

Wykład 8

Wymiana masy

Wymienniki masy

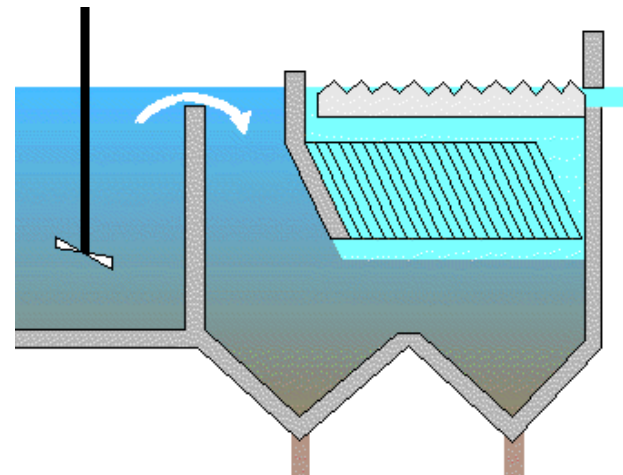
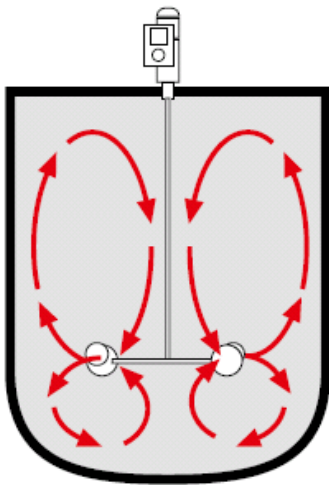
Wymienniki masy są to aparaty, w których dochodzi do **międzyfazowego transportu substancji** lub mówiąc inaczej do **międzyfazowej wymiany masy**.

- a) Wytworzenie układu dwufazowego.
- b) Skontaktowanie faz na jak największej powierzchni.
- c) Wymiana masy między fazami (dyfuzja lub dyfuzja burzliwa).
- d) Rozdzielenie faz o **zmienionym** składzie.

Jak wykonać te czynności?

Wymienniki masy

Jak wykonać te czynności?



Wymienniki masy

- **Aparaty stopniowane** (o działaniu okresowym, kontakt faz zachodzi skokowo) lub
- **aparaty o działaniu ciągłym.**

W aparatach stopniowanych jedna z faz może być nieruchoma, a druga może przepływać przez aparat.

Gdy obie fazy są w przepływie, to wyróżnia się przepływ **przeciwprądowy** lub **krzyżowy**.

Specyficznymi wymiennikami masy są aparaty, do których dostarcza się jedną fazę, a wskutek **doprowadzania ciepła** wytwarzają się **dwie fazy**, pomiędzy którymi następuje wymiana jednego lub kilku składników mieszaniny (surowca).

Wymienniki masy

W aparatach o działaniu ciągłym wyróżnia się przepływ **przeciwprądowy** lub rzadziej **współprądowy**.

Aparaty przyjmują kształt **kolumn**.

Rodzaje kolumn:

1. kolumny, w których fazy kontaktują się okresowo **na półkach** lub **w przestrzeniach międzypółkowych**,
2. kolumny **niezabudowane**, albo kolumny z **usypanym lub strukturalnym wypełnieniem** umożliwiającym ciągły (nieprzerwany) kontakt faz.

Wymienniki masy

Podczas projektowania kolumn półki, czyli stopnie, należy traktować jako pewne fragmenty aparatu, w których dochodzi do przemieszania, a następnie rozdzielenia opuszczających je faz.

Jeśli na półce osiągnany jest stan równowagi międzyfazowej w strumieniach wypływających z tej półki, to nazywa się ją półką teoretyczną.

Wymienniki masy

Jak projektować wysokość kolumny?

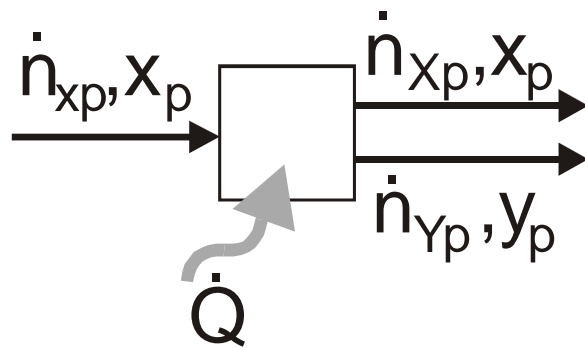
Wielokrotny kontakt faz na kolejnych półkach pozwala uzyskać lepszy efekt wymiany masy (efekt rozdziału substancji). Z tego powodu **głównym celem projektowania półkowego wymiennika masy** jest wyznaczenie (obliczenie) **liczby stopni teoretycznych** koniecznych do uzyskania założonej zmiany stężeń w danej fazie (założonego efektu rozdziału), a następnie, dla danej sprawności aparatu, obliczenie liczby półek rzeczywistych. Znając liczbę półek rzeczywistych i odstęp między nimi oblicza się wysokość kolumny.

