

Jan HEHLMANN\*, Krzysztof KIRAGA\*

## **BADANIA PROCESU ABSORPCJI AMONIAKU W KOLUMNIE DYSPERSYJNO-BARBOTAŻOWEJ\*\***

Przedmiotem referatu jest prezentacja nowego typu kolumny absorpcyjnej pracuje w systemie hybrydowym, gdzie w I stopniu stosowane jest wypełnienie komórkowe generujące ultradyspersyjny reżim hydrauliczny, zaś w II stopniu generowany jest reżim barbotażowy z elementami mikrocyrkulacji w obrębie pakietowego wypełnienia komórkowego. Istotą tego rozwiązania jest możliwość rozwinięcia przepływów o dużej prędkości z wytworzeniem unikalnych reżimów hydraulicznych prowadzących do wysokiej skuteczności procesowej oraz obniżenia kubatury kolumn w stosunku do rozwiązań tradycyjnych o (40...60)%. Badania procesowe dla układu amoniak-powietrze-woda pozwoliły na opracowanie równań kryterialnych, przydatnych w procedurze projektowej.

### **1.WSTĘP**

Liczne technologie przemysłu chemicznego wykorzystują amoniak bądź jako surowiec do produkcji, bądź jako reagent pomocniczy. Większość procesów, w których stosuje się amoniak przebiega w aparatach kolumnowych typu wypełnionego bądź półkowego, a także typu dyspersyjnego. Aparaty te różnią się między sobą konstrukcją, reżimem hydraulicznym i charakterem kontaktu międzyfazowego. Elementy te powodują, że stosowane w określonym węźle technologicznym rozwiązania, nie zawsze spełniają wszystkie kryteria techniczno-ekonomiczne, a także kryteria związane z postulatami ekologicznymi. Różna konstrukcja, różny reżim hydrauliczny i różny charakter międzyfazowego kontaktu powoduje, że występuje cały szereg czynników, które warunkują zastosowanie danego typu kolumny, bądź określają konieczność podjęcia prac, zmierzających do zaprojektowania nowego rozwiązania - eliminującego kluczową niedogodność procesową, bądź eksploatacyjną. Ważność poruszonego problemu, wynika z konieczności modyfikacji węzłów kolumnowych celem spełnienia wymogów związanych z postulatami ekologicznymi i poprawą wskaźników techniczno - ekonomicznych,

---

\* Katedra Aparatury Chemicznej i Procesowej, Politechnika Śląska Gliwice

gdyż kolumny w licznych technologiach stanowią nawet w 50% o inwestycyjnych kosztach aparaturowych, osiągając ekstremalnie średnice do (8...15) m oraz wysokości do 100 m. Złagodzenie tych problemów uzyskuje się poprzez zastosowanie nowych rozwiązań; wypełnień kolumnowych lub typu półek. Tendencje rozwojowe są głównie określone przez:

- wzrost prędkości fazy gazowej, wpływającej na obniżenie średnicy kolumny,
- wzrost skuteczności działania, wpływającej na obniżenie wysokości warstwy wypełnienia bądź liczby półek,
- obniżenie oporów przepływu, dzięki czemu obniża się koszty eksploatacyjne,

Istotny jest więc kierunek prac, zmierzający do modernizacji węzłów technologicznych przez aplikację nowych rozwiązań aparaturowych i procesowych. Rozwiązaniem takim jest aparat hybrydowy (rys.1.1), posiadający współprądową kolumnę dyspersyjną (poz. A) i przeciwprądową kolumnę barbotażową (poz. B). W części współprądowej znajduje się warstwa wypełnienia komórkowego skośnego (poz.1) zraszanego za pomocą dystrybutora, tak że gaz i ciecz przepływają współprądowo. W obrębie tej kolumny występuje kilka charakterystycznych stref:

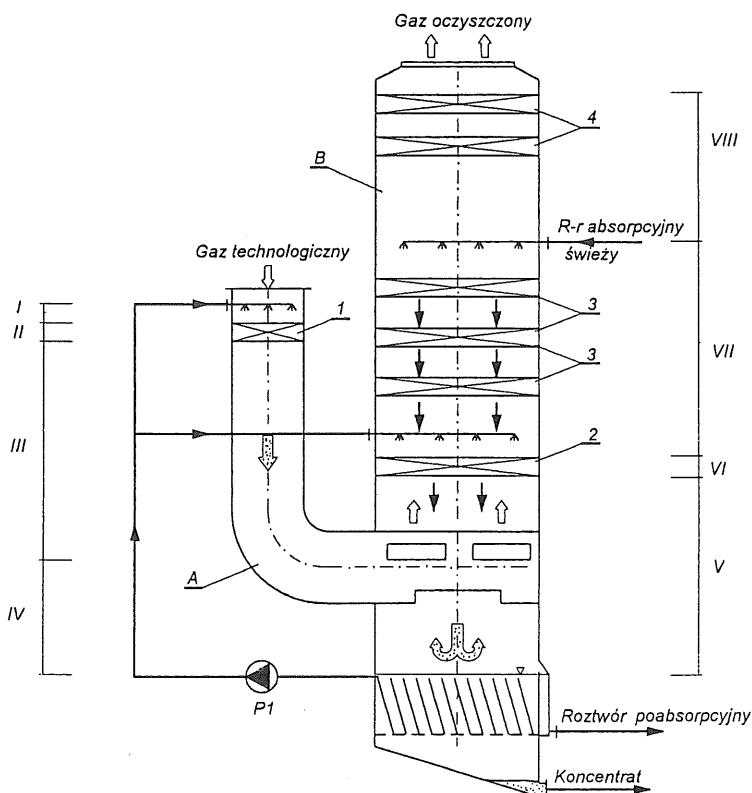
- I - strefa wtrysku cieczy, połączona z pierwotnym wytworzeniem reżimu dyspersyjnego,
- II - strefa kompresji faz w obrębie wypełnienia komórkowego (poz. 1) i wypływu przez charakterystyczny układ krzyżowych szczelin, połączonego z akceleracją przepływu faz, prowadzącą do wytworzenia intensywnego wtórnego reżimu dyspersyjnego,
- III - strefa współprądowego przepływu dyspersyjnego,
- IV - strefa przepływu wytworzona przez króciec deflektorowy, generujący efekty charakterystyczne dla uderzeniowo-wirowego przepływu strugi.

Dyspersyjny strumień wpływa do kolumny barbotażowej (poz.B) przez specyficzny króciec deflektorowy, którego konstrukcja zapewnia uzyskanie wyrównanego profilu prędkości, co ma istotne znaczenie dla stabilizacji hydrauliki w obrębie pakietów wypełnienia komórkowego promieniowego (poz.2 i 3).

