

Wydział Chemii UMCS  
Zakład Technologii Chemicznej

Ćwiczenie nr 22

Absorpcja.  
Obliczanie parametrów kolumny absorpcyjnej.

Lublin

## 2.3. Absorpcja.

### Obliczanie parametrów kolumny absorpcyjnej

Przenikanie, lub inaczej wymiana masy, jest podstawą wielu operacji jednostkowych takich jak: destylacja, rektyfikacja, suszenie, nawilżanie, absorpcja, adsorpcja, krystalizacja, rozpuszczanie, itp.

Absorpcja jest pochłanianiem składnika lub składników mieszaniny gazowej przez ciecz, która jest w tym przypadku absorbentem. Gaz wskutek dyfuzji przenika do cieczy przez powierzchnię międzyfazową, tworząc roztwór. W mieszaninie gazowej mogą być składniki rozpuszczalne i praktycznie nierozpuszczalne w cieczy. Pierwsze z nich nazywane są składnikami czynnymi, drugie obojętnymi lub inertami.

Statyka absorpcji, tj. równowaga między fazami ciekłą i gazową, zależy od składu jednej z faz, temperatury i ciśnienia, gdyż rozpatrywany układ dwufazowy posiada 3 stopnie swobody (reguła faz Gibbsa). Zatem w danej temperaturze i ciśnieniu danemu składowi jednej z faz odpowiada ściśle określony skład fazy drugiej. Absorpcja zajdzie wówczas, gdy zawartość składnika w fazie gazowej jest większa niż odpowiada to stanowi równowagi.

Wydzielanie gazu z roztworu nazywamy desorpcją lub eksorpcją\*. Desorpcja jest odwróceniem procesu absorpcji. Desorpcja zachodzi wówczas, gdy stężenie składnika czynnego w gazie jest niższe od stężenia równowagowego (w równowadze z cieczą).

Kinetykę absorpcji, to jest szybkość wymiany masy, określa stopień oddalenia układu od stanu równowagi. Oczywiście statyka, jak i kinetyka zależne są ponadto od właściwości cieczy absorbującej, składnika absorbowanego i gazu obojętnego. Na kinetykę absorpcji wpływają również warunki zetknięcia faz, związane z rodzajem konstrukcji urządzenia absorbującego (absorbera). Absorpcji często towarzyszy reakcja chemiczna, na przykład przy absorpcji amoniaku kwasem siarkowym czy absorpcji CO<sub>2</sub> w roztworze KOH.

W wielu przypadkach trudno przeprowadzić ostrą granicę między absorpcją fizyczną a absorpcją związaną z reakcją chemiczną.

Absorpcji towarzyszy efekt cieplny spowodowany zmianą stanu skupienia. Możemy mówić o absorpcji izotermicznej w przypadku, gdy ilość doprowadzanej cieczy jest stosunkowo duża w porównaniu z ilością gazu (mała rozpuszczalność gazu) lub gdy ciepło absorpcji jest w sposób należyty odprowadzane z aparatu absorpcyjnego. W przeciwnym razie absorpcja będzie przebiegać ze zmianą temperatury układu. Z tego ostatniego zjawiska korzysta się w przemyśle. Przykładem może być produkcja stężonego kwasu solnego metodą adiabatyczną. W metodzie tej ciepło powstające w czasie absorpcji HCl jest bezpośrednio wykorzystywane do odparowania wody, co prowadzi do otrzymania stężonego kwasu.

#### 2.3.1. Absorpcja i absorbery w przemyśle chemicznym

Absorpcję w przemyśle chemicznym stosuje się w następujących przypadkach:

- 1) otrzymanie produktów końcowych, na przykład: absorpcja HCl w wodzie w celu produkcji kwasu solnego;
- 2) rozdział mieszanin gazowych, na przykład absorpcja frakcji benzenowej z gazu koksowniczego;

---

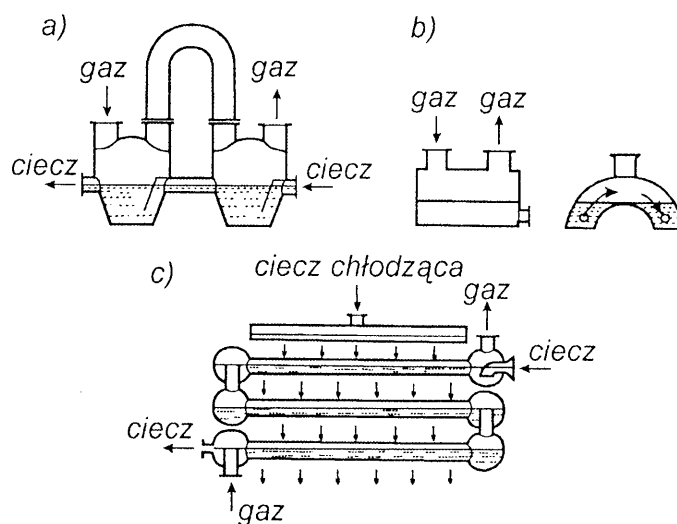
\* W literaturze anglosaskiej można spotkać termin *stripping* zamiast wyrazu *desorption*. W chemicznej technologii paliw *stripping* oznacza odpędzenie lotnych składników (w przemyśle tekstylnym – odbarwienie).

- 3) oczyszczanie gazów, na przykład usuwanie  $\text{CO}_2$  i  $\text{CO}$  z mieszaniny azotu i wodoru podczas przygotowania gazu do syntezy amoniaku, usuwanie  $\text{H}_2\text{S}$  z gazów;
- 4) rekuperacja (odzyskiwanie) lotnych rozpuszczalników.