W **aparatach kolumnowych o ciągłym kontakcie faz** wysokość kolumny oblicza się odmiennie. Należy obliczyć **pole powierzchni styku faz** w całym aparacie i z tej wielkości wyznaczyć wysokość kolumny.

Wymienniki masy

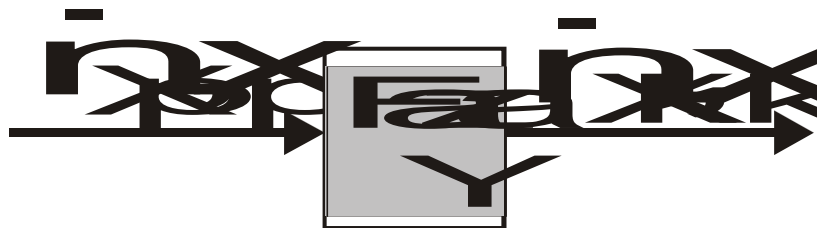
Schematy **wymienników** masy i sposobów **przepływu strumieni**

Aparaty stopniowane z jedną fazą na wlocie:



Czynnikiem roboczym
jest energia cieplna

Aparaty stopniowane z dwiema fazami na wlocie:

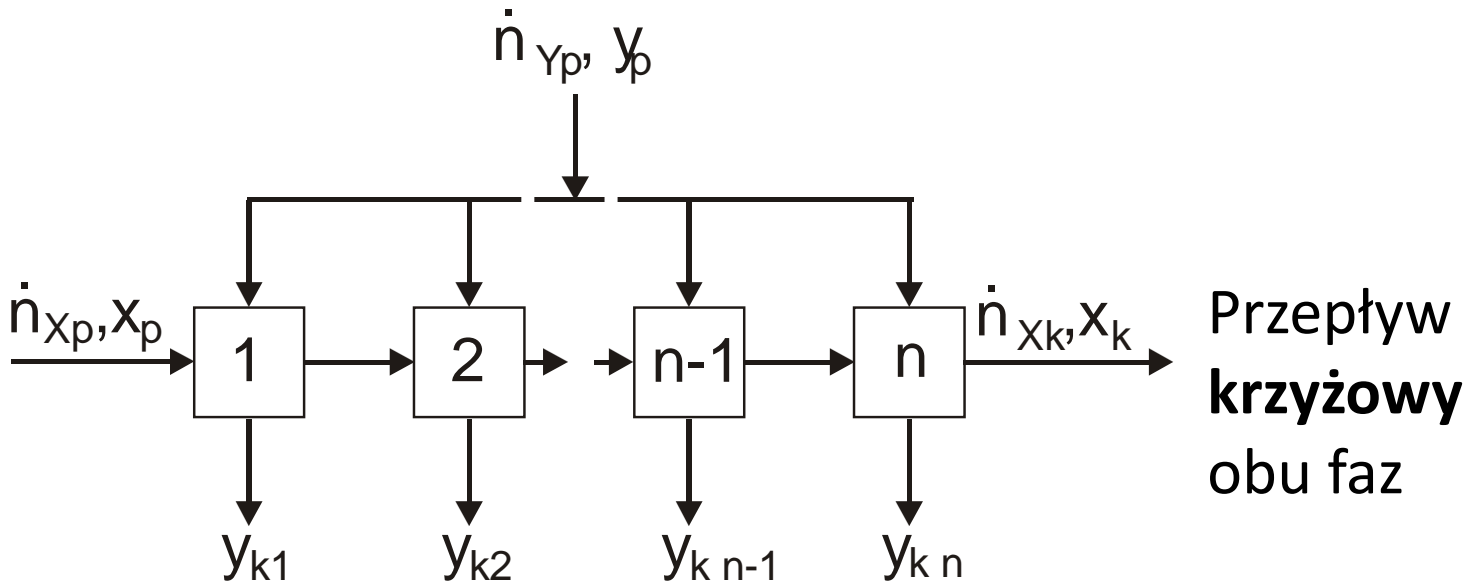
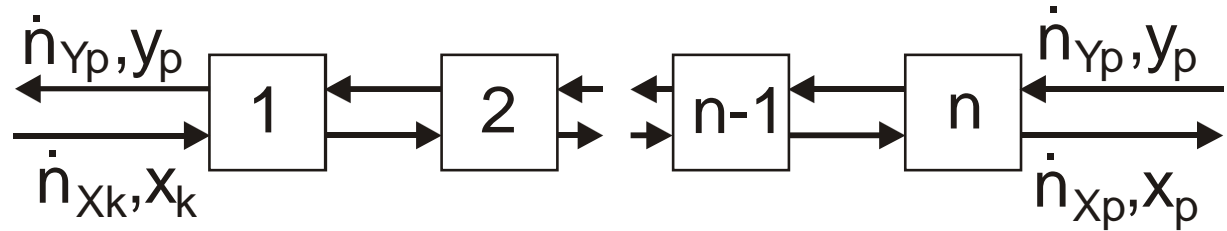