W kolumnie tej występują następujące strefy:

- V - strefa przepływu rewersyjnego,
- VI - strefa barbotażowa w obrębie warstwy wypełnienia komórkowego, pracującej w systemie zraszania cyrkulacyjnego,
- VII - wielosekcyjna strefa z intensywnym reżimem barbotażowym, generowanym przez kolejne pakiety wypełnienia, zawierające

(2...4) warstwy o wysokości pakietu (100...200) mm, przy czym strefa ta jest zasilana świeżym roztworem absorpcyjnym, VIII - strefa odkraplania gazu, która może zawierać odkraplacz wstępny i końcowy.



Rys.1. Aparat hybrydowy z wypełnieniem komórkowym.

W dolnej części aparat może być wyposażony w osadnik lamelowy, umożliwiający ciągłe odprowadzanie zanieczyszczeń stałych i ewentualnych produktów reakcji.

Hybrydowy aparat kolumnowy z wypełnieniem komórkowym stanowi oryginalne rozwiązanie, pozwalające znacznie zredukować wymiary aparatów stosowanych w procesach; absorpcji, jednoczesnej wymiany ciepła i masy, a także odpylania. Obszerne badania hydrauliki wypełnienia komórkowego [1], ujawniające jego specyficzne właściwości, pozwoliły stwierdzić, że praca wypełnienia komórkowego - rys.2, przy właściwej kompletacji warstw, możliwa jest w obszarze określonym następującym zakresem parametrów:

- dla reżimu dyspersyjnego:

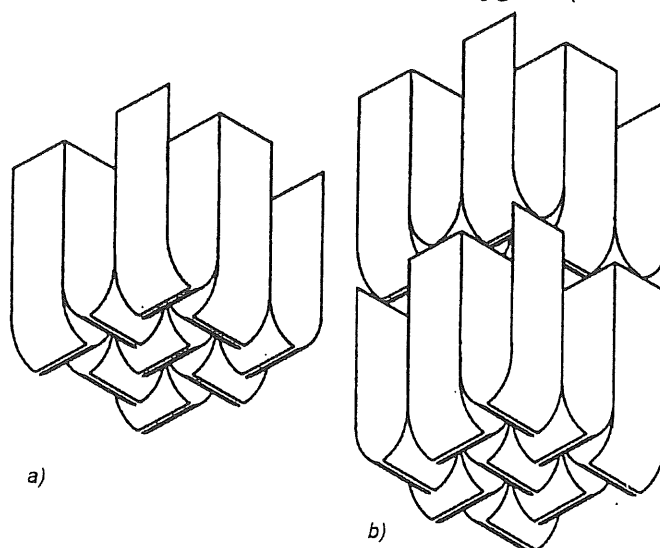
czynnik przepływowy gazu  $F \in (5...25) \text{ m/s} \cdot (\text{kg/m}^3)^{0,5}$

objętościowa gęstość zraszania cieczą  $g_{cV} \in (10...120) \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$

- dla reżimu barbotażowego:

czynnik przepływowy gazu  $F \in (1,5...7) \text{ m/s} \cdot (\text{kg/m}^3)^{0,5}$

objętościowa gęstość zraszania cieczą  $g_{cv} \in (5 \dots 160) \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$



Rys. 2. Wypełnienie komórkowe: a) element warstwy wypełnienia, b) element układu pakietowego

Operowanie wysokimi wartościami czynnika przepływowego gazu i gęstościami zraszania cieczą generuje intensywne reżimy hydrauliczne, stymulujące charakterystyczne procesy międzyfazowe w obu strefach aparatu hybrydowego. Prowadzi to do intensyfikacji mechanizmów procesowych w stopniu przewyższającym dotychczasowe rozwiązania. W fazie gazowej inicjuje się równoczesny przebieg szeregu mechanizmów procesowych tj. mechanizm; wymuszonej konwekcji, kompresji i dyspersji faz, termoforezy, uderzenia, barbotażu, mikrocyrkulacji wewnątrzkomórkowej i reakcji chemicznej. Jednocześnie w obrębie fazy ciekłej występuje intensywne mieszanie oraz intensywna permutacja struktur.

Aparat ten może łączyć w sobie kilka równoczesnych procesów:

- absorpcję w następujących po sobie reżimach; współprądowym, uderzeniowym, rewersyjnym, barbotażowym,
- wymianę ciepła,
- odpylanie gazu i kondensację par,
- separację kropeł z gazu wylotowego,
- sedymentację fazy stałej w osadniku lamelowym.

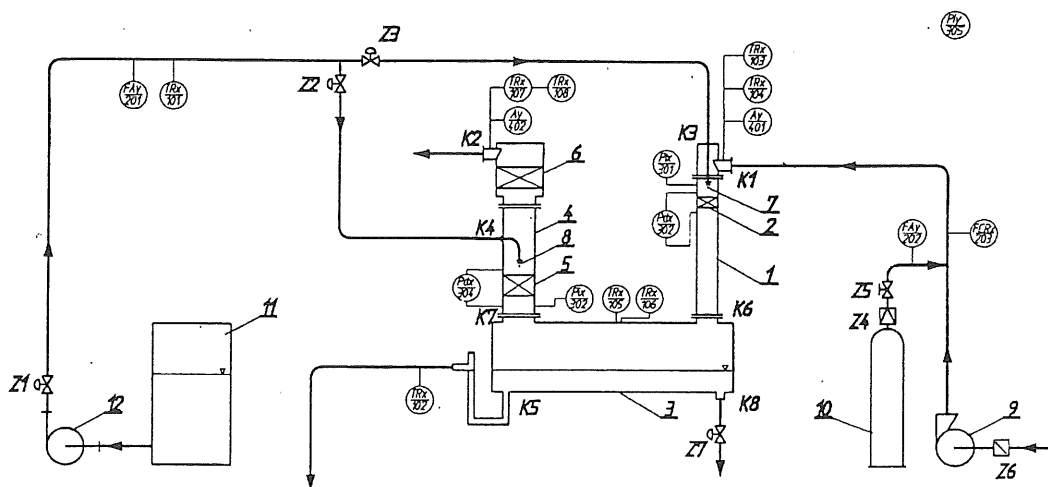
## 2. Badania procesowe.

