étery	9,1	I	37,0
ethylestery a étery	9,9	S	25,6
vyšší estery a étery	11,0	Kruh:	
kyseliny	12,0	trojčlenný	-6,8
vazba na S, P, N	8,3	čtyřčlenný	-8,5
ostatní N	7,4	pětičlenný	-11,5
dvojná vazba	15,6	šestičlenný	-15,0
primární aminy	10,5	naftalenový	-30
sekundární aminy	12,0	antracenový	-47,5
Sloučenina	$v/10^{-6} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$	Sloučenina	$v/10^{-6} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$
H ₂	14,3	N ₂ O	36,4
O ₂	25,6	NH ₃	25,8
N ₂	31,2	H ₂ O	18,9
vzduch	29,9	H ₂ S	32,9
CO	30,7	COS	51,5
CO ₂	34,0	Cl ₂	48,4
SO ₂	44,8	Br ₂	53,2
NO	23,6	I ₂	71,5

$$D_{H_2S/H_2O} = 5,88 \cdot 10^{-17} \cdot \frac{(2,26 \cdot 0,018)^{\frac{1}{2}} \cdot 298,15}{(3,29 \cdot 10^{-5})^{0,6} \cdot 8,9 \cdot 10^{-4}} = 1,95 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$D_{KP/H_2O} = 1,06 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$D_{KB/H_2O} = 9,29 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$$

Při mnohasložkové absorpci je vhodné zvolit klíčovou složku viz kapitola 1.5.4. Pro porovnání blízkosti hodnot Henryho konstant k_H^{cc} k hydraulickému zatížení $\frac{V_l}{V_g} = l$ byl zaveden *absorpční faktor*. Složka s nejnižší hodnotou absorpčního faktoru se volí jako klíčová: [1, 21].

$$A = \frac{l}{k_H^{cc}} \quad (2.20)$$

$$A_{H_2S} = \frac{0,01714}{0,403} = 0,0425$$

$$A_{KP} = \frac{0,01714}{5,76 \cdot 10^{-6}} = 2,97 \cdot 10^3$$

$$A_{KB} = \frac{0,01714}{9,17 \cdot 10^{-6}} = 1,87 \cdot 10^3$$

Sulfan má nejnižší hodnotou absorpčního faktoru, to znamená, že je nejtěžší odstranitelný ze všech složek ve směsi. Další výpočty se budou provádět jenom s jeho parametry ale přítomnost ostatních složek bude zohledněna.

Přepočítání difuzního koeficientu sulfanu v čisté vodě na difuzní koeficient sulfanu v 1% vodním roztoku Na_2CO_3 [4]:

$$D_{H_2S/Na_2CO_3} = D_{H_2S/H_2O} \cdot \frac{(\mu_{H_2O})^{0,85}}{(\mu_{Na_2CO_3})^{0,85}} \quad (2.21)$$

$$D_{H_2S/Na_2CO_3} = 1,95 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{2,553 \cdot 10^{-3}}{3,774 \cdot 10^{-3}} = 1,32 \cdot 10^{-9}$$

Součinitel přestupu hmoty v plynné fázi se určuje pomocí kritériálních rovnic (viz rovnice 1.26 – 1.30):

$$Re_g = \frac{2728,812 \cdot 1,1904}{225 \cdot 0,4456 \cdot 1,83702 \cdot 10^{-5}} = 489,9$$

$$Sc_g = \frac{1,83702 \cdot 10^{-5}}{1,1904 \cdot 1,65 \cdot 10^{-5}} = 0,935$$

$$z_l = \left(12 \frac{47047,79166}{3600} \cdot 225^2 \cdot 1,41 \cdot 10^{-3} \right)^{1/3} = 0,14$$

$$Sh_g = 0,224 \cdot 489,9^{3/4} \cdot 0,935^{1/3} \cdot [0,887 \cdot (0,935 - 0,14)]^{-1/2} = 27,95$$

$$\frac{k_{cg}}{225 \cdot 1,65 \cdot 10^{-5}} = 27,95$$

$$k_{cg} = 225 \cdot 1,65 \cdot 10^{-5} \cdot 27,95 = 0,103\ 79\ \text{m/s}$$

$$k_y = 0,10\ 379 \cdot \frac{101\ 325}{8,314 \cdot 298,15} = 4,242\ \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

Pro součinitel přestupu hmoty v kapalně fázi (viz rovnice 1.31-1.33):

$$Re_l = \frac{13,068\ 8}{225 \cdot 0,445\ 6 \cdot 1,41 \cdot 10^{-3}} = 92,44$$

$$Sc_l = \frac{1,41 \cdot 10^{-3}}{1\ 005,9 \cdot 1,32 \cdot 10^{-9}} = 1,07 \cdot 10^3$$

$$k_{cl} \left(\frac{\rho_l}{\mu_l g} \right)^{1/3} = 0,453 \cdot 92,44^{1/3} \cdot (1,07 \cdot 10^3)^{-1/2} \cdot \left(\frac{225}{0,887} \right)^{1/2} \left(\frac{(1,41 \cdot 10^3)^2}{9,81 \cdot 1\ 005,9^2} \right)^{1/6}$$

$$k_{cl} \left(\frac{\rho_l}{\mu_l g} \right)^{1/3} = 7,64 \cdot 10^{-3}$$

$$k_{cl} = \frac{7,64 \cdot 10^{-3}}{\left(\frac{1\ 005,9}{1,41 \cdot 10^3 \cdot 9,81} \right)^{1/3}} = 1,83 \cdot 10^{-4}\ \text{m/s}$$

Molární hustota kapalně fáze:

$$c_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = \frac{9,97}{105,988\ 8} = 94,066\ 54\ \text{mol/m}^3$$

$$c_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{997 \cdot 10^3}{18,015\ 28} = 55\ 341,909\ 76\ \text{mol/m}^3$$

$$c_A = \frac{x_{2A} \cdot \dot{V}_{M_{\text{celk}}}}{\dot{V}_L} \quad (2.22)$$

$$c_{\text{H}_2\text{S}} = \frac{1,8 \cdot 10^{-8} \cdot 2\ 611\ 549}{46,772} = 1 \cdot 10^{-3}\ \text{mol/m}^3$$

$$c_{\text{KP}} = 1,24 \cdot 10^{-4}\ \text{mol/m}^3$$

$$c_{\text{KB}} = 1,04 \cdot 10^{-4}\ \text{mol/m}^3$$

$$c_l = \sum c_i \quad (2.23)$$

$$c_l = 94,066\ 54 + 55\ 341,909\ 76 + 1 \cdot 10^{-3} + 1,24 \cdot 10^{-4} + 1,04 \cdot 10^{-4}$$

$$c_l = 55\ 436\ \text{mol/m}^3$$

$$k_x = 1,83 \cdot 10^{-4} \cdot 55\ 436 = 10,2 \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