Faza robocza nieruchoma

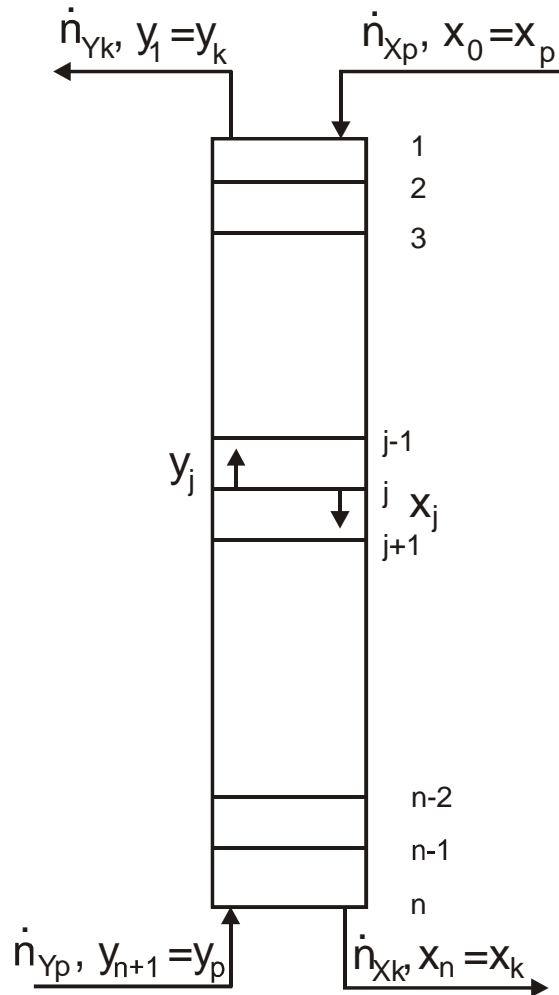
Wymienniki masy

Aparaty stopniowane z dwiema fazami na wlocie c.d.

Przepływ
przeciwnąrowy
obu faz



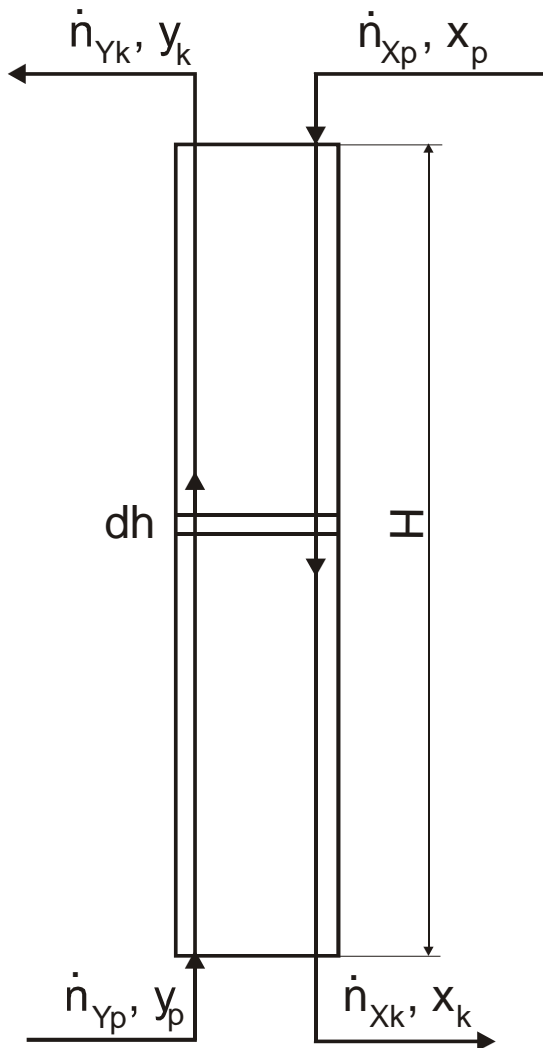
Wymienniki masy



Aparaty kolumnowe

Przeciwprądowa kolumna półkowa z przerywanym kontaktem faz fazy mieszają się na półkach, a w przestrzeniach międzypółkowych przepływają obok siebie