Badania procesu absorpcji amoniaku w wodzie, przeprowadzono wykorzystując barbotażową i dyspersyjną kolumnę z wypełnieniem komórkowym, które stanowiły odwzorowanie I i II stopnia aparatu hybrydowego, przedstawionego na rys.1. Badania laboratoryjne

przeprowadzono dla układu modelowego powietrze - amoniak - woda, zaś badania przemysłowe dotyczyły technologii oczyszczania gazu koksowniczego i absorpcji gazów resztkowych z instalacji mocznika. Celem badań było sformułowanie równań procesowych umożliwiających racjonalne projektowanie nowego typu kolumn dla przemysłu koksochemicznego, azotowego, sodowego oraz dla celów związanych z ochroną środowiska.

## 2.1. Badania laboratoryjne

Program badań, odwzorowujący warunki przemysłowe, zrealizowano w oparciu o stanowisko badawcze kolumn hybrydowych, przedstawione na rys.3.



Rys.3. Schemat stanowiska badawczego

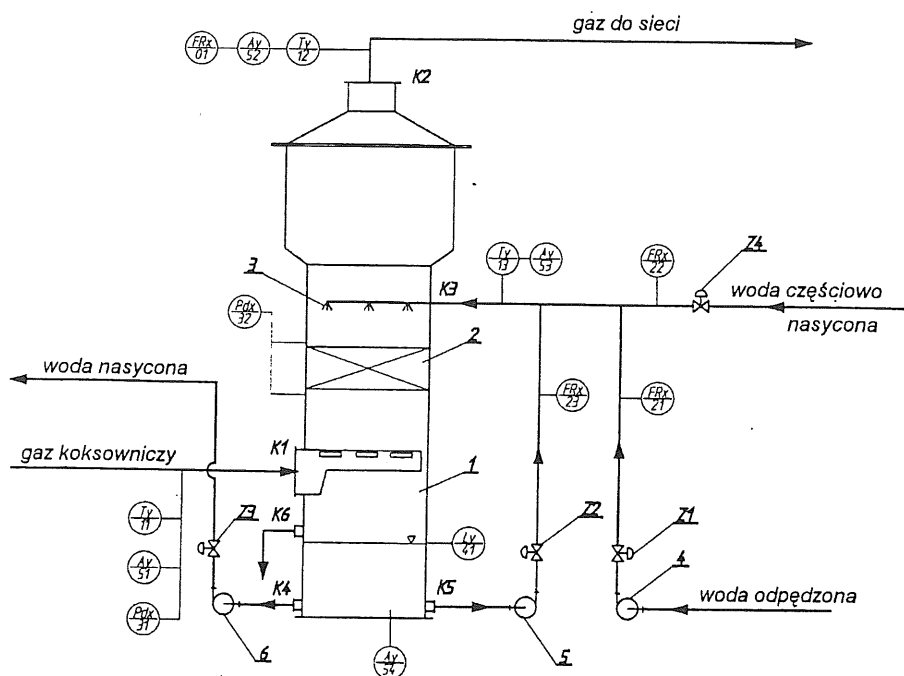
Oznaczenia: 1- kolumna dyspersyjna, 2-wypełnienie komórkowe skośne, 3-zbiornik r-ru, 4-kolumna barbotażowa, 5-wypełnienie komórkowe promieniowe, 6-separator kropel, 7,8- zraszacze, 9-wentylator, 10-butla z amoniakiem, 11-zbiornik świeżego absorbenta, 12- pompa, Z1...Z7 - zawory regulacyjne, K1...K7 - króćce mediów procesowych

Badania przeprowadzono dla następujących przedziałów zmienności parametrów procesowych:

Parametry zmienne	Kolumna dyspersyjna	Kolumna barbotażowa
objętościowe natężenie zraszania $g_{cv}$ [ $m^3/m^2h$ ]	(20...100)	(10...50)
prędkość gazu $w_{go}$ [m/s]	(5...20)	(1,5...5,0)
stężenie wlotowe amoniaku w gazie modelowym $y_{wI}$ [% obj.]	(0,15...1,0)	(0,2...1,0)
liczba warstw wypełnienia $n$	1	(1...4)
szerokość szczeliny wypełnienia $s$ [mm]	(1...4)	(1,5...5,5)

## 2.2. Badania przemysłowe.

Badania procesu absorpcji amoniaku z surowego gazu koksowniczego podjęto w celu rozszerzenia zakresu stosowania równania kryterialnego. Wyniki badań przemysłowych posłużyły do uzupełnienia bazy danych do rachunku wyrównawczego. Węzeł absorpcji amoniaku w Zakładach Koksowniczych „Zdzieszowice” składa się z trzech kolumn absorpcyjnych o średnicy  $D_k=6$  m i wysokości  $H_k=32$  m. Kolumny podzielone są na sekcje zraszane wodą za pomocą pomp cyrkulacyjnych. W każdej sekcji usypano pierścienie Raschiga 50x50x5 mm na wysokość 1,6 m. Kolumna badawcza z wypełnieniem komórkowym jest zabudowana jako trzecia w węźle absorpcji amoniaku i wchodzi w skład I ciągu technologicznego linii absorpcji niskociśnieniowej Z. K. „Zdzieszowice”. Schemat kolumny badawczej przedstawiono na rys.4. Korpus kolumny (poz.1) składa się z dwóch części walcowych o średnicy  $\phi=2000$  i  $\phi=2400$  połączonych dyfuzorem stożkowym. Całkowita wysokość kolumny wynosi ok. 8m. W kolumnie zastosowano wypełnienie komórkowe promieniowe o wymiarach komórki 20x20x50 mm, szerokości szczeliny  $s=5$  mm i ilości warstw  $n=4$ .



Rys. 4. Kolumna badawcza absorpcji  $\text{NH}_3$  z gazu koksowniczego.  
Oznaczenia: 1-korpus kolumny, 2-wypełnienie komórkowe promieniowe,  
3-zraszacz, 4,5,6- pompy, K1...K6 - króćce mediów procesowych,  
Z1...Z4 - zawory regulacyjne

Badania przeprowadzono dla następującego zakresu zmienności parametrów procesowych:

- objętościowe natężenie przepływu gazu:

$$V_g = (40, 50, 60, 70) \cdot 10^3 \text{ Nm}^3/\text{h},$$

- objętościowe natężenie przepływu wody:  $V_w = (24, 33, 42) \text{ m}^3/\text{h}$ ,

- stężenie  $\text{NH}_3$  w gazie na wlocie do kolumny:

$$c_{\text{NH}_3, g1} \in (0,842 \dots 84,194) \text{ g}/100 \text{ Nm}^3,$$

- stężenie  $\text{NH}_3$  w wodzie na wlocie do kolumny:

$$c_{\text{NH}_3, w1} \in (0,014 \dots 0,870) \text{ g}/\text{dm}^3,$$

- temperatura gazu na wlocie do kolumny:  $t_{g1} \in (23 \dots 39,5) ^\circ \text{C}$ ,

- temperatura wody na wlocie do kolumny:  $t_{w1} \in (22,5 \dots 36,5) ^\circ \text{C}$ ,

### 3. MODEL PROCESOWY SKUTECZNOŚCI ABSORPCJI.

Z analizy literatury [5,6,7] wynika, że przypadek absorpcji amoniaku w wodzie może być traktowany jako absorpcja fizyczna z bardzo dobrą rozpuszczalnością składnika w fazie ciekłej. Dla układu tego można przyjąć, że współczynnik przenikania masy odpowiada współczynnikowi wnikania po stronie fazy gazowej, gdyż opory dyfuzyjne po stronie fazy ciekłej są ok. 50-krotnie mniejsze niż opory fazy gazowej [2].