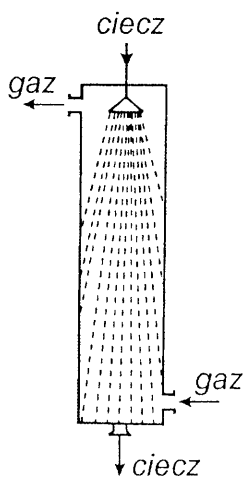
Absorpcję na skalę techniczną przeprowadza się z reguły w sposób ciągły w aparatach różnych typów różniących się sposobem wytwarzania powierzchni międzyfazowej. Aparaty te można sklasyfikować w sposób następujący:

- 1) absorbery powierzchniowe (na przykład: turyle, celariusze) obecnie mające ograniczone zastosowanie (rysunek 2.3.1);
- 2) kolumny absorpcyjne natryskowe (rysunek 2.3.2);
- 3) kolumny wypełnione, na przykład pierścieniami Raschiga, siodełkami Berla (rysunek 2.3.3);
- 4) absorbery bełkotkowe, na przykład kolumny półkowe (rysunki 2.3.4 i 2.3.5);
- 5) absorbery rozpryskowe (rysunek 2.3.6).

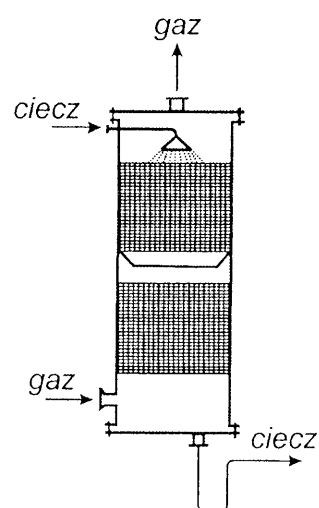
Poszczególne rodzaje wypełnień przedstawiono na rysunku 2.3.7, a ich ułożenie na rysunku 2.3.8.



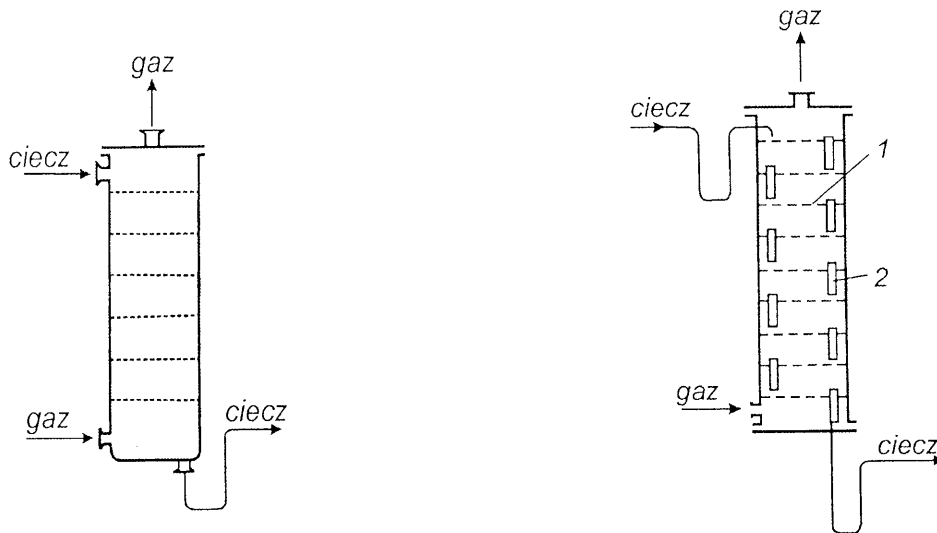
Rysunek 2.3.1. Absorbery powierzchniowe (a – turyl, b – celariusz, c – kwarcowy absorber rurowy z natryskiem cieczy chłodzącej)



Rysunek 2.3.2. Kolumna absorpcyjna natryskowa

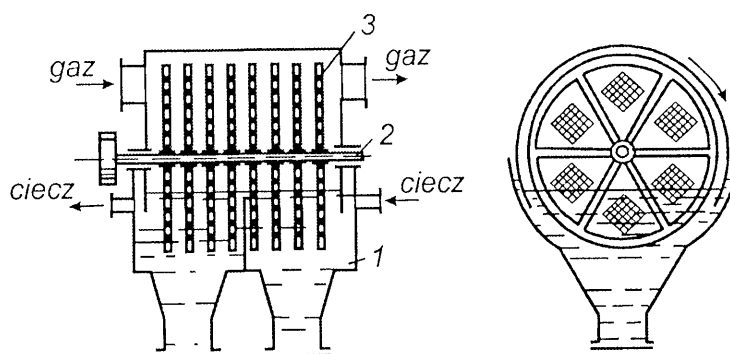


Rysunek 2.3.3. Kolumna absorpcyjna z wypełnieniem

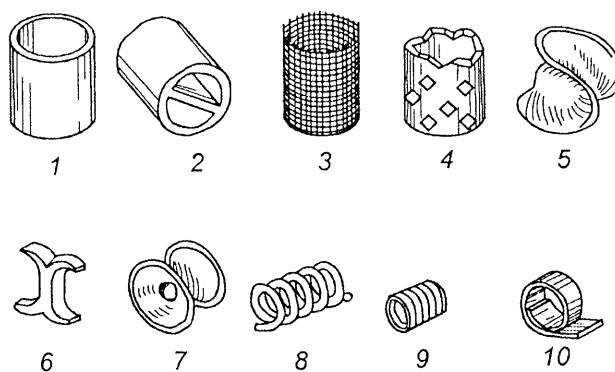


Rysunek 2.3.4. Kolumna absorpcyjna półkowa z nieuporządkowanym przelewem cieczy

Rysunek 2.3.5. Kolumna absorpcyjna półkowa z urządzeniem do przelewu (1 – półka, 2 – przelew)