Wymienniki masy



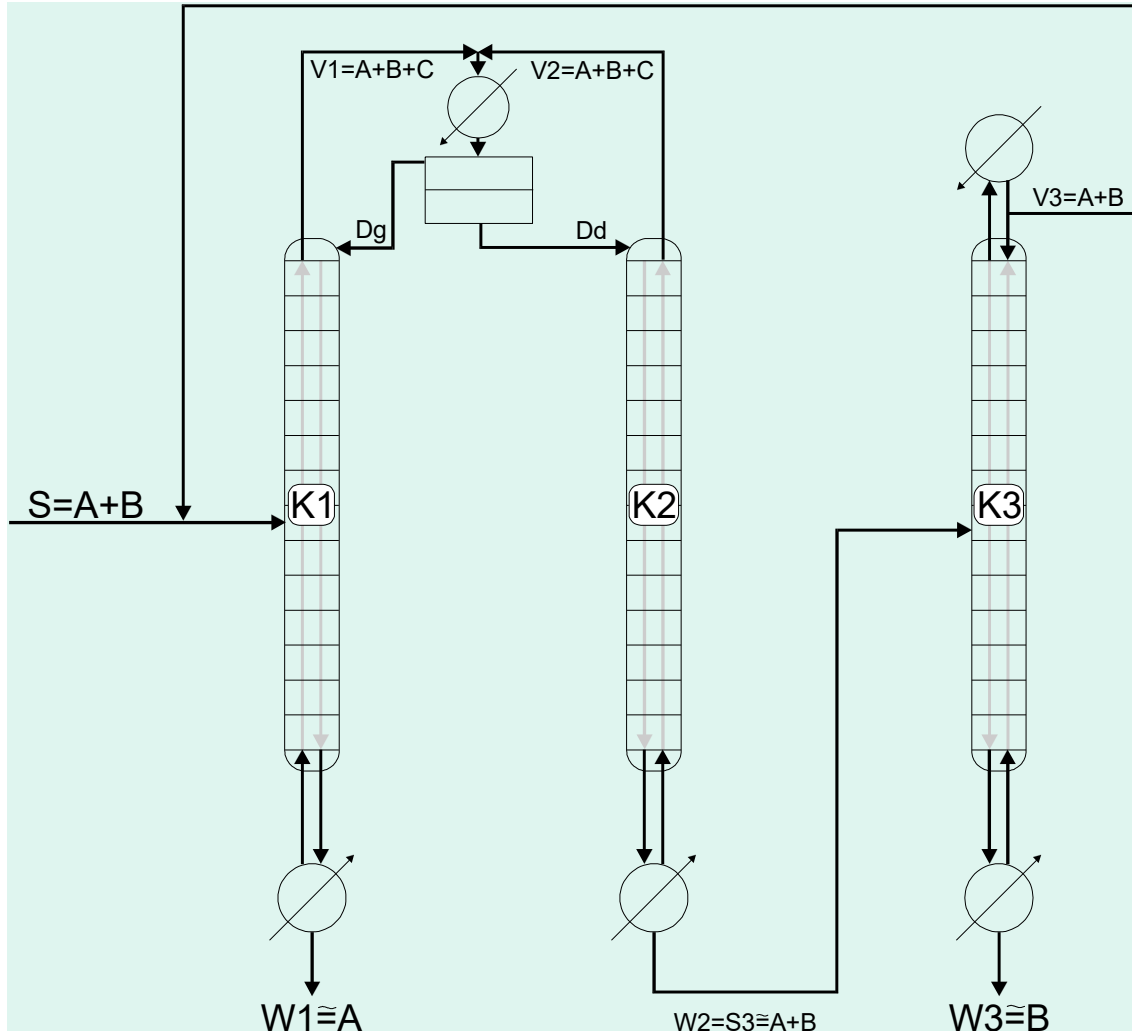
Aparaty kolumnowe c.d.

Przeciwnieprądowa kolumna pusta
lub wypełniona
o ciągłym kontakcie faz
(na całej wysokości roboczej
fazy płyną obok siebie)

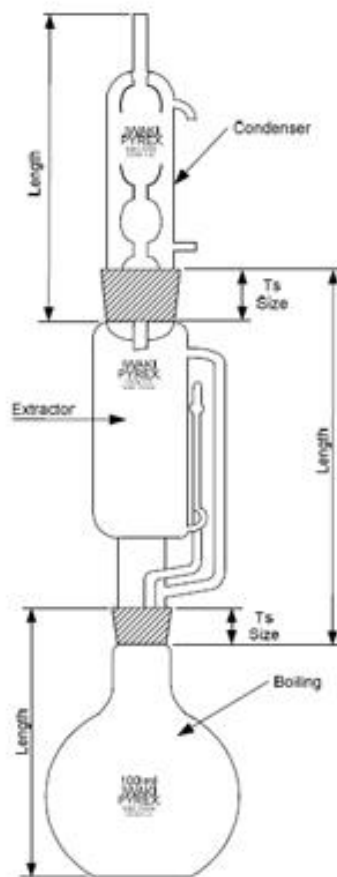
Często spotyka się kolumny, do których **dopływa jedna faza**, a wskutek doprowadzania ciepła **wytwarzają się dwie fazy**, pomiędzy którymi następuje wymiana masy – jak na przykład w kolumnach rektyfikacyjnych.

Wymienniki masy

Aparaty kolumnowe c.d.