Dla procesu absorpcji, molowy strumień transportowanego składnika A z fazy gazowej do fazy ciekłej, można wyrazić wzorem :

$$d\dot{n}_A = \beta'_{Ag} \cdot (y_A - y_{Az}) \cdot dF \quad (1)$$

Jednocześnie bilansowa ilość dyfundującego składnika:

$$d\dot{n}_A = -\dot{n}_g \cdot dy_A \quad (2)$$

Z porównania równań (1) i (2) otrzymujemy równanie różniczkowe procesu w postaci:

$$\beta'_{Ag} \cdot (y_A - y_{Az}) \cdot dF = -\dot{n}_g \cdot dy_A \quad (3)$$

Po rozdzieleniu zmiennych, równanie to przyjmuje postać:

$$\frac{\beta'_{Ag}}{\dot{n}_g} dF = -\frac{dy_A}{y_A - y_{Az}} \quad (4)$$

Ponieważ molowe natężenie przepływu gazu opisane jest zależnością:

$$\dot{n}_g = \frac{f \cdot w_g \cdot \rho_g}{M_g} \quad (5)$$

to po podstawieniu powyższej zależności do równania (4) otrzymujemy:

$$\frac{\beta'_{Ag} \cdot M_g}{f \cdot w_g \cdot \rho_g} dF = -\frac{dy_A}{y_A - y_{Az}} \quad (6)$$

Równanie to można rozwiązać przez całkowanie, przyjmując następującą zmienność parametrów w przekrojach kontrolnych strefy absorpcyjnej:

- powierzchnia międzyfazowa  $F \in (0...F)$
- udział molowy składnika A  $y_A \in (y_{A1}...y_{A2})$

Pozostałe parametry tj.  $\beta'_{Ag}$ ,  $M_g$ ,  $w_g$ ,  $f$ ,  $\rho_g$ , szczególnie dla przypadku małych stężeń i procesu izotermicznego i izobarycznego, można przyjąć jako stałe i wtedy równanie (6) przyjmuje postać:

$$\frac{\beta'_{Ag} \cdot M_g}{f \cdot w_g \cdot \rho_g} \int_0^F dF = - \int_{y_{A1}}^{y_{A2}} \frac{dy_A}{y_A - y_{Az}} \quad (7)$$

Dla ogólnego przypadku ruchu masy w obecności inertów i dla małych stężeń składnika A, całkę z prawej strony równania (7) rozwiązuje się następująco, [9]:

$$N_{og} = - \int_{y_{A1}}^{y_{A2}} \frac{dy}{y_A - y_{Az}} = \frac{y_{A1} - y_{A2}}{\Delta y_{A1} - \Delta y_{A2}} \ln \frac{\Delta y_{A1}}{\Delta y_{A2}} \quad (8)$$

gdzie różnica stężeń:

$$\Delta y = y_A - y_{Az}$$

W szczególności dla przypadku małych stężeń gazu i bardzo dobrej rozpuszczalności gazu w cieczy lub przypadku absorpcji z natychmiastową szybką reakcją chemiczną w fazie ciekłej, można przyjąć, że molowy udział równowagowy

$$y_{Az} \cong 0$$

W takim przypadku równanie (8) upraszcza się do postaci:

$$N_{og} = \ln \frac{\Delta y_{A1}}{\Delta y_{A2}} = \ln \frac{y_{A1}}{y_{A2}} \quad (9)$$

Wprowadzając definicyjne oznaczenie liczby Stanton'a oraz inwariantu powierzchni, to lewa strona równania (7) przyjmuje postać:

$$\frac{\beta'_{Ag} \cdot F \cdot M_g}{f \cdot w_g \cdot \rho_g} = St'_g \cdot \left( \frac{F}{f} \right) = St_g^* \quad (10)$$

Z równań (8) i (9), dla przypadku zaniku oporu dyfuzyjnego w fazie ciekłej otrzymuje się:

$$St_g^* = \ln \frac{y_{A1}}{y_{A2}} \quad (11)$$

Równanie (11) można przekształcić do definicyjnego zapisu skuteczności procesowej. Zatem skuteczność procesu absorpcji może być zapisana jako:

$$\eta = \frac{y_{A1} - y_{A2}}{y_{A1}} = 1 - e^{-St_g^*} \quad (12)$$



Tak więc przy spełnieniu warunku  $y_{Az} \cong 0$ , przy założeniu modelu skuteczności procesu wymiany masy, można się posłużyć związkiem:

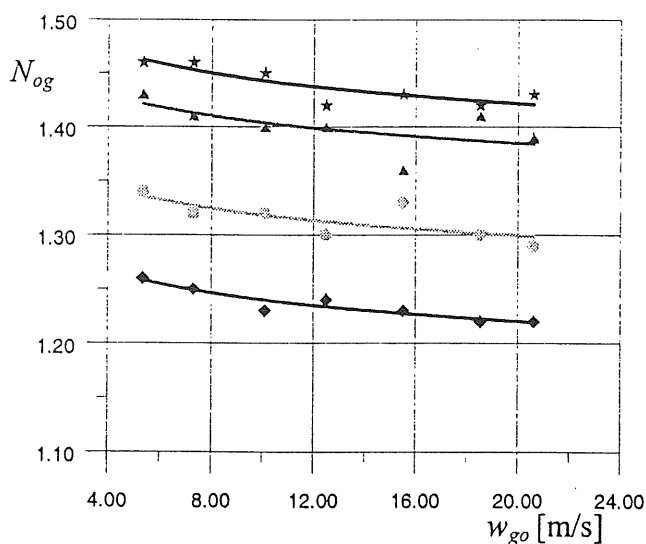
$$N_{og} = \ln \frac{y_{A1}}{y_{A2}} = St_g^* = \ln \frac{1}{1-\eta} \quad (13)$$