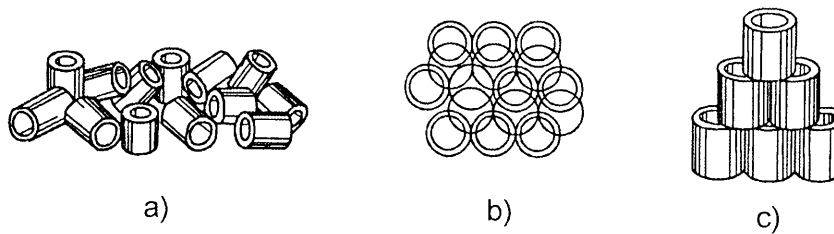


Rysunek 2.3.6. Absorber rozpryskowy mechaniczny (1 – obudowa, 2 – wał, 3 – tarcza sitowa)



Rysunek 2.3.7. Rodzaje wypełnienia kolumn absorpcyjnych (1 – pierścień Raschiga, 2 – pierścień Lessinga, 3 – pierścień z siatki drucianej, 4 – pierścień Intosa, 5 – siodełko Berla, 6 – kształtka bliźniacza, 7 – krążek Haltmeiera, 8 – spirala Wilsona, 9 – skrętka metalowa, 10 – pierścień Pryma)

Aparaty absorpcyjne mogą pracować przy wykorzystaniu zasady współprądu (równoległy prąd gazu i cieczy) lub przeciwprądu (kierunki gazu i cieczy przeciwne). Najczęściej w rozwiązaniach przemysłowych stosuje się recyrkulację, tj. kilkakrotny powrót cieczy lub gazu w absorberze pojedynczym (recyrkulacja jednostopniowa) lub w szeregu połączonych ze sobą aparatów (recyrkulacja wielostopniowa).



Rysunek 2.3.8. Sposoby ułożenia wypełnienia w absorberze (a – ułożenie dowolne; b, c – ułożenie regularne)

**Absorbery powierzchniowe** stosuje się w przypadku absorpcji, której towarzyszą efekty cieplne (na przykład absorpcja HCl w wodzie). W absorberach powierzchniowych gaz przepływa nad swobodną powierzchnią cieczy; celowo unika się tu rozwinięcia powierzchni międzyfazowej. W tym przypadku zależy na obniżeniu szybkości absorpcji celem uniknięcia trudności w odprowadzeniu dużych ilości ciepła. Wzrost temperatury cieczy, jako skutek niedostatecznego chłodzenia, mógłby spowodować niekorzystne przesunięcie równowagi, spadek rozpuszczalności, a nawet w pewnych przypadkach desorpcję składników już zaabsorbowanych w niższej temperaturze.

Gdy główny opór występuje po stronie warstewki gazowej (co ma miejsce przy przenikaniu masy składników dobrze rozpuszczalnych, na przykład przy absorpcji amoniaku w wodzie) celowe jest stosowanie takiego urządzenia, które może zapewnić dobre mieszanie gazu. Warunek ten spełnia **kolumna natryskowa**, w której faza gazowa jest mieszana wskutek ruchu kropli cieczy, w wyniku czego graniczna warstewka cieczy redukuje się. Nierzadko zamiast natrysku stosuje się aparaty mechaniczne posiadające odpowiednie ruchome urządzenia rozpryskujące do przestrzeni, przez którą przepływa gaz. Aparaty natryskowe mają tę zaletę, że opór przepływającego przez nie gazu jest niewielki.

W przypadku absorpcji składników o średniej rozpuszczalności, gdy opór stawiany masie przenikającej po stronie gazowej jest współmierny z oporem po stronie cieczy, stosuje się **kolumny wypełnione**, gdyż mamy tutaj dobre warunki mieszania się zarówno cieczy, jak i gazu. Ze względu na dobre warunki mieszania kolumna ta może być stosowana zarówno dla absorpcji składników o dużej, jak i słabej rozpuszczalności, dlatego jest ona najczęściej używanym aparatem absorpcyjnym.

W przypadku absorpcji składnika o małej rozpuszczalności w cieczy główny opór dla przenikającej masy stwarza graniczna warstewka po stronie cieczy. W tym przypadku najlepiej stosować urządzenia, w których na skutek dobrego mieszania cieczy ta graniczna warstewka będzie znacznie zmniejszona. Do tego celu służą **aparaty belkotkowe**, w których mieszanie cieczy odbywa się za pośrednictwem pęcherzyków gazu. Do tego typu aparatów należą **kolumny półkowe**. Używane są one do takich procesów jak absorpcja dwutlenku węgla w wodzie. Opór przepływu gazu przez kolumny półkowe jest znacznie wyższy niż w przypadku kolumn natryskowych, gdyż gaz musi pokonać ciśnienie statyczne cieczy na wszystkich półkach.

### 2.3.2. Podstawy teoretyczne operacji absorpcji

Na podstawie teorii warstewek granicznych Whitmana i Lewisa oraz pierwszego równania dyfuzji Ficka można wyprowadzić równanie opisujące wymianę masy w następującej postaci:

$$G = K \cdot F \cdot \Delta y \quad (2.3.1)$$

gdzie:  $G$  – ilość substancji przechodzącej z jednej fazy do drugiej,  
 $K$  – ogólny współczynnik wymiany masy,

$F$  – wielkość powierzchni rozdziału faz,

$\Delta y$  – siła napędowa wymiany masy, czyli różnica pomiędzy rzeczywistym stężeniem substancji w danej fazie a jej stężeniem osiągalnym w stanie równowagi.