Pro součinitel prostupu hmoty (viz rovnice 1.14):

$$K_y = \frac{1}{\frac{1}{4,242} \cdot \frac{0,403}{10,2}} = 3,63 \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

Odpor v plynné fázi:

$$\Omega_y = \frac{K_y}{k_y} \quad (2.24)$$

$$\Omega_y = \frac{3,63}{4,242} = 0,856$$

Výpočet výšky náplně

V případě, když rozpouštědlo obsahuje aktivní složku, která chemicky reaguje s plynným polutantem, jeho parciální tlak nad roztokem se neustále snižuje. Proto pro číslo převodových jednotek platí [1, 12]:

$$N_y = -\ln \cdot (1 - \varphi) \quad (2.25)$$

kde N_y je číslo převodových jednotek, φ je účinnost odstranění.

$$N_y = -\ln \cdot (1 - 0,999\ 9) = 9,885$$

Výška převodové jednotky [5]:

$$H_y = \frac{\dot{n}}{K_y \cdot a_s \cdot S} \quad (2.26)$$

kde H_y je výška jedné převodové jednotky, \dot{n} molový průtok kapalně fáze, a_s měrný objem smáčeného povrchu náplně, S je plocha průřezu zařízení s vrstvou.

Pro a_s :

$$a_s/a_t = 3 \cdot \varepsilon^{1/2} \cdot Re_l^{-0,2} Fr_l^{-0,45} We_l^{0,75} \quad (2.27)$$

$$Fr_l = \frac{\dot{m}_l^2 \cdot a_t}{S^2 \cdot \rho_l^2 \cdot g} \quad (2.28)$$

$$Fr_l = \frac{13,068\ 8^2 \cdot 225}{0,445\ 6^2 \cdot 1\ 005,9^2 \cdot 9,81} = 0,019$$

$$We_l = \frac{\dot{m}_l^2}{a_t \cdot S^2 \cdot p_l \cdot \sigma} \quad (2.29)$$

kde σ je povrchové napětí roztoku. Jelikož se hodnota povrchového napětí značně neliší v tak malých koncentracích roztoků, a příslušná přesná hodnota daného roztoku nebyla nalezena, byla použita hodnota povrchového napětí vody.

$$We_l = \frac{13,0\ 688^2}{225 \cdot 0,445\ 6^2 \cdot 1\ 005,9 \cdot 0,071\ 99} = 0,0\ 528$$

$$a_s/a_t = 3 \cdot 0,887^{1/2} \cdot 92,44^{-0,2} \cdot 0,019^{-0,45} \cdot 0,052\ 8^{0,75} = 0,74$$

$$a_s = 0,74 \cdot 225 = 166,5\ \text{m}^{-1}$$

$$H_y = \frac{31}{3,63 \cdot 0,445\ 6 \cdot 166,5} = 0,115\ \text{m}$$

Výška náplně činí:

$$H = H_y \cdot N_y = 0,115 \cdot 9,885 = 1,14\ \text{m} \quad (2.30)$$

Mechanický výpočet

Hlavní požadavek pro materiál trupu pláště absorberu je jeho odolnost vůči korozi a opotřebení, dobrá svařitelnost. Těmto požadavkům odpovídá nerezová ocel AISI 304, která se běžně používá v nízkoteplotních chemických procesech [22, 23].

Tabulka 12: Vstupní údaje

Pracovní tlak	101 325 [Pa]
Vnitřní průměr kolony	800 [mm]
Výška vrstvy náplně	1 140 [mm]

Pokračování tabulky 12

Maximální přípustný tlak materiálu	215 [MPa]
Hustota náplně	85 [kg/m ³]
Koeficient pevnosti svaru	1 [-]
Výška vypouklé části dna	200 [mm]
Korozní rezerva	1,6 [mm]

Pro výpočet minimální tloušťky stěny trupu absorbéru se používá rovnice [24]:

$$S = \frac{p_{\text{výp}} \cdot d}{2 \cdot 0,9 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - p_{\text{výp}}} \quad (2.31)$$

kde $p_{\text{výp}}$ je vypočtený tlak v koloně, d je vnitřní průměr zařízení, $[\sigma]$ je maximální přípustný tlak materiálu, φ je koeficient pevnosti svařovacích švů. Pro $p_{\text{výp}}$ platí:

$$p_{\text{výp}} = p_{\text{prac}} + p_{\text{hydr}} \quad (2.32)$$

kde p_{hydr} je hydrostatický tlak:

$$p_{\text{hydr}} = \rho \cdot g \cdot h = 85 \cdot 9,81 \cdot 1,14 = 950,589 \text{ Pa} \quad (2.33)$$

kde ρ je hustota náplně, g je gravitační zrychlení, h je výška vrstvy náplně.

$$p_{\text{výp}} = 101\,325 + 950,589 = 102\,275,589 \text{ Pa}$$

$$S = \frac{102\,275,589 \cdot 800}{2 \cdot 0,9 \cdot 215 \cdot 10^6 \cdot 1 - 102\,275,589} = 0,22 \text{ mm}$$

Tak malá hodnota tloušťky stěny znamená, že pracovní podmínky nejsou zatěžující pro zvolený typ materiálu a minimální tloušťka musí vycházet z konstrukční pevnosti. V tomto případě lze použít tabulku [22, 24]:

Tabulka 13: Závislost minimální tloušťky na průměru kolony [24]

d [mm]	S [mm]
--------	--------

Pokračování tabulky 13

150-400	2
400-1 000	3
1 000-2 000	4

Jelikož průměr kolony je 800 mm, volíme tloušťku 3 mm. Přípustný přebytečný tlak při hydraulické zkoušce stěny trupu kolony:

$$[p] = \frac{2 \cdot 0,9 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot (S - C)}{d + \varphi \cdot (S - C)} \quad (2.34)$$

kde C je korozní rezerva.

$$[p] = \frac{2 \cdot 0,9 \cdot 215 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot (3 - 1,6)}{800 + 1 \cdot (3 - 1,6)} = 676\,067 \text{ Pa}$$

$[676\,067] > 102\,275,589$, podmínka je splněná, tedy tloušťka je navržena správně. Pro tloušťku stěn víček platí:

$$S = \frac{p_{\text{výp}} \cdot r}{2 \cdot 0,9 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - 0,5 \cdot p_{\text{výp}}} \quad (2.35)$$

kde r je maximální poloměr zakřivení víčka, pro jeho výpočet:

$$r = \frac{d^2}{4 \cdot H} \quad (2.36)$$

kde H je výška víka:

$$H = d \cdot 0,25 = 800 \cdot 0,25 = 200 \text{ mm} \quad (2.37)$$

$$r = \frac{800^2}{4 \cdot 200} = 800$$

$$S = \frac{102\,275,589 \cdot 800}{2 \cdot 0,9 \cdot 215 \cdot 10^6 \cdot 1 - 0,5 \times 102\,275,589} = 0,22 \text{ mm}$$

Analogicky volíme tloušťku stěny víka 3 mm.