Równanie korelacyjne wyrażające iloczyn modułów  $St_g^* \cdot (F/f)$ , interpretujący wpływ parametrów fizykochemicznych na proces wymiany masy oraz generowaną powierzchnię międzyfazową, opisano za pomocą następującego równania szczegółowego:

$$St_g^* = \frac{Sh}{Re_g \cdot Sc_g} \cdot \left(\frac{F}{f}\right) = x_1 \cdot Re_g^{x_2} \cdot Sc_g^{x_3} \cdot Lp^{x_4} \cdot We^{x_5} \cdot \left(\frac{\dot{g}_c}{\dot{g}_g}\right)^{x_6} \cdot \left(\frac{n}{n_o}\right)^{x_7} \quad (14)$$

#### 4. GRAFICZNA ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ.

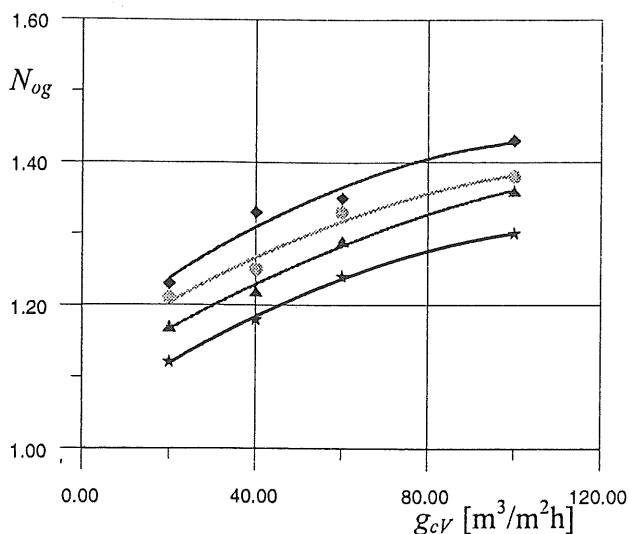
Na rys.5...10 przedstawiono wpływ wybranych parametrów na proces wymiany masy reprezentowany wartością  $N_{og}$ , oraz na wielkość oporów przepływu dla kolumny dyspersyjnej i kolumny barbotażowej. Z analizy wykresów wynika, że zarówno dla kolumny barbotażowej jak i dyspersyjnej, liczba jednostek przenikania masy rośnie ze zmniejszeniem prędkości gazu, zmniejszeniem szerokości szczeliny oraz ze wzrostem objętościowej gęstości zraszania. Należy również zwrócić uwagę, że w przebadanym zakresie zmian parametrów procesowych, wartości liczbowe  $N_{og}$  są wyższe w przypadku absorpcji w kolumnie barbotażowej, co świadczy o intensywniejszym przebiegu procesu wymiany masy.



#### Kolumna dyspersyjna

**Rys.5.** Wykres liczby jednostek przenikania masy w funkcji prędkości przepływu gazu przy zmiennej objętościowej gęstości zraszania; szerokość szczeliny  $s=1 \text{ mm}$ , udział amoniaku w gazie  $y_w=0,3 \text{ \%obj.}$

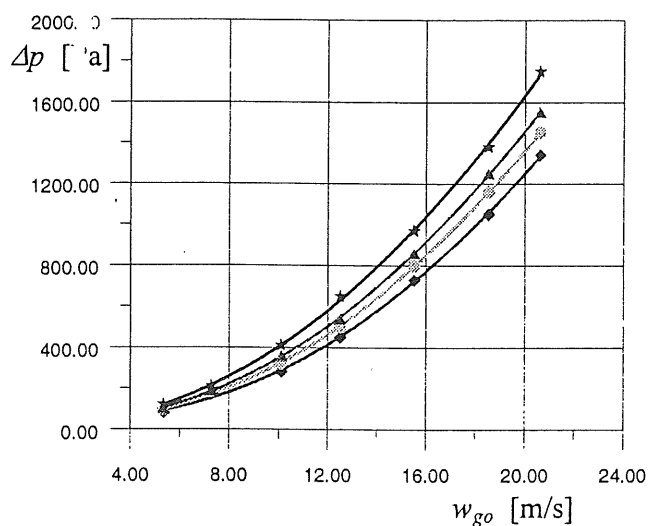
- ◆ ◆ ◆ ◆  $20 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$
- ◊ ◊ ◊ ◊  $40 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$
- ▲ ▲ ▲ ▲  $60 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$
- ★ ★ ★ ★  $100 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$



### Kolumna dyspersyjna

**Rys.6.** Wykres liczby jednostek przenikania masy w funkcji objętościowej gęstości zraszania przy zmiennej szerokości szczeliny; prędkość gazu  $w_{go}=15,6$  m/s, udział amoniaku w gazie  $y_w=0,3$  %obj.,

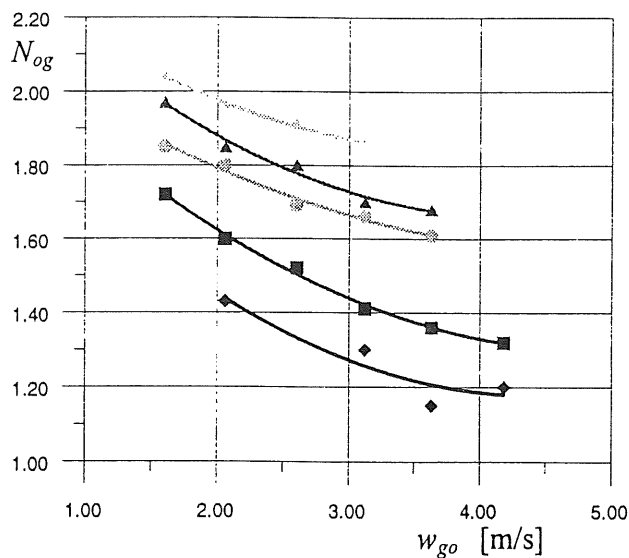
- ◆ ◆ ◆ ◆  $s=1$  mm
- ● ● ●  $s=2$  mm
- ▲ ▲ ▲ ▲  $s=3$  mm
- ★ ★ ★ ★  $s=4$  mm



### Kolumna dyspersyjna

**Rys.7.** Wykres oporów przepływu w funkcji prędkości przepływu gazu przy zmiennej objętościowej gęstości zraszania; szerokość szczeliny  $s=3$  mm, udział amoniaku w gazie  $y_w=0,3$  %obj.,