Siłę napędową wymiany masy można więc wyrazić w postaci różnicy:

$$\Delta y = y - y^* \quad (2.3.2)$$

gdzie:  $y$  – stężenie rzeczywiste substancji w danej fazie,

$y^*$  – stężenie tejże substancji w tej samej fazie w stanie równowagi.

W miarę przebiegu absorpcji wzdłuż wysokości aparatu absorpcyjnego zmienia się siła napędowa wymiany masy (zmienia się oddalenie układu od stanu równowagi) i dlatego w obliczeniach trudno jest posługiwać się taką zmienną wielkością. W praktycznych obliczeniach posługujemy się więc średnią siłą napędową.

Dla dostatecznie małej powierzchni wymiany  $dF$  równanie wymiany masy można zapisać w postaci:

$$dG = K \cdot dF \cdot (y - y^*) \quad (2.3.3)$$

Ponieważ z bilansu materiałowego wymiany masy wiadomo, że:

$$G = V \cdot (y_1 - y_2) \quad (2.3.4)$$

lub

$$dG = V \cdot dy \quad (2.3.5)$$

gdzie:  $y_1$  – stężenie absorbentu w fazie gazowej przed absorpcją,

$y_2$  – stężenie absorbentu w fazie gazowej po absorpcji,

$V$  – natężenie przepływu fazy gazowej.

Z porównania równań 2.3.3 i 2.3.5 otrzymujemy:

$$dG = K \cdot dF \cdot (y - y^*) = V \cdot dy \quad (2.3.6)$$

Podstawiając do tego równania wielkość  $V$ , obliczoną z równania bilansu materiałowego wymiany, czyli podstawiając:

$$V = \frac{G}{y_1 - y_2} \quad (2.3.7)$$

otrzymuje się:

$$K \cdot dF \cdot (y - y^*) = \frac{G}{y_1 - y_2} \cdot dy \quad (2.3.8)$$

Przekształcając to ostatnie równanie i całkując go w granicach: od 0 do  $F$  i od  $y_2$  do  $y_1$  otrzymujemy:

$$\int_0^F dF = \frac{G}{y_1 - y_2} \cdot \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{K \cdot (y - y^*)} \quad (2.3.9)$$

Stąd można otrzymać:

$$G = F \cdot \frac{y_1 - y_2}{\int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{K \cdot (y - y^*)}} = K \cdot F \cdot \Delta y_{sr} \quad (2.3.10)$$

gdzie  $\Delta y_{sr}$  oznacza średnią siłę napędową  $\Delta y_{sr} = \frac{y_1 - y_2}{\int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{y - y^*}}$  (2.3.11)

Najczęściej ściśle określenie wielkości powierzchni rozdziału faz nie jest możliwe i dlatego wielkość tę we wzorach praktycznie używanych do obliczeń zastępuje się łatwo dostępną wielkością objętości. W przypadku kolumny absorpcyjnej z wypełnieniem objętość jest iloczynem pola powierzchni przekroju poprzecznego kolumny (oznaczanego dalej jako  $F_0$ ) i wysokości wypełnienia kolumny (oznaczaną dalej jako  $H_w$ ).

Przyjmując, że wielkość powierzchni rozdziału faz jest proporcjonalna do objętości, można napisać:

$$F = \alpha \cdot F_0 \cdot H_w \quad (2.3.12)$$

lub

$$dF = \alpha \cdot F_0 \cdot dH_w \quad (2.3.13)$$

gdzie:  $\alpha$  - wielkość powierzchni rozdziału faz w jednostce objętości.

Wstawiając tak wyrażoną wielkość powierzchni do poprzednio wyprowadzonego równania 2.3.10, można otrzymać:

$$G = K \cdot \alpha \cdot F_0 \cdot H_w \cdot \Delta y_{sr} \quad (2.3.14)$$

lub

$$G = K_v \cdot F_0 \cdot H_w \cdot \Delta y_{sr} \quad (2.3.15)$$

gdzie objętościowy współczynnik wymiany masy  $K_v = K \cdot \alpha$  (2.3.16)

Wstawiając równania 2.3.4 i 2.3.13 do różniczkowego równania 2.3.8 można otrzymać:

$$dH_w = \frac{V \cdot dy}{K_v \cdot F_0 \cdot (y - y^*)} \quad (2.3.17)$$

Całkując powyższą zależność w granicach od 0 do  $H_w$  i od  $y_2$  do  $y_1$  otrzymuje się:

$$H_w = \frac{V}{K_v \cdot F_0} \cdot \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{y - y^*} \quad (2.3.18)$$

lub krótko:

$$H_w = h_y \cdot m_y \quad (2.3.19)$$

gdzie:

$$h_y = \frac{V}{K_v \cdot F_0} \text{ nazywana jest wysokością jednostki przenoszenia masy,} \quad (2.3.20)$$

$$m_y = \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{y - y^*} \text{ nazywana jest liczbą jednostek przenoszenia masy.} \quad (2.3.21)$$

Wysokość wypełnienia kolumny jest więc iloczynem liczby i wysokości jednostki przenoszenia masy.

Jedna **jednostka przenoszenia masy** odpowiada odcinkowi długości aparatu, na którym zmiana roboczych stężeń absorbantu równa jest średniej sile napędowej na danym odcinku aparatu.