Výpočet spojení vstupu a výstupu plynné fáze

V nízkotlakových technologických zařízeních se nedoporučuje rychlost plynu v potrubí větší než 7 m/s. Pro nutný průměr nátrubků:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot w}} \quad (2.38)$$

kde \dot{V} je objemový průtok, w je rychlost toku potrubím.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,76}{3,14 \cdot 7}} = 0,372 \text{ m}$$

Volíme odpovídající standardní průměr 400 mm a příslušný průměr příruby 540 mm.

Kapalná fáze má mnohem menší objemové průtoky, proto můžeme zvolit průměr nátrubku 150 mm a příslušný průměr příruby 265 mm [18]. Rychlost kapaliny v potrubí:

$$w = \frac{4 \cdot \dot{V}}{d^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 0,01299}{0,15^2 \cdot 3,14} = 0,74 \text{ m/s} \quad (2.39)$$

Mimovrstvová výška kolony (nad a pod náplní):

$$H_m = 1 \cdot d = 1 \cdot 800 = 800 \text{ mm} \quad (2.40)$$

Konečné parametry kolony:

Tabulka 14: Konečné parametry kolony:

			H ₂ S	KP	KB
Vstup	Plyn	2 728,82 m ³ /h	1,138 · 10 ⁻² g/m ³	9,2 · 10 ⁻³ g/m ³	9,2 · 10 ⁻³ g/m ³
	Kapalina	46,8 m ³ /h			

Pokračování tabulky 14

Výstup	Plyn	2 728,82 m ³ /h	H ₂ S 7·10 ⁻⁷ g/m ³	KP 4,7·10 ⁻⁷ g/m ³	KB 4,7·10 ⁻⁷ g/m ³
	Kapalina	46,8 m ³ /h			
Náplň	Pall kroužky	Plast	25 mm		
Průměr	800 mm				
Výška	3 340 mm				

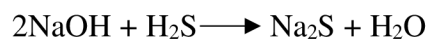
Přepočítání kolony na absorpční roztok NaOH

Bohužel v odborné literatuře nebyly nalezeny hodnoty reakčních konstant pro složky použité v daném systému, vzhledem k tomu tento návrh nezohledňuje vliv rychlosti chemické reakce. Proto pro studium chemických reakcí v procesu absorpce byl zvolen roztok hydroxidu sodného se známými hodnotami reakčních konstant. Celý proces byl přepočítán za stejných podmínek, jediný rozdíl je aplikovaná náplň. Plast není smáčivý roztokem hydroxidu sodného, proto byly použity kovové Pall kroužky a stejným postupem bylo dosaženo následných hodnot součinitelů přestupu hmoty:

$$k_x = 14,896 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$k_y = 2,313 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

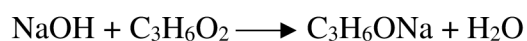
Rychlostní konstanty reakcí [15]:



$$k = 4,7 \cdot 10^{-12} \text{ cm} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \text{ 2. řad}$$

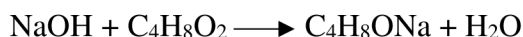
rychlost reakce r je:

$$r = 4,7 \cdot 10^{-18} \cdot 249,3^2 = 2,92 \cdot 10^{-13} \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$$



$$k = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ cm} / \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \text{ 2. řad}$$

$$r = 1,6 \cdot 10^{-18} \cdot 249,3 \cdot 1,24 \cdot 10^{-4} = 4,93 \cdot 10^{-20} \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$$



$$k = 1,79 \cdot 10^{-12} \text{ cm/mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \text{ 2. řad}$$

$$r = 1,6 \cdot 10^{-18} \cdot 249,3 \cdot 1,04 \cdot 10^{-4} = 4,64 \cdot 10^{-20} \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$$

Odhad difuzního koeficientu H_2S v roztoku NaOH

$$D_{\text{H}_2\text{S}/\text{NaOH}} = 1,95 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{2,553 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-3}} = 1,65 \cdot 10^{-9}$$

Výpočet Hattova čísla pro klíčovou složku (H_2S)

$$Ha = \sqrt{\frac{2,92 \cdot 10^{-13} \cdot 1,65 \cdot 10^{-9}}{4,06 \cdot 10^{-4} \cdot (3,11 \cdot 10^{-4})^2}} = 3,52 \cdot 10^{-6}$$

Korekce Henryho konstanty na iontovou sílu roztoku

$$H_{\text{H}_2\text{S}}^* = H_{\text{H}_2\text{S}}^{cp} \cdot e^{(I \cdot h_{iont})} \quad (2.41)$$

kde $H_{\text{H}_2\text{S}}^*$ je korigovaná Henryho konstanta, I je iontová síla roztoku, h_{iont} je příspěvek iontů v absorpčním roztoku [4]

$$H_{\text{H}_2\text{S}}^k = 1 \cdot 10^{-3} \cdot e^{(2,531 \cdot 10^{-4} \cdot 3,24 \cdot 10^{-6})} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1}$$

Odhad koncentrace H_2S na mezifázovém rozhraní

$$c_{\text{H}_2\text{S},f} = y_{\text{H}_2\text{S}} \cdot p_{\text{prac}} \cdot H_{\text{H}_2\text{S}}^k = 9,86 \cdot 10^{-6} \cdot 101\,325 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3} \quad (2.42)$$

kde $y_{\text{H}_2\text{S}}$ je molový zlomek H_2S na vstupu.