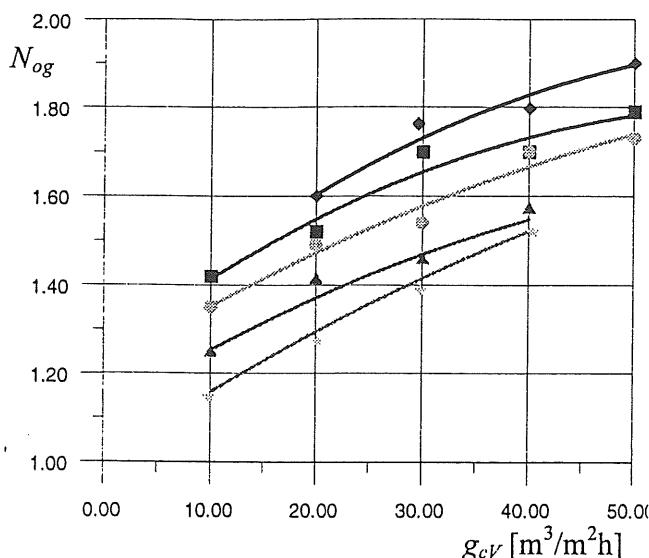
- ◆ ◆ ◆ ◆  $20 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$
- ● ● ●  $40 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$
- ▲ ▲ ▲ ▲  $60 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$
- ★ ★ ★ ★  $100 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$



### Kolumna barbotażowa

**Rys.8.** Wykres liczby jednostek przenikania masy w funkcji prędkości przepływu gazu przy zmiennej objętościowej gęstości zraszania; szerokość szczeliny  $s=3,5$  mm, udział amoniaku w gazie  $y_w=0,6$  %obj., liczba warstw  $n=4$ ,

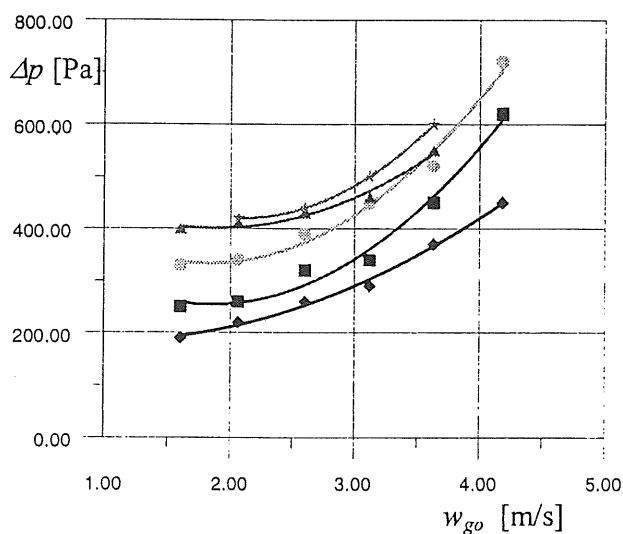
- ◆ ◆ ◆ ◆  $10 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$
- ■ ■ ■  $20 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$
- ● ● ●  $30 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$
- ▲ ▲ ▲ ▲  $40 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$
- ★ ★ ★ ★  $50 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$



### Kolumna barbotażowa

**Rys.9.** Wykres liczby jednostek przenikania masy w funkcji objętościowej gęstości zraszania przy zmiennej prędkości gazu; szerokość szczeliny  $s=1,5$  mm, liczba warstw  $n=2$ , udział amoniaku w gazie  $y_w=0,4$  %obj.,

romb romb romb romb  $w_{go}=1,6$  m/s  
 kwadrat kwadrat kwadrat kwadrat  $w_{go}=2,06$  m/s  
 gwiazda gwiazda gwiazda gwiazda  $w_{go}=2,6$  m/s  
 trójkąt trójkąt trójkąt trójkąt  $w_{go}=3,12$  m/s  
 gwiazda gwiazda gwiazda gwiazda  $w_{go}=3,36$  m/s



### Kolumna barbotażowa

**Rys.10.** Wykres oporów przepływu w funkcji prędkości przepływu gazu przy zmiennej objętościowej gęstości zraszania; szerokość szczeliny  $s=3,5$  mm, liczba warstw  $n=4$ ,

romb romb romb romb  $10 m^3/m^2h$   
 kwadrat kwadrat kwadrat kwadrat  $20 m^3/m^2h$   
 gwiazda gwiazda gwiazda gwiazda  $30 m^3/m^2h$   
 trójkąt trójkąt trójkąt trójkąt  $40 m^3/m^2h$   
 gwiazda gwiazda gwiazda gwiazda  $50 m^3/m^2h$

## 5. WYRÓWNANIE WYNIKÓW BADAŃ

Celem wyrównania wyników jest wyznaczenie współczynników regresji równania kryterialnego (14) dla procesu wymiany masy przy współprądowym oraz przeciwprądowym przepływie mediów procesowych. W wyniku przeprowadzonego rachunku wyrównawczego stwierdzono, że wpływ liczby Laplace'a jest pomijalny, toteż ostatecznie wyniki badań wyrównano równaniem kryterialnym z wyeliminowaniem tej liczby. Uzyskano następujące równania korelacyjne.

**Proces absorpcji amoniaku w wodzie w kolumnie dyspersyjnej.** Przedmiotem wyrównania były wyniki laboratoryjnych badań absorpcji amoniaku w wodzie w układzie współprądowym z

zastosowaniem jednej warstwy wypełnienia komórkowego skośnego. Do wyrównania wykorzystano 240 równań obserwacyjnych. Uzyskano równanie korelacyjne w następującej postaci:

$$St_g^* = \frac{Sh}{Re_g \cdot Sc_g} \cdot \left(\frac{F}{f}\right) = 4,08 \cdot Re_g^{-0,2} \cdot Sc_g^{-0,67} \cdot We^{0,153} \cdot \left(\frac{\dot{g}_c}{\dot{g}_g}\right)^{0,11} \quad (15)$$

Średni błąd względny równania wynosi  $\pm 8,9\%$ .

Równanie obowiązuje dla następującego zakresu zmienności parametrów procesowych:

$$Re_g \in (1814 \dots 7129), \quad Sc_g \in (0,77 \dots 0,79), \quad \left(\frac{\dot{g}_c}{\dot{g}_g}\right) \in (0,462 \dots 4,345).$$

$$Lp \in (1,369 \cdot 10^5 \dots 4,792 \cdot 10^5), \quad We \in (0,855 \dots 46,16),$$

oraz dla  $n=1$  warstwy wypełnienia komórkowego skośnego.