Jak widać z ostatnich wzorów, obliczenie wysokości jednostki przenoszenia masy ( $h_y$ ) nie przedstawia większych trudności, jeśli tylko znane są wyjściowe dane. Więcej trudności może sprawić obliczenie liczby jednostek przenoszenia masy ( $m_y$ ). Dokonuje się tego zazwyczaj z zastosowaniem metody graficznej.

### 2.3.3. Graficzne wyznaczanie liczby jednostek przenoszenia masy ( $m_y$ )

W celu graficznego wyznaczenia liczby jednostek przenoszenia masy należy najpierw sporządzić wykres jak na rysunku 2.3.9, we współrzędnych:

$x$  – względne stężenie molowe substancji absorbowanej w fazie ciekłej,

$y$  – względne stężenie molowe substancji absorbowanej w fazie gazowej.

Nanosząc na wykres równowagowe stężenia  $x$  i  $y$ , otrzymuje się linię równowagową (na rysunku 2.3.9 oznaczoną  $OC$ ). Punkty odpowiadające stężeniom absorbowanego składnika w obu fazach (ewentualnie odpowiadające stężeniom uzyskanym podczas badań absorpcji lub przyjętym do projektowania), otrzymuje się linię roboczą, nazywaną czasami również operacyjną (na rysunku 2.3.9 linia prosta  $AB$ ). Punkt  $A$  odpowiada składowi fazy ciekłej i gazowej w miejscu doprowadzenia tej drugiej do adsorbenta. Składowi fazy gazowej na końcu operacji absorpcji (na wyjściu gazu z adsorbenta), gdy faza ciekła nie zawiera jeszcze zaabsorbowanej substancji, odpowiada na rysunku 2.3.9 punkt  $B$ . Łącząc środki szeregu odcinków rzędnych zawartych pomiędzy linią równowagową i linią roboczą otrzymuje się linię pomocniczą (na rysunku 2.3.9 oznaczoną  $MN$ ), która nie musi być linią prostą. Odcinki rzędnych równe  $y-y^*$ , na przykład odcinek  $KL$ , wyrażają aktualną siłę napędową procesu.

Następnie z punktu  $B$  prowadzi się linię równoległą do osi  $x$ , do przecięcia z linią pomocniczą  $MN$  w punkcie  $D$ , i dalej do punktu  $E$  położonego na tej równoległej w odległości  $BD$ . Z punktu  $E$  wystawia się prostą prostopadłą do linii  $BE$  aż do przecięcia z linią roboczą w punkcie  $F$ .

Trójkąty  $BEF$  i  $BDK$  są podobne, z czego wynika, że:

$$\frac{EF}{KD} = \frac{BE}{BD}$$

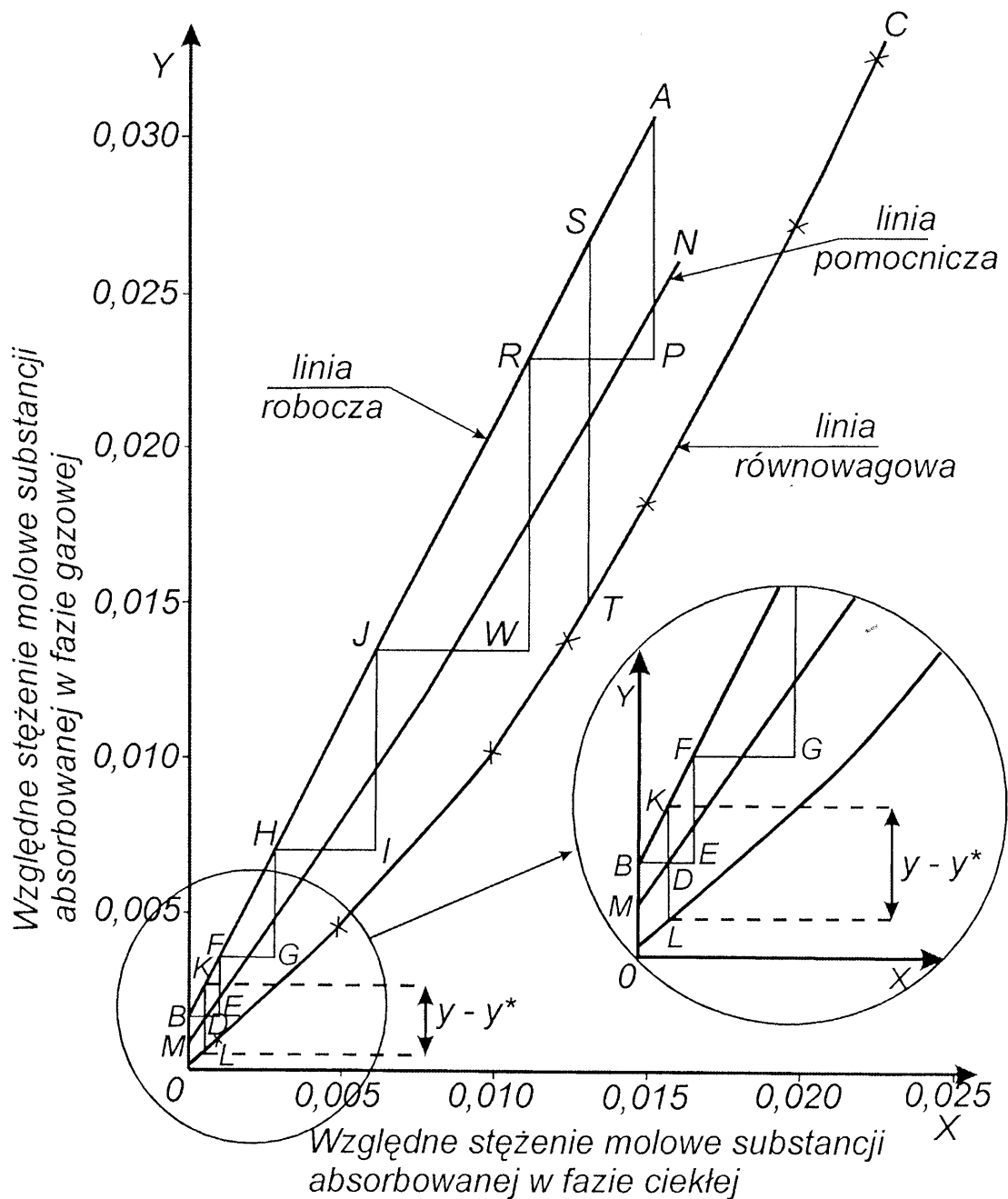
Podstawiając  $BE=2 \cdot BD$  i  $KD = \frac{KL}{2}$  (zgodnie z przyjętymi zasadami wykreślenia rysunku) otrzymuje się :