Jednostopniowy wymiennik masy



Jednostopniowy wymiennik masy

FAZA **X**

FAZA **Y**

\dot{n}_X [kmol / s]

\dot{n}_Y [kmol / s]

X_A

X

y_A

y

lub dla prostoty zapisu

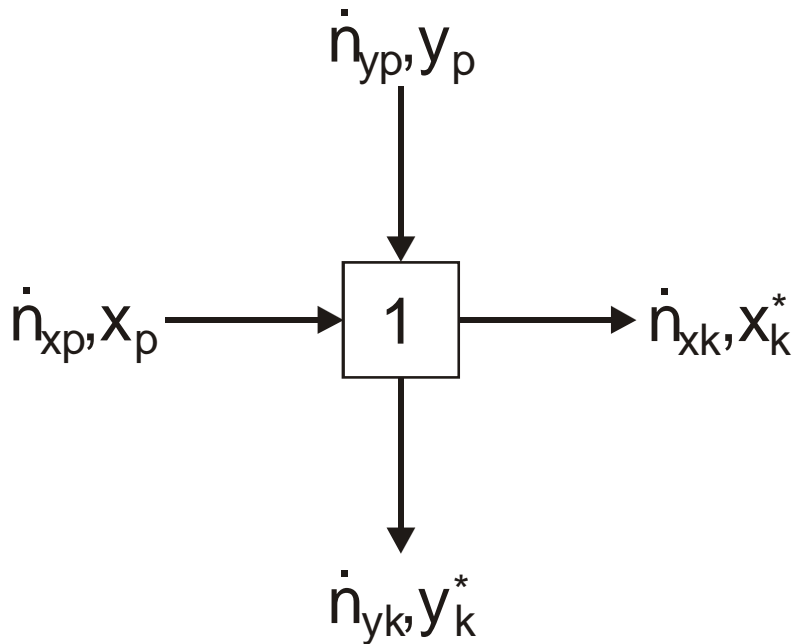
lub dla prostoty zapisu

Równowaga międzyfazowa:

$$y = m x$$

$$y^* = m x^*$$

Jednostopniowy wymiennik masy



Bilans ogólny wymiennika:

$$\dot{n}_{Xp} + \dot{n}_{Yp} = \dot{n}_{Xk} + \dot{n}_{Yk}$$

Bilans składnika przenikającego pomiędzy fazami:

$$\dot{n}_{Xp} x_p + \dot{n}_{Yp} y_p = \dot{n}_{Xk} x_k^* + \dot{n}_{Yk} y_k^*$$

- dla małych stężeń

$$\dot{n}_{Xp} = \dot{n}_{Xk} = \dot{n}_X$$

$$\dot{n}_{Yp} = \dot{n}_{Yk} = \dot{n}_Y$$

Jednostopniowy wymiennik masy

Bilans składnika $\dot{n}_X (x_p - x_k^*) = \dot{n}_Y (y_k^* - y_p)$

Stosunek strumieni faz $\frac{\dot{n}_X}{\dot{n}_Y} = \frac{y_k^* - y_p}{x_p - x_k^*}$

Końcowe równowagowe stężenie w fazie Y

$$y_k^* = \frac{\dot{n}_X}{\dot{n}_Y} (x_p - x_k^*) + y_p$$

Jednostopniowy wymiennik masy

Dwa przypadki wymiany masy pomiędzy fazami X i Y

Jeśli $x_k^* > x_p$, oraz $y_p > y_k^*$
wymiana masy z fazy Y do fazy X

Absorpcja

Jeśli $x_k^* < x_p$, oraz $y_p < y_k^*$
wymiana masy z fazy X do fazy Y

Desorpcja

Jednostopniowy wymiennik masy

Jeśli w wymienniku
nie jest osiągnany stan równowagi międzyfazowej

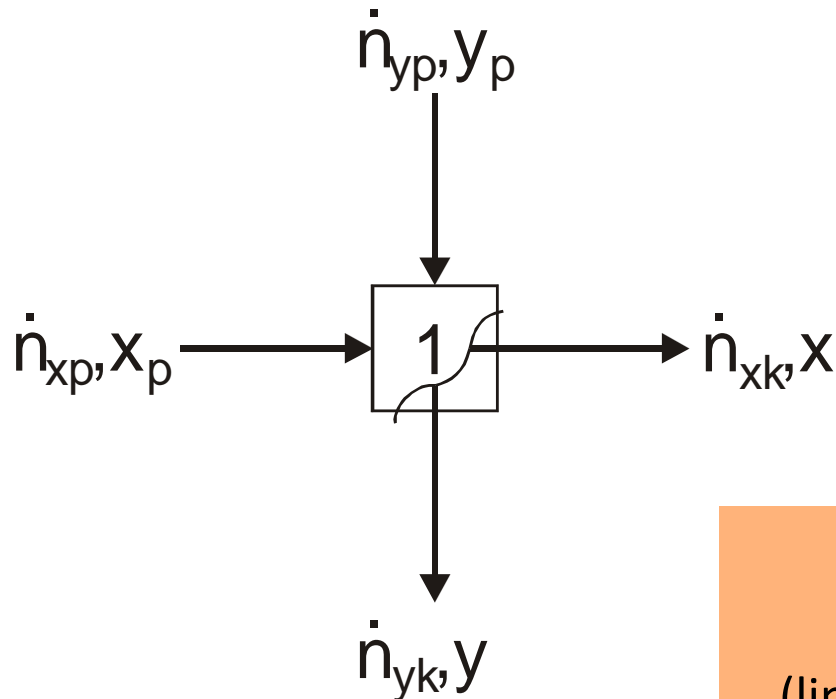
to równanie opisujące stężenie końcowe w fazie Y
można zapisać w postaci:

$$y_k = -\frac{\dot{n}_x}{\dot{n}_y} x_k + \frac{\dot{n}_x}{\dot{n}_y} x_p + y_p$$

Jednostopniowy wymiennik masy

Równanie dla dowolnych wartości stężeń wewnątrz aparatu:

- znamy stan początkowy mieszaniny poddawanej oczyszczaniu oraz stan początkowy strumienia roboczego,
- stan końcowy jest wybrany dowolnie.



Zbilansowanie tego
wybranego fragmentu
aparatu

daje zależność:

$$y = -\frac{\dot{n}_x}{\dot{n}_y} x + \frac{\dot{n}_x}{\dot{n}_y} x_p + y_p$$

Równanie to nazywa się

linią operacyjną

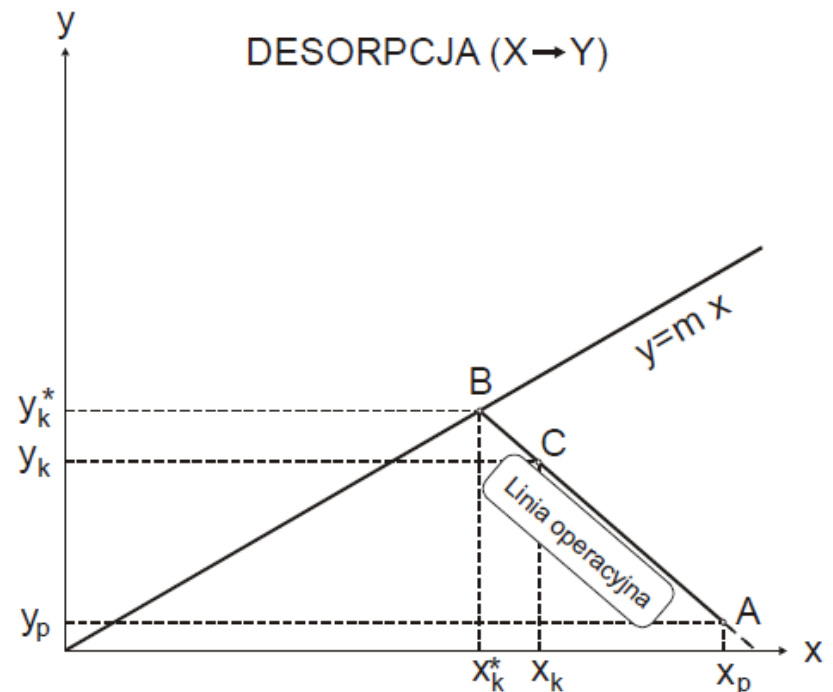
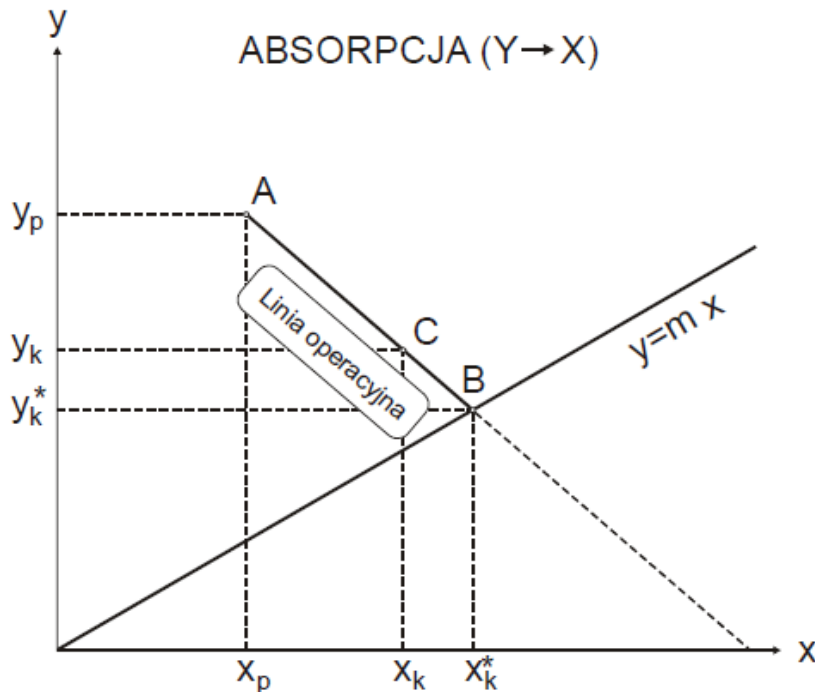
(linią procesową lub rzadziej linią ruchową)