### Proces absorpcji amoniaku w wodzie w kolumnie barbotażowej.

Przedmiotem wyrównania są wyniki laboratoryjnych badań absorbera przeciwprowadowego, zawierającego  $n \in (1 \dots 4)$  warstw wypełnienia komórkowego promieniowego oraz wyniki badań przemysłowych absorbera amoniaku z gazu koksowniczego. Do wyrównania wykorzystano 457 równań obserwacyjnych. Uzyskano równanie korelacyjne w następującej postaci:

$$St_g^* = \frac{Sh}{Re_g \cdot Sc_g} \cdot \left(\frac{F}{f}\right) = 3,72 \cdot Re_g^{-0,28} \cdot Sc_g^{-0,5} \cdot We^{0,136} \cdot \left(\frac{\dot{g}_c}{\dot{g}_g}\right)^{0,45} \cdot \left(\frac{n}{n_o}\right)^{0,118} \quad (16)$$

Średni błąd względny równania wynosi  $\pm 18,2\%$ .

Równanie obowiązuje dla następującego zakresu zmienności parametrów procesowych:

$$Re_g \in (593 \dots 2344), \quad Sc_g \in (0,78 \dots 0,81),$$

$$Lp \in (2,026 \cdot 10^5 \dots 5,261 \cdot 10^5), \quad We \in (0,241 \dots 2,45),$$

$$\left(\frac{\dot{g}_c}{\dot{g}_g}\right) \in (0,551 \dots 7,142), \quad \left(\frac{n}{n_o}\right) \in (1 \dots 4), \text{ gdzie: } n_o=1 \text{ warstwa.}$$

### 6. PODSUMOWANIE.

Przeprowadzone badania absorpcji amoniaku w wodzie we współprądowym i przeciwprowadowym przepływie mediów procesowych pozwoliły na opracowanie koncepcji nowego typu kolumny hybrydowej, która może być zastosowana w technologiach przemysłowych. Eksploatacja kolumn z wypełnieniem komórkowym

przewodzona jest przy wysokich wartościach czynnika przepływowego oraz objętościowej gęstości zraszania co oznacza możliwość znacznego zmniejszenia średnicy kolumn przemysłowych. Przeprowadzone badania laboratoryjne i przemysłowe wykazały dużą efektywność wypełnienia komórkowego, wyrażoną za pomocą sprawności procesu, wg równania:

$$\eta = \frac{y_{A1} - y_{A2}}{y_{A1} - y_{Az}} = 1 - \exp \left[ -St'_g \cdot \left( \frac{F}{f} \right) \right]$$

W przeprowadzonych badaniach dotyczących absorpcji amoniaku przy niskim udziale molowym  $y_{NH_3} \leq 0,01$  kmol  $NH_3$ /kmol, sprawność procesu wynosiła:

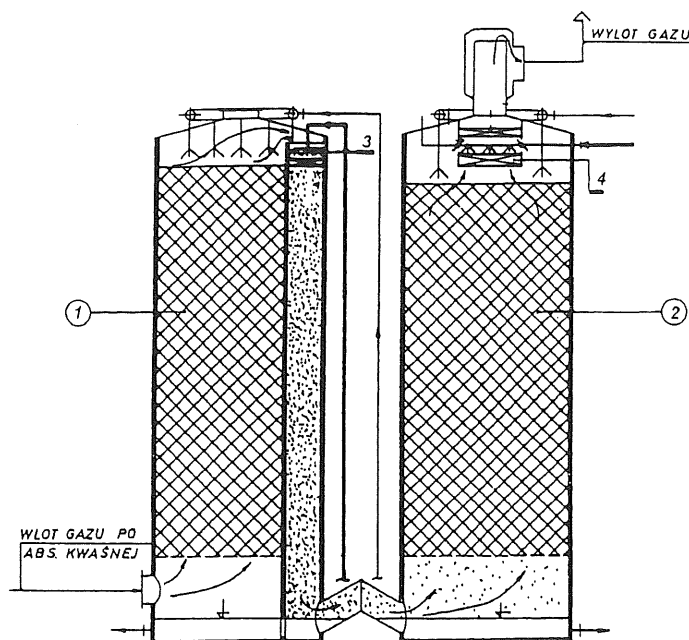
- dla reżimu dyspersyjnego:  $\eta \in (0,67...0,82)$ ,
- dla reżimu barbotażowego:  $\eta \in (0,55...0,89)$ .

Podkreślić należy, że efekt taki jest osiągalny przy zastosowaniu maksymalnie czterech warstw wypełnienia komórkowego. Wg danych literaturowych [4], dla absorpcji amoniaku w wodzie, sprawność absorpcji w wielopółkowej kolumnie dzwonkowej wynosi:  $\eta \in (0,69...0,92)$ . Wynika z tego, że kolumna z wypełnieniem komórkowym pozwala na osiągnięcie podobnego efektu procesowego, przy znacznie zmniejszonych gabarytach.

Przeprowadzone badania procesowe pozwoliły na opracowanie równań kryterialnych dla procesu współprądowej i przeciwprądowej absorpcji amoniaku. Równania te mogą być podstawą algorytmu projektowego. Wyniki badań były podstawą kilku przemysłowych wdrożeń absorpcyjnej kolumny hybrydowej. Uzyskane równania kryterialne posłużyły do zaprojektowania i oceny pracy absorbera amoniaku z gazów odlotowych instalacji klejów i mocznika Z.A. "Kędzierzyn" [3]. Opracowano również koncepcję kompleksowej redukcji emisji amoniaku z instalacji klejów i mocznika. Wyniki obliczeń potwierdziły możliwość stosowania otrzymanych równań do obliczeń przemysłowych, a także potwierdziły prawidłowość założenia zaniku oporów wnikania masy po stronie cieczy w przypadku absorpcji amoniaku przy jego niskich stężeniach wlotowych  $< 1\%$  obj.

Koncepcję kolumny współprądowo-przeciwprądowej wykorzystano także do modernizacji węzła alkalicznej absorpcji  $NO_x$  na instalacji azotanu i azotynu sodowego w Z.A. "Kędzierzyn".

Węzeł absorpcyjny o wydajności  $75000 \text{ Nm}^3/\text{h}$  składał się z dwóch kolumn wypełnionych pierścieniami Raschiga: średnica kolumny  $D_k=8,5 \text{ m}$ , przekrój kolumny  $f=56,7 \text{ m}^2$ , wysokość wypełnienia  $H_w=22$



Rys.11. Schemat zmodernizowanego węzła alkalicznej absorpcji  $\text{NO}_x$

m, wysokość kolumny  $H_k=32$  m. Modernizacja (rys.11) polegała na zainstalowaniu w kanale przelotowym wieży absorpcyjnej (poz.1) o przekroju  $2,7 \text{ m}^2$  - układu dyspersyjnego (poz.3) składającego się z jednej warstwy wypełnienia komórkowego, oraz na wylocie z wieży absorpcyjnej (poz.2) - układu barbotażowego (poz.4) o przekroju  $6,25 \text{ m}^2$ , składającego się z czterech warstw wypełnienia komórkowego. Dzięki zastosowaniu układu hybrydowego emisja  $\text{NO}_x$  została obniżona z ok. 2500 ppm do wartości (550...800) ppm.