$$EF = KD \cdot \frac{BE}{BD} = \frac{KL}{2} \cdot \frac{2 \cdot BD}{BD} = KL$$

Stopień  $BEF$  odpowiada pewnemu odcinkowi długości aparatu, w którym zmiana stężeń roboczych w fazie gazowej równa jest  $EF$ , a w fazie ciekłej  $BE$ . Odcinek  $KL$  obrazuje średnią siłę napędową absorpcji na tym odcinku aparatu. Ponieważ zmiana stężeń roboczych  $EF$  równa jest sile napędowej  $KL$ , wobec tego stopień  $BEF$  odpowiada jednostce przenoszenia masy.

W sposób analogiczny do opisanego, z punktu  $F$  wykreśla się następny stopień  $FGH$  i potem dalsze stopnie, aż do punktu  $A$ , który odpowiada składowi fazy gazowej na wejściu do aparatu (na początku operacji absorpcji) i znajduje się liczbę stopni, czyli liczbę jednostek przenoszenia masy, potrzebnych dla zmiany stężeń roboczych od  $A$  do  $B$ .





Rysunek 2.3.9. Graficzne wyznaczenie liczby jednostek przenoszenia masy

Jeśli pomiędzy A i B nie można wpisać całego stopnia przeniesienia masy, to liczba przeniesień nie jest liczbą całkowitą i równa jest stosunkowi długości odcinka AP, określającego niepełny stopień, do długości odcinka ST (między linią roboczą i równowagową, przeprowadzonego przez środek niepełnego stopnia) plus liczba wpisanych całkowicie stopni przeniesienia masy.

Dla przypadku wymiany masy przedstawionego na rysunku 2.3.9, stosunek  $\frac{AP}{ST} = 0,65$ , a liczba jednostek przenoszenia masy wynosi 4,65.

Jak można zauważyć, do wyznaczenia liczby jednostek przenoszenia masy niezbędna jest znajomość stężeń składnika absorbowanego w górnej części absorbera, oznaczanych dalej  $y_g$  i  $x_g$ , oraz w dolnej części absorbera, oznaczanych dalej  $y_d$  i  $x_d$ . W przypadku absorpcji mieszaniny amoniaku i powietrza w wodzie stężenia te wyraża się odpowiednio w kilomolach amoniaku na kilomol powietrza i kilomolach amoniaku na kilomol wody.

## 2.3.4. Opis ćwiczenia

### Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie praktycznego zastosowania ogólnego równania wymiany masy do obliczeń wybranych podstawowych wielkości projektowych dla przypadku wymiany masy w układzie ciecz–gaz, na przykładzie absorpcji amoniaku w wodzie.

### Zadania

1. Wyznaczyć liczbę jednostek przenoszenia masy i obliczyć wysokość wypełnienia kolumny absorpcyjnej.  
*Uwaga! Prowadzący ćwiczenia podaje następujące dane procesowe:*
  - a) skład i szybkość objętościową mieszaniny amoniaku i powietrza wprowadzanej do absorpcji ( $\text{cm}^3/\text{min}$ ),
  - b) szybkość objętościową wody wprowadzanej do zraszania kolumny absorpcyjnej ( $\text{cm}^3/\text{min}$ ),
  - c) żądany (założony) stopień absorpcji amoniaku w wodzie (%).
2. W aparaturze laboratoryjnej eksperymentalnie sprawdzić przeprowadzone obliczenia.

### Sprzęt i odczynniki

Sprzęt:

1. Zestaw aparaturowy z rysunku 2.3.10.
2. Erlenmajerka  $250 \text{ cm}^3$ .
3. Pipeta  $5 \text{ cm}^3$ .
4. Biureta.

Odczynniki:

1. Sprężone powietrze.
2. Sprężony amoniak.
3. Roztwór 0,1 molowy HCl.
4. Roztwór oranżu metylowego.
5. Woda destylowana.

### Wykonanie ćwiczenia

#### Wyznaczanie liczby jednostek przenoszenia masy przy absorpcji amoniaku w wodzie

Na podstawie danych procesowych należy obliczyć:

- $y_d$  – początkowe stężenie  $\text{NH}_3$  w fazie gazowej, w  $\text{kmol NH}_3 / \text{kmol powietrza}$ ;
- $y_g$  – stężenie  $\text{NH}_3$  w gazie odlotowym, w  $\text{kmol NH}_3 / \text{kmol powietrza}$ ;
- $x_d$  – stężenie  $\text{NH}_3$  w roztworze otrzymanym po absorpcji, w  $\text{kmol NH}_3 / \text{kmol wody}$ ;
- $x_g$  – stężenie  $\text{NH}_3$  w cieczy, którą zrasza się kolumnę absorpcyjną.