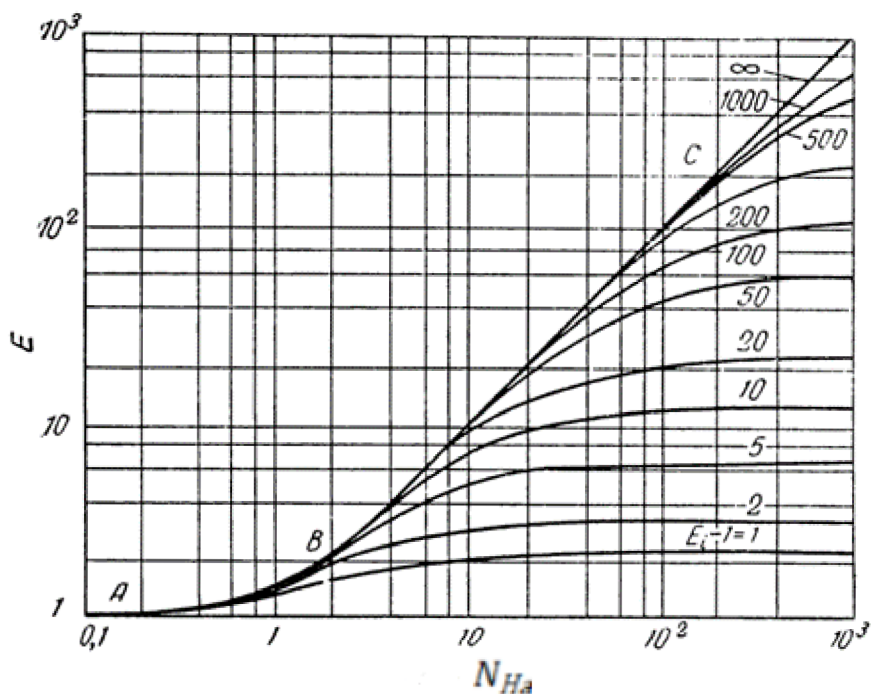
Odhad difuzivity hydroxidových iontů v roztoku

Difuzivita hydroxidových iontů ve vodě je $5,30 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ při $25 \text{ }^\circ\text{C}$ [4]

$$D_{\text{OH}^-/\text{H}_2\text{O}} = D_{\text{OH}^-/\text{H}_2\text{O}} \cdot \frac{\mu_{\text{H}_2\text{O}}}{\mu_{\text{NaOH}}} = 5,30 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{8,9 \cdot 10^{-4}}{1,08 \cdot 10^{-3}} = 4,37 \cdot 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad (2.43)$$

Výpočet reakčního faktoru okamžité reakce

$$E_i = 1 + \frac{4,37 \cdot 10^{-9} \cdot 249,3}{2 \cdot 1,65 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 3,3 \cdot 10^5$$



Obrázek 11: Závislost reakčního faktoru na reakčním faktoru okamžité reakce a Hattově čísle [2]

Stejným postupem jako v případě uhličitanu sodného byl proveden technologický a mechanický výpočet absorpčního zařízení.

Tabulka 15: Konečné parametry kolony s využitím hydroxidu sodného:

Vstup	Plyn	2 728,82 m ³ /h	H ₂ S 1,138 · 10 ⁻² g/m ³	KP 9,2 · 10 ⁻³ g/m ³	KB 9,2 · 10 ⁻³ g/m ³
	Kapalina	46,8 m ³ /h			
Výstup	Plyn	2 728,82 m ³ /h	H ₂ S 7 · 10 ⁻⁷ g/m ³	KP 4,7 · 10 ⁻⁷ g/m ³	KB 4,7 · 10 ⁻⁷ g/m ³
	Kapalina	48,73 m ³ /h			
Náplň	Pall kroužky	Ocel	25 mm		
Průměr	800 mm				

Výška 3 990 mm

2.1. Diskuze výsledků

Z výpočtů je patrné, že v případě použití NaOH jako aktivní složky rozpouštědla proces spadá do případu kinetického režimu C - reakce s přebytkem koncentrace aktivní složky rozpouštědla ($Ha < E_i$) a reakce má pseudoprvní řád. To znamená, že absorbovaná složka reaguje s rozpouštědlem tak pomalu (nebo její koncentrace je tak malá, že pravděpodobnost kolize molekul je velmi nízká), že nedochází ke změně koncentrace aktivní složky rozpouštědla. Hodnoty Ha a E_i nám také naznačují, že reakční faktor se rovná jedné (viz obrázek 11) a chemická reakce neovlivňuje průběh pochodu, tedy technologický výpočet musí vycházet z fyzikálních vlastností absorbéru.

Při návrhu bylo zjištěno, že pro dosažení koncentrací polutantů pod pachovým prahem je zapotřebí výška náplně 1,79 m (NaOH) a 1,14 m (Na_2CO_3) při navrženém průměru absorpčního zařízení 0,8 m. Takový rozdíl mezi výškami náplně v kolonách se vysvětluje různými charakteristikami použitých náplní a fyzikálními vlastnostmi roztoků.

Průměr kolony se navrhoval na základě optimálních poměrů průtoků plynné a kapalné fáze. V souvislosti s daným průměrem byly spočítány optimální hodnoty mezivrstevových prostorů kolony (nad a pod vrstvou výplně).

Dalším důležitým krokem byla volba správného průměru nátrubků a příslušných přírub. Volba průměru nátrubků pro plynnou fázi vycházela z pravidla, že v nízkotlakových systémech rychlost plynu nesmí přesahovat 7 m/s, čemuž v tomto případě odpovídá minimální standardní průměr nátrubku 400 mm. Na základě technických údajů příslušný průměr příruby činí 540 mm. Za daného hydraulického režimu průtok kapalné fáze je mnohem menší, proto je průměr nátrubků 150 mm s příslušným průměrem příruby 265 mm postačující.

Jako další vedlejší součásti vnitřní konstrukce kolony jsou zapotřebí nosný rošt náplně a distributory plynné a kapalné fází. Byly navrženy konstrukčně nejjednodušší a nejlevnější varianty těchto zařízení z důvodu poměrně mírných provozních podmínek.

Za materiál pláště absorbéru byla zvolena nerezová ocel AISI 304 běžně používaná v chemicko-technologických procesech z důvodu vysoké odolnosti proti korozi, pevnosti, dobré svařitelnosti a možnosti provozu v kyselém prostředí. Z výpočtu plyne, že provozní podmínky nejsou zatěžujícím faktorem pro zvolený materiál, proto návrh vycházel z konstrukční pevnosti materiálu a geometrie zařízení. S ohledem na korozní rezervu 1,6 mm, potřebná tloušťka pláště činí 3 mm, což navíc zajistí bezpečný provoz až do 670 kPa.