Hybrydowy układ dyspersyjno-barbotażowy wykorzystany został również do absorpcji benzolu z gazu koksowniczego w oleju płuczkowym w Kombinacie Koksochemicznym „Zabrze”. Zastosowanie kolumny pozwoliło na obniżenie zawartości benzolu w gazie z  $33 \text{ g/Nm}^3$  do  $2,5 \text{ g/Nm}^3$ .

Aparat hybrydowy jako jednostka zunifikowana może być stosowany również w innych technologiach [8], zastępując bądź uzupełniając istniejące węzły absorpcyjne, zapewniając jednocześnie poprawę absorpcji z punktu widzenia kryteriów techniczno-ekonomicznych oraz postulatów ekologicznych.

## WYKAZ STOSOWANYCH OZNACZEŃ

$b$	m	- szerokość komórki wypełnienia komórkowego
$C$	$\text{kg/m}^3$	- koncentracja
$D, d$	m	- średnica
$d_e$	m	- średnica ekwiwalentna

$f$	$m^2$	- powierzchnia przekroju poprzecznego kolumny
$F$	$m^2$	- powierzchnia międzyfazowa
$F$	$m/s \cdot (kg/m^3)^{0,5}$	- czynnik przepływu
$\dot{g}_g$	$kg/m^2s$	- prędkość masowa gazu
$\dot{g}_c$	$kg/m^2s$	- prędkość masowa cieczy
$\dot{g}_{cv}$	$m^3/m^2s$	- objętościowa gęstość zraszania
$h$	$m$	- wysokość komórki wypełnienia komórkowego
$H$	$m$	- wysokość
$M$	$kg/kmol$	- masa molowa
$n$	-	- liczba warstw wypełnienia komórkowego
$\dot{n}$	$kmol/s$	- strumień molowy
$N_{og}$	-	- liczba jednostek przenikania masy
$\Delta p$	$Pa$	- spadek ciśnienia w kolumnie
$s$	$m$	- szerokość szczeliny wypełnienia komórkowego
$w_c$	$m/s$	- prędkość cieczy
$w_g$	$m/s$	- prędkość gazu
$w_{go}$	$m/s$	- prędkość gazu liczona na pusty przekrój kolumny
$\dot{V}$	$m^3/s$	- objętościowe natężenie przepływu
$y_A$	$kmolA/kmol$	- udział molowy składnika w fazie gazowej

### Symbole greckie

$\beta'_A$	$kmol/m^2s$	- współczynnik wnikania masy
$\rho$	$kg/m^3$	- gęstość
$\sigma$	$N/m$	- napięcie powierzchniowe
$\eta$	$Pa \cdot s$	- dynamiczny współczynnik lepkości
$\eta$	-	- sprawność procesu
$\delta'_A$	$kmol/m \cdot s$	- dynamiczny współczynnik dyfuzji

### Indeksy

$A, B, C...$	- odnoszą się do składników A,B,C....
$g$	- dotyczy fazy gazowej
$c$	- dotyczy fazy ciekłej
$e$	- odnosi się do wartości zastępczej
$o$	- odnosi się do wartości standardowej
$p, 1, wI$	- odnosi się do warunków początkowych
$k, 2, wyl$	- odnosi się do warunków końcowych
$z$	- odnosi się do zwierciadła
$*$	- odnosi się do wartości równowagowej

### Moduły podobieństwa (Liczby kryterialne)

$$Re_g = \frac{w_g \cdot d_e \cdot \rho_g}{\eta_g} \quad - \text{liczba Reynoldsa}$$

$$Sc_g = \frac{\eta_g}{\rho_g \cdot D_A} = \frac{m \cdot \eta}{\delta_A} \quad - \text{liczba Schmidta}$$

$$Lp = \frac{\rho_c \cdot \sigma_c \cdot d_e}{\eta_c^2} \quad - \text{liczba Laplacea}$$

$$We = \frac{\rho_g \cdot w_g^2 \cdot d_e}{\sigma_c} \quad - \text{liczba Webera}$$

$$St'_g = \frac{Sh}{Re \cdot Sc} = \frac{\beta_A}{w_g \cdot \rho_g} \quad - \text{liczba Stanton}$$

$$St_g^* = St'_g \left( \frac{F}{f} \right) \quad - \text{zmodyfikowana liczba Stanton}$$

$$\left( \frac{F}{f} \right) \quad - \text{simpleks powierzchni międzyfazowej i przepływowej}$$

$$\left( \frac{n}{n_o} \right) \quad - \text{simpleks ilości warstw wypełnienia}$$

$$\left( \frac{\dot{g}_c}{\dot{g}_g} \right) \quad - \text{simpleks prędkości masowych cieczy i gazu}$$

## LITERATURA

- [1] Hehlmann J.: *"Badania procesowe aparatu kolumnowego z wypełnieniem komórkowym"*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Zeszyt 125, Gliwice (1991),
- [2] Kohl. A. L., Riesenfeld F.C.: *"Oczyszczanie gazu"*, WNT, Warszawa (1965),
- [3] Hehlmann J., Kiraga K., Piotrowski J., Zowade J., Nowak W.: *"Chemisorpacja amoniaku z gazów odlotowych instalacji klejów i mocznika"*, Materiały II Kongresu Technologii Chemicznej, Wrocław (1997),
- [4] Ramm W. M.: *"Procesy absorpcyjne w przemyśle chemicznym"*, PWT, Warszawa (1956),
- [5] Рамм В. М.: *"Абсорбция газов"*, Москва (1969),
- [6] Sherwood T.K., Pigford R.L.: *"Absorption and Extraction"*, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York (1952),
- [7] Hobler T.: *"Dyfuzyjny ruch masy i absorber"*, WNT, Warszawa (1976),
- [8] Hehlmann J., Kiraga K.: *"Możliwości modernizacji kolumn absorpcyjnych na podstawie procesów przemysłu sodowego"*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna nr4, 9-14, (1994),
- [9] Bennet C.O., Myers J.E.: *"Przenoszenie pędu, ciepła i masy"*, WNT Warszawa (1967),

Temat finansowany w ramach grantu promotorskiego KNB nr 3 T09C 055 16