Jednostopniowy wymiennik masy

$$y = -\frac{\dot{n}_x}{\dot{n}_y} x + \frac{\dot{n}_x}{\dot{n}_y} x_p + y_p$$

Graficzna interpretacja
równania linii operacyjnej

Należy przedstawić tę linię w obecności zależności równowagowej



Jednostopniowy wymiennik masy

Proces na drodze AB kończy się na linii równowagi, co oznacza, że uzyskano zmianę stężeń odpowiadającą stopniowi równowagowemu, czyli stopniowi teoretycznemu.

Proces na drodze AC kończy się przy pewnych stężeniach odmiennych od stanu równowagi

Absorpcja

$$E_x = \frac{X_k - X_p}{X_k^* - X_p}$$

$$E_y = \frac{y_p - y_k}{y_p - y_k^*}$$

Sprawność stopnia

Desorpcja

$$E_x = \frac{X_p - X_k}{X_p - X_k^*}$$

$$E_y = \frac{y_k - y_p}{y_k^* - y_p}$$

Dla małych wartości ułamków molowych

Jednostopniowy wymiennik masy

Co zrobić, gdy stężenia w układzie są duże?

Stężenia w fazie X

stosunki molowe

Stężenia w fazie Y

$$X = \frac{x}{1-x} \left[\frac{\text{kmol A}}{\text{kmol in}} \right]$$

$$Y = \frac{y}{1-y} \left[\frac{\text{kmol A}}{\text{kmol in}} \right]$$

$$x = \frac{X}{1+X} \left[\frac{\text{kmol A}}{\text{kmol A} + \text{kmol B}} \right]$$

$$y = \frac{Y}{1+Y} \left[\frac{\text{kmol A}}{\text{kmol A} + \text{kmol B}} \right]$$

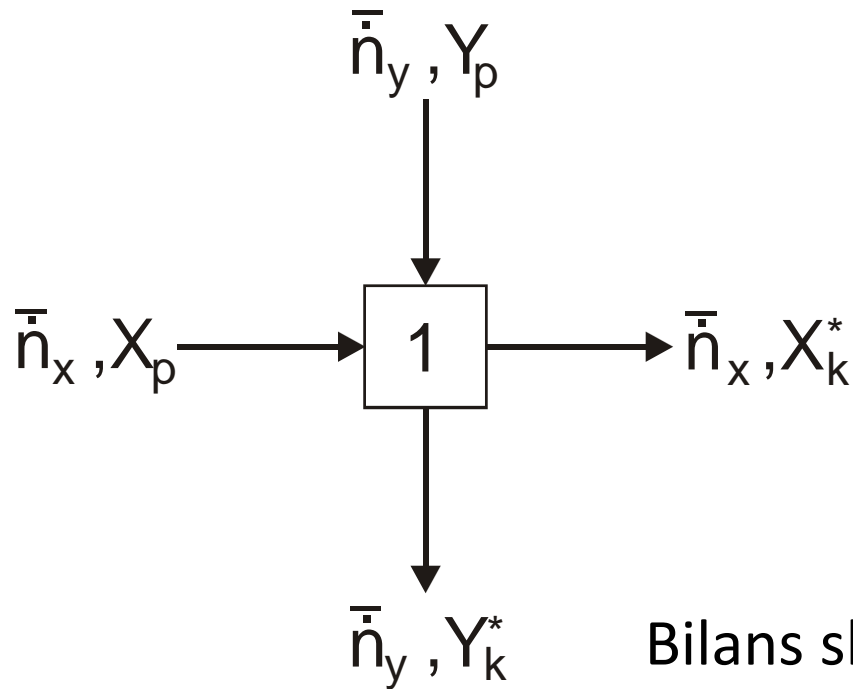
Strumienie inertów

$$\dot{n}_x \left[\frac{\text{kmol inertu zawartego w fazie X}}{s} \right]$$

$$\dot{n}_y \left[\frac{\text{kmol inertu zawartego w fazie Y}}{s} \right]$$

Jednostopniowy wymiennik masy

Dla dużych stężeń



Bilans składnika **bez żadnych uproszczeń**

$$\bar{n}_x (X_p - X_k^*) = \bar{n}_y (Y_k^* - Y_p)$$

Jednostopniowy wymiennik masy

Dla dużych stężeń

Dla małych stężeń

$$y = -\frac{\dot{n}_x}{\dot{n}_y} x + \frac{\dot{n}_x}{\dot{n}_y} x_p + y_p$$

Dla dowolnych stężeń (i małych i dużych)

$$Y = -\frac{\bar{\dot{n}}_X}{\bar{\dot{n}}_Y} X + \frac{\bar{\dot{n}}_X}{\bar{\dot{n}}_Y} X_p + Y_p$$

Jednostopniowy wymiennik masy

Dla dużych stężeń

Sprawność stopnia

Absorpcja

$$E_x = \frac{X_k - X_p}{X_k^* - X_p}$$

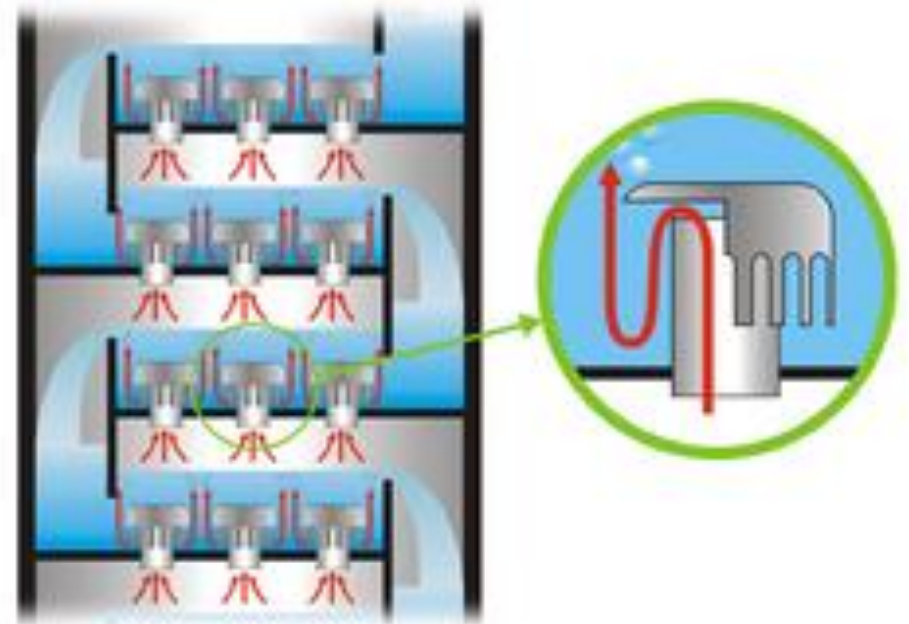
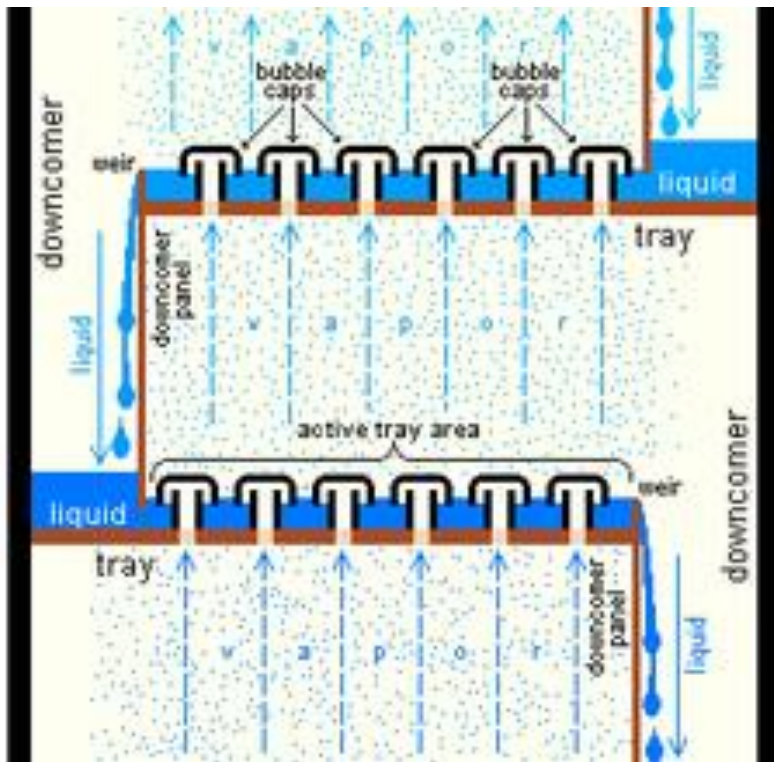
$$E_y = \frac{Y_p - Y_k}{Y_p - Y_k^*}$$

Desorpcja

$$E_x = \frac{X_p - X_k}{X_p - X_k^*}$$

$$E_y = \frac{Y_k - Y_p}{Y_k^* - Y_p}$$

Wielostopniowe wymienniki masy



Wielostopniowe wymienniki masy

Wielostopniowe wymienniki masy

- Aparaty