Pro možnost výměny náplně je kolona vybavená dvěma technologickými otvory nahoře a vespod vrstvy náplně. Podle technické literatury se kolony o průměru 800-1000 mm vybavují otvory s průměrem 250 mm.

Dále je popsán postup ověření funkčnosti kolony před uvedením do plného provozu:

Návrh postupu pro experimentální ověření navrženého zařízení před uvedením do plného provozu:

1. Ověření mezních provozních hydraulických režimů.
2. Stanovení tlakových ztrát v závislosti na hydraulickém zatížení kolony.
3. Prověření a případná korekce ergonomie procesu.
4. Zkušební poloprovoz
5. Vyzkoušení maximální absorpční kapacity (z pohledu maximální koncentrace absorbovaných složek).
6. Vyzkoušení správné funkce bezpečnostních prvků a havarijních systémů.

3. ZÁVĚR

Diplomová práce obsahuje kompletní návrh dvou variant absorpčního zařízení. Při návrhovém výpočtu bylo zjištěno, že roztok hydroxidu sodného chemicky neovlivňuje rychlost absorpce, jelikož vstupní koncentrace separovaných složek je nízká. Pro posouzení vlivu roztoku uhličitanu sodného nebyly nalezeny nezbytné informace o rychlostních konstantách příslušných reakcí, a tudíž parametry tohoto absorbéru jsou předimenzovány, ale zařízení splňuje zadané požadavky. I přesto, že vliv chemické reakce na absorpci je minimální, přidání aktivní složky do absorpčního roztoku je vhodné z důvodu vázání polutantů do stabilní formy rozpustných solí. Vznikající sulfid sodný je rozpustný ve vodě a může být separován krystalizací. Soli propionátu a butyrátu sodného jsou rozpustné ve vodě a biologicky dobře odbouratelné (používají se jako aditiva v potravinářství).

Pro ekonomicky výhodnější návrh absorbéru musí být provedeny laboratorní měření na příslušném experimentálním zařízení odpovídající parametrům navrženého zařízení s upřesněním hodnot konstant rychlosti reakce.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. RAMM, V.M. *Absorbceja gazov*. 2. vydání. Moskva: nakladatelství „Chemie“, 1976.
2. DANCKWERTS, P.V. *Gazo-židkostnyje reakcii*. Moskva: nakladatelství „Chemie“, 1973.
3. SVĚŘÁK, T. *Studijní materiály k chemickému inženýrství*. Brno. Vysoké učení technické v Brně.
4. KALIVODA, J. *Odstraňování plymných polutantů ze vzdušín na poloprovodní pračce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2017. Dizertační práce. VUT v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie materiálů.
5. ŠNITA, D. *Příklady a úlohy z chemického inženýrství II*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2002.
6. KUDRNA, V., MÍKA, V. *Příklady a úlohy z chemického inženýrství I*. Vysoká škola chemicko-technologická, 2002.
7. DOJČANSKÝ, J., LONGAUER, J. *Chemické inžinierstvo II*. 1. vydání. Bratislava: Malé Centrum, 2000. 392 s. ISBN 80-967064-8-9.
8. HARVEY, A., SMITH, F. *Avoid Common Pitfalls when using Henry's Law* [online]. Chemical Engineering Progress, 2007.
Dostupné z:
https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=50449
9. SANDER, R. *Compilation of Henry's law constants*. Germany: Air Chemistry Department, Max-Planck Institute of Chemistry, 2014. ACPD 14, 29615-30521.
10. PETROCSC, PETRODMO, PETROGROUPCO. *The caustic soda solution handbook* [online], 2004.
Dostupné z:
<https://www.petrodm.com/wp-content/uploads/2021/04/Caustic-soda-solution-handbook.pdf>
11. SÁNCHEZ, A.P., SÁNCHEZ, E.J., SILVA, R. *Design of a packed-bed absorption column considering four packing types and applying Matlab* [online]. Cuba: Universidad Nacional de Ingeniería, 2016. ISSN-E 1995-9516.
Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/320178770_Design_of_a_Packed-Bed_Absorption_Column_Considering_Four_Packing_Types_and_Applying_Matlab
12. LEVENSPIEL, O. *Chemical reaction engineering*. 3. vydání. Oregon State University, Department of Chemical Engineering, 1991. ISBN 0-471-25424-X.

13. PERRY, R. H., GREEN, D. W. *Perry's chemical engineers' handbook*. 7. vydání. New York: McGraw-Hill, 1999. 2400 s. ISBN 0-07-049841-5.
14. GENERAL CHEMICAL INDUSTRIAL PRODUCTS, *Soda ash, technical & handling guide* [online].
Dostupné z:
<https://files.engineering.com/download.aspx?folder=255aa3ad-f047-41a3-94f4-b20fccb2320c&file=sodaashtech-130416232158-phpapp02.pdf>
15. NIST chemical kinetics database [online].
16. ZARZYCKI, R., CHAUK, A. *Absorption. Fundamentals & Applications*. Faculty of Process & Environmental Engineering, Technical University of Lodz, 1993. ISBN 0 08 040263 1
17. WYSOCKA, I., GEBICKY, J., NAMIESNIK, J. *Technologies for deodorization of malodorous gases* [online].
Dostupné z:
<https://doi.org/10.1007/s11356-019-04195-1>
18. MACROFLEX s.r.o., *Rozměry přírub podle ČSN 13 1060, DIN 2501* [online].
Dostupné z:
www.macroflex.cz/static/katalog/gumove/files/4_Flanges.pdf
19. KENNETH, A. *Chemical kinetics. The study of reaction rates in solution*. USA: University of Wisconsin, 1932. ISBN 1-56081-006-8.
20. REID, R. C., PRAUSNITZ, J.M., POLING, B.E. *The properties of gases and liquids*. New York: McGraw-Hill, 1987. ISBN 0-07-051799-1.
21. BALYBERDINA, I.T. *Fizičeskije metody pererabotki i ispol'zovanija gaza*. Moskva: nakladatelství „Nedra“, 1988. ISBN 5-247-00171-0
22. NOSOV, G.A. ZAHAROV, M.K. *Učebnyje materialy: Konstrukcionnoje oformlenije promyšlennych kolon* [online], Moskva: Moskevská státní akademie chemické technologie, 2009.
Dostupné z:
<https://studfile.net/preview/6393134/page:4/>
23. ALPERT, T.Z. *Osnovy projektirovanija chimičeskogo oborudovanija*, Moskva: Vysoká škola chemicko-technologická, 1971. ISBN 5-06-000508-9
24. MENSHIKH, M.S. *Razrabotka technologičeskoj shemy sovremennogo neftepererabatyvajušego zavoda dlja pererabotki Ust'-balykskoj B₁nefti. Projektirovanije*

ustanovki gidroočistky dizeľnych frakcij. Samara: Samarská statní technická univerzita, 2020. Bakalářská práce. SSTU, Fakulta chemická technologická, Ústav chemická technologie energetických zdrojů a uhlíkových materiálů.