Ponieważ do absorpcji stosuje się „czystą” wodę (bez amoniaku) więc  $x_g = 0$ .

Otrzymane wartości stężenia  $\text{NH}_3$  w poszczególnych fazach na wejściu kolumny ( $x_g, y_g$  – górna część absorbera) i wyjściu ( $x_d$  i  $y_d$  – dolna część absorbera) należy nanieść na wykres zawierający linię równowagową układu amoniak–woda–powietrze, jak na rysunku 2.3.9. Wykres ten należy sporządzić na podstawie wartości stężeń równowagowych amoniaku

Tabela 2.3.1. Stężenia równowagowe amoniaku

$x = \frac{\text{kmol } NH_3}{\text{kmol } H_2O}$	$y = \frac{\text{kmol } NH_3}{\text{kmol } \text{powietrza}}$
0	0
0,0050	0,0045
0,0100	0,0102
0,0126	0,0138
0,0150	0,0183
0,0200	0,0237
0,0230	0,0327

podanych w tabeli 2.3.1. Łącząc punkty  $B (x_g, y_g)$  oraz  $A (x_d, y_d)$  linią prostą, otrzymuje się roboczą linię absorpcji  $AB$ .

Posługując się otrzymanym wykresem linii równowagi  $OC$  i linii roboczej  $AB$ , dalsze wyznaczenie liczby jednostek przenoszenia przeprowadza się w sposób opisany w podrozdziale 2.3.3.

### Wyznaczanie wysokości wypełnienia kolumny do absorpcji

Wysokość wypełnienia kolumny do absorpcji amoniaku oblicza się, wstawiając wyznaczoną graficznie liczbę jednostek przenoszenia masy ( $m_y$ ) do wzoru 2.3.22, będącego innym zapisem równania 2.3.18.

$$H_w = \frac{V}{K_v \cdot F_0} \cdot m_y \quad [\text{m}] \quad (2.3.22)$$

gdzie:  $V$  – natężenie przepływu absorbowanego składnika fazy gazowej, tj. szybkość podawania amoniaku, kmol/godzina,

$K_v$  – objętościowy współczynnik wymiany masy, dla stosowanej w ćwiczeniu kolumny równy 0,32 kmol/godz·m<sup>3</sup>,

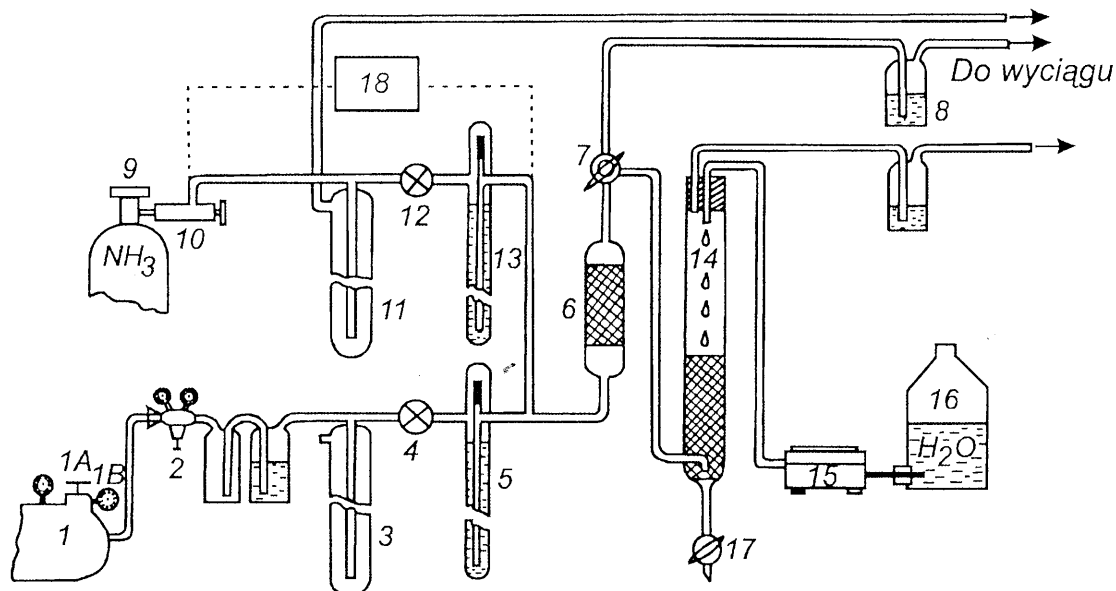
$F_0$  – powierzchnia przekroju kolumny, m<sup>2</sup>.

### Eksperymentalne przeprowadzanie absorpcji amoniaku w wodzie

Schemat aparatury do badania absorpcji amoniaku w wodzie przedstawiony jest na rysunku 2.3.10.

Aby przeprowadzić absorpcję amoniaku z jego mieszaniny z powietrzem w kolumnie z wyliczoną wcześniej wysokością wypełnienia, należy najpierw z krzywych kalibracyjnych przepływomierzy (fleometrów) odczytać ich konieczne wychylenia dla uzyskania wymaganych przepływów gazów. Znając te wielkości, można przystąpić do zestawiania mieszaniny amoniaku i powietrza. W tym celu należy:

1. Włączyć sprężarkę (kompresor) powietrza. Gdy ciśnienie na manometrze sprężarki osiągnie wartość około 5 atmosfer, wyłączyć ją.
2. Dokręcając zawór membranowy sprężarki (1A), ustalić na manometrze wylotowym (1B) ciśnienie 0,5 atmosfery.
3. Ustalić ciśnienie powietrza w aparaturze przez ostrożne dokręcanie śruby nastawczej reduktora butlowego (2), tak aby nadmiarowe powietrze w manostacie (3) spokojnie wpływało w postaci niedużych banieczek.