25. MICHIGAN ENGINEERING, *Visual encyclopedia of chemical engineering equipment* [online].

Dostupné z:

<https://encyclopedia.che.engin.umich.edu/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	absorpční faktor	-
a_t	měrná hustota povrchu	m^{-1}
a_s	měrný objem smáčeného povrchu náplně	m^{-1}
C	tabelovaná konstanta pro použitou náplň	-
C_A	molární koncentrace složky A v kapalně fázi	mol/m^3
C_g	konstanta pro náplň	-
C_l	konstanta pro náplň	-
c_{Af}	koncentrace absorbované složky A na mezifázovém rozhraní	$mol \cdot m^{-3}$
c_{Cl}	koncentrace aktivní složky rozpouštědla	$mol \cdot m^{-3}$
c_N	koncentrace polutantu ve vzdušnině za normovaných podmínek	$mol \cdot m^{-3}$
c_{prac}	koncentrace polutantu ve vzdušnině za pracovních podmínek	$mol \cdot m^{-3}$
c_{prah}	koncentrace pachového prahu složky	$mol \cdot m^{-3}$
D_A	difuzní koeficient složky A	$m^2 \cdot s^{-1}$
D_{AB}	difuzivita složky A v složce B	$m^2 \cdot s^{-1}$
D_{Al}	difuzní koeficient absorbované složky A v roztoku	$m^2 \cdot s^{-1}$
D_{Cl}	difuzní koeficient aktivní složky roztoku v kapalně fázi	$m^2 \cdot s^{-1}$
d	vnitřní průměr zařízení	m
d_p	charakteristický průměr náplně	m
E	reakční faktor	-
E_i	limitní hodnota reakčního faktoru v případě okamžité reakce	-
F	plocha povrchu mezifázového rozhraní	m^2
f	počet fází v systému	-
\dot{G}_M	molový průtok	$mol \cdot s^{-1}$
$\dot{G}_{M_{celk}}$	celkový molový průtok plynné fáze	$mol \cdot s^{-1}$
g	gravitační zrychlení	$m \cdot s^{-2}$
H	výška víčka	m
H_y	výška jedné převodové jednotky	m
H_A^T	Henryho konstanta pro požadovanou teplotu	$mol \cdot m^{-3} \cdot Pa^{-1}$
H_A^*	tabelovaná Henryho konstanta	$mol \cdot m^{-3} \cdot Pa^{-1}$
H_A^{cp}	Henryho konstanta složky A	$mol \cdot m^{-3} \cdot Pa^{-1}$
H_A^k	korigovaná Henryho konstanta složky A	$mol \cdot m^{-3} \cdot Pa^{-1}$
K_y	součinitel prostupu hmoty	$mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
k	součinitel přestupu hmoty	$mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
k_x	součinitel přestupu hmoty v kapalně fázi	$mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
k_y	součinitel přestupu hmoty v plynně fázi	$mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
k_{gc}	parciální součinitel přestupu hmoty látky v plynně fázi	$m \cdot s^{-1}$
k_H^{cc}	bezrozměrová Henryho konstanta těkavosti	-
k_H^{px}	Henryho konstanta těkavosti	atm

k_{LC}	parciální součinitel přestupu hmoty látky v plynné fázi	$m \cdot s^{-1}$
k_1	rychlostní konstanta reakce prvního řádu	$cm^3 \cdot mol^{-1} \cdot s^{-1}$
k_2	rychlostní konstanta reakce druhého řádu	$cm^3 \cdot mol^{-1} \cdot s^{-1}$
k_3	rychlostní konstanta reakce třetího řádu	$cm^3 \cdot mol^{-1} \cdot s^{-1}$
\dot{M}	molární koncentrace	$mol \cdot m^{-3}$
M_i	molární hmotnost i-té složky	$g \cdot mol^{-1}$
M_{sm}	molární hmotnost plynné směsi	$g \cdot mol^{-1}$
\dot{m}_l	hmotnostní průtok kapaliny	$kg \cdot s^{-1}$
\dot{m}_g	hmotnostní průtok plynu	$kg \cdot s^{-1}$
N_y	číslo převodových jednotek	-
\dot{n}	molový průtok kapalné fáze	$mol \cdot s^{-1}$
P_A	parciální tlak absorbované složky A v plynné fázi	Pa
ρ	hustota náplně	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_g	hustota plynné směsi	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_i	hustota i-té složky směsi	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_l	hustota kapaliny	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_{H_2O}	hustota vody	$kg \cdot m^{-3}$
$p_{výp}$	vypočtený tlak v koloně	Pa
p_{hydr}	hydrostatický tlak	Pa
p_{prac}	pracovní tlak	Pa
ρ_{vzduch}	hustota vzduchu	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_l	hustota roztoku	$kg \cdot m^{-3}$
q_B	asociační parametr kapaliny	-
R	univerzální plynová konstanta	$m^3 \cdot Pa \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
r	maximální poloměr zakřivení víčka	m
S	vrstevná plocha průřezu	m^2
s	počet složek systému	-
T	termodynamická teplota	K
T_{prac}	pracovní termodynamická teplota	K
\dot{V}_l	objemový průtok kapaliny	$m^3 \cdot h^{-1}$
\dot{V}_{gN}	průtok plynné fáze za normovaných podmínek	$m^3 \cdot h^{-1}$
\dot{V}_{gprac}	pracovní průtok plynu	$m^3 \cdot h^{-1}$
v	molární objem příslušné složky	$m^3 \cdot mol^{-1}$
v_s	počet stupňů volnosti	-
W_A	množství absorbované složky A za jednotku času	$mol \cdot h^{-1}$
w_g^2	mimovrstvová rychlost plynu	$m \cdot s^{-1}$
X_A	relativní molový zlomek složky A v kapalné fázi	-
x_A	molový zlomek složky A v kapalné fázi	-
x_A^*	koncentrace složky A na pracovní přímce	-
x_2^*	molový zlomek složky v kapalné fázi v rovnovážném stavu	-
x_{Aw}	koncentrace složky A na fázovém rozhraní v kapalné fázi	-
Y_A	molový zlomek složky A v plynné fázi	-
y_A	molový zlomek složky A v plynné fázi	-
y_i	molový zlomek i-té složky směsi	-

y_{Aw}	koncentrace složky A na fázovém rozhraní v plynné fázi	-
z	směr přestupu hmoty	-
z_l	zádrž kapaliny na náplni	-
Ha	Hattovo číslo	-
Re	Reynoldsovo číslo	-
Sc	Schmidtovo číslo	-
Sh	Sherwoodovo	-
Δ	hybná síla	-
$\Delta H_A^{\text{ent}} \text{ rozp}$	změna rozpouštěcí entalpie složky A v nekonečně zředěném roztoku	-
Ω	odpor fáze	-
γ_A	koeficient aktivity složky A	-
ε	mezerovitost náplně	-
θ_l	molární hustota kapalné fáze	$\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$
θ_g	molární hustota plynné fáze	$\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$
μ_A	chemický potenciál složky A	-
μ_g	dynamická viskozita plynu	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
μ_i	viskozita i-té složky	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
μ_l	dynamická viskozita roztoku	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
σ	povrchové napětí vody	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$
$[\sigma]$	maximální přípustný tlak materiálu	Pa
φ	procentní účinnost odstranění složky	%
φ	koeficient pevnosti svařovacích švů	-
ψ	směrnice úsečky	-
ϑ_A	rychlost chemické reakce druhého řádu difundující složky A	$\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Schéma náplňové kolony [25]

Obrázek 2: Příklady typů náplně [upraveno ze zdroje 25]

Obrázek 3: Schéma probublávacího absorbérů [upraveno ze zdroje 25]

Obrázek 4: Schéma kolony se smáčenou stěnou [upraveno ze zdroje 25]

Obrázek 5: Schéma sprchové kolony [25]

Obrázek 6: Schéma patrové kolony [upraveno ze zdroje 25]

Obrázek 7: Směrnice úsečky ψ

Obrázek 8: Rammův diagram [3]

Obrázek 9: Nomogram viskozity Na_2CO_3 [14]

Obrázek 10: Určení poměru průtoků kapalina/plyn [3]

Obrázek 11: Závislost reakčního faktoru na reakčním faktoru okamžité reakce a Hattově číslu [2]

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Některé pachové složky vyskytující se v prostředí [17]

Tabulka 2: Převládající pachové složky v procesu sušení kalů odpadních vod

Tabulka 3: Vstupní parametry plynu

Tabulka 4: Pachové limity polutantů

Tabulka 5: Hodnoty H^{CP} polutantů [9]

Tabulka 6: Vztahy pro přepočet Henryho konstant [9]

Tabulka 7: Základní zvolené parametry kolony

Tabulka 8: Závislost hustoty 1% vodního roztoku Na_2CO_3 na teplotě [13]

Tabulka 9: Parametry Pall kroužků [1, 5]

Tabulka 10: Molární objemy látek v plynné fázi [5]

Tabulka 11: Molární objemy látek v kapalně fázi [5]

Tabulka 12: Vtipní údaje kolony

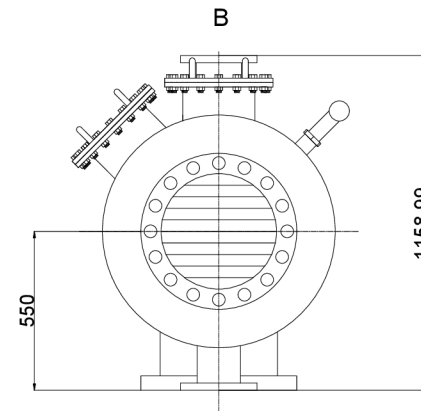
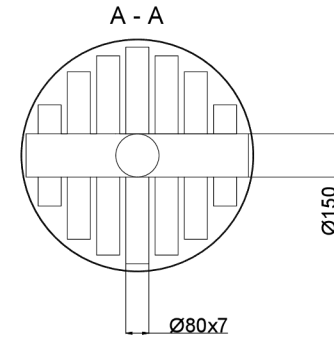
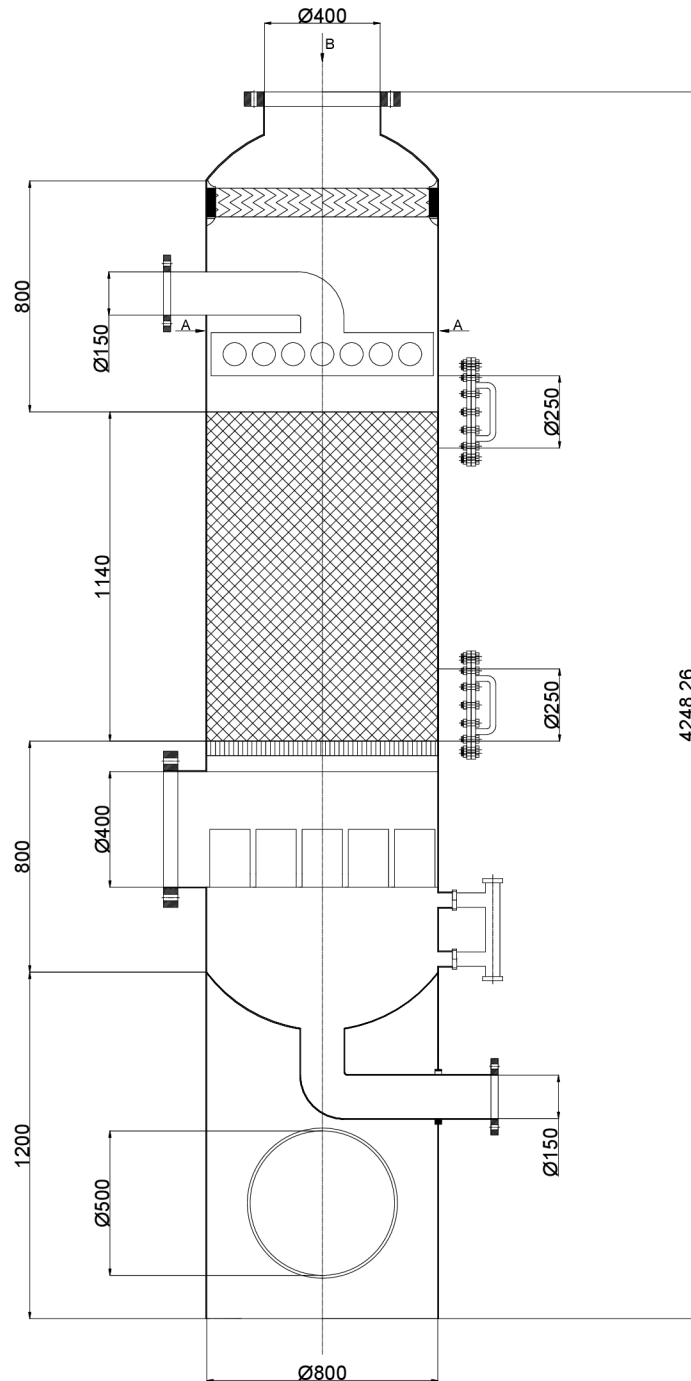
Tabulka 13: Závislost minimální tloušťky na průměru kolony [22, 24]

Tabulka 14: Konečné parametry kolony

Tabulka 15: Konečné parametry kolony s využitím hydroxidu sodného

PŘÍLOHY

PŘÍLOHA 1. VÝKRES ABSORBÉRU

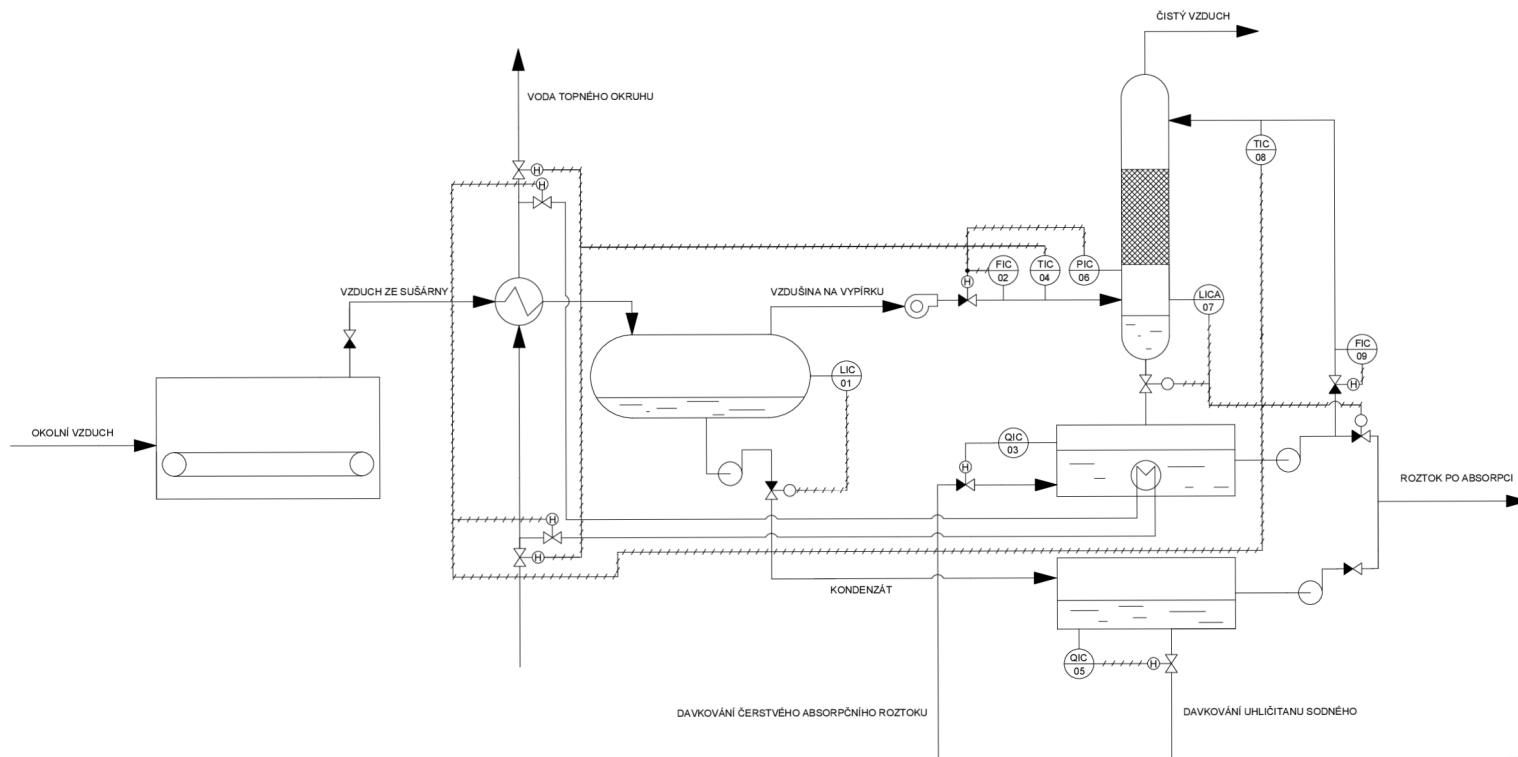


DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ PRÁCE
VYPRACOVAL	MENSHIKH MAKSIM
VEDOUCÍ PRÁCE	ING. JOSEF KALIVODA PH.D.
NÁZEV PRÁCE	SEPARACE PACHOVÝCH LÁTEK ZE VZDUŠIN

T VYSOKÉ UČENÍ FAKULTA
TECHNICKÉ CHEMICKÁ
V BRNĚ

NÁPLŇOVÝ
ABSORBER

PŘÍLOHA 2. TECHNOLOGICKÉ SCHÉMA DEODORAČNÍ JEDNOTKY



ZNAČENÍ ARMATUR	
	VENTILÁTOR
	VÝMĚNÍK TEPLA PLYN/KAPALINA
	ČERPADLO
	VÝMĚNÍK TEPLA KAPALINA/KAPALINA
	ZPĚTNÁ KLAPKA
	VENTIL S AUTOMATICKÝM OVLÁDNÍM
	VENTIL S AUTOMATICKÝM I RUČNÝM OVLÁDNÍM

ZNAČENÍ PRVKŮ MĚŘICÍ A REGULAČNÍ TECHNIKY	
A	ALARMUJÍCÍ
C	OVLÁDÁJÍCÍ
F	RYCHLOST PRŮTOKU
I	INDIKUJÍCÍ
L	ÚROVEŇ
P	TLAK
Q	KVALITA
T	TEPLOTA

DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ PRÁCE	VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA CHEMICKÁ
VYPRACOVAL	MENSHIKH MAKSIM	
VEDOUČÍ PRÁCE	ING. JOSEF KALIVODA PH.D.	
NÁZEV PRÁCE	SEPARACE PACHOVÝCH LÁTEK ZE VZDUŠIN	
		SCHÉMA ZAŘÍZENÍ