Rysunek 2.3.10. Schemat aparatury do badania absorpcji amoniaku w wodzie. (1A – zawór membranowy sprężarki, 1B – manometr wylotowy, 2 – reduktor butlowy, 3 – manostat, 4 – zawór igłowy, 5 – przepływomierz powietrza, 6 – mieszalnik, 7 – kran, 8 – płuczka, 9 – zawór główny butli z amoniakiem, 10 – zawór igłowy lub reduktor butlowy, 11 – manostat, 12 – zawór igłowy, 13 – przepływomierz amoniaku, 14 – kolumna absorpcyjna, 15 – pompa perystaltyczna, 16 – zbiornik z wodą, 17 – kran, 18 – elektroniczny regulator przepływu (zastępujący elementy 11, 12 i 13)

4. Za pomocą zaworu igłowego (4) ustawić właściwe, wyznaczone z krzywej kalibracyjnej, wychylenie przepływomierza powietrza (5).
5. Strumień powietrza za pomocą kranu (7) skierować z mieszalnika (6) poprzez płuczkę wodną (8) do wyciągu.
6. Odkręcić zawór główny butli z amoniakiem (9).
7. Odkręcając ostrożnie zawór igłowy (10) przy butli z amoniakiem, ustalić swobodny wypływ nadmiarowego gazu w manostacie (11).
8. Za pomocą zaworu igłowego (12) ustawić właściwe wychylenie przepływomierza amoniaku (13) (zgodnie z krzywą kalibracyjną).

*Uwaga! Zawór igłowy (10), manostat (11), zawór igłowy (12) oraz przepływomierz (13) mogą być zastąpione reduktorem butlowym i elektronicznym regulatorem (18) masowego przepływu amoniaku. W takim przypadku, zamiast czynności opisanych w punktach 7 i 8, należy, po punkcie 6, dokręcając zawór membranowy reduktora butlowego (10,) ustalić na jego manometrze wylotowym ciśnienie 0,5 atmosfery i ustawić na elektronicznym regulatorze przepływu (18) założony przepływ amoniaku.*

W ten sposób zestawiona mieszanka gazowa powinna przepływać z ominięciem kolumny absorpcyjnej przez przynajmniej 10 minut, dla ustalenia się jej zadanego składu. W tym czasie przystąpić do wypełniania kolumny (14) szklanymi pierścieniami na wysokość poprzednio obliczoną. Wysokość wypełnienia mierzyć od końca rurki, którą mieszanina gazowa wpływa do kolumny.

Po przygotowaniu kolumny można przełączyć strumień mieszaniny gazów za pomocą kranu (7) do kolumny, zakręcając wcześniej dolny kran kolumny (17). Następnie włączyć i ustawić pompę perystaltyczną (15) na wymaganą dla zraszania kolumny wydajność.

*Uwaga! Po skierowaniu mieszaniny gazów do kolumny należy skorygować ewentualne zmiany przepływów, powodowane większym oporem ich przepływu przez kolumnę.*

Po około 30 minutach pracy kolumny można przystąpić do analizowania roztworu po absorpcji. Przez ten okres należy roztwór amoniaku zbierający się u dołu kolumny absorp-

cyjnej zlewać, tak aby wchodzący do niej gaz nie barbotował – powodowałoby to zmianę oporów i tym samym ilości przepływającego gazu. Zbierany roztwór może nie być analizowany, gdyż ustalenie stanu równowagi absorpcji wymaga dłuższego czasu, wynik mógłby być zafałszowany również ustalaniem wielkości przepływów amoniaku i powietrza. Nowe porcje roztworu po absorpcji zlewać do erlenmajerki, w zależności od założonych parametrów zraszania kolumny) po kilku lub kilkunastu minutach pracy kolumny i poddać analizie. Analiza polega na miareczkowym oznaczeniu stężenia amoniaku w roztworze po absorpcji. Z zebranego roztworu pobrać pipetką 5 cm<sup>3</sup> próbki, dodać wody destylowanej i miareczkować w erlenmajerce 0,1 M roztworem kwasu solnego wobec oranżu metylowego jako wskaźnika.

Należy wykonać szereg kolejnych analiz próbek zbieranych w czasie absorpcji. Średnia z kolejnych wyników niewykazujących tendencji wzrostowych świadczy o osiągnięciu stanu stacjonarnego operacji absorpcji i jest podstawą do obliczenia stężenia amoniaku w roztworze po absorpcji.

Obliczony na podstawie analiz praktyczny stopień absorpcji amoniaku w wodzie należy porównać z parametrami założonymi i podać w sprawozdaniu. Do sprawozdania należy dołączyć również wykres, za pomocą którego wyznaczono liczbę stopni przenoszenia masy i obliczenia wysokości wypełnienia kolumny absorpcyjnej.

## Literatura

1. Kozak D., *Wybrane operacje jednostkowe i aparaty przemysłu chemicznego*, Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej, Lublin 1986.
2. Pawłow K.F., Romankow P.G., Noskow A.A., *Przykłady i zadania z zakresu aparatury i inżynierii chemicznej*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1988.
3. Kuczyński W., *Ćwiczenia z technologii chemicznej*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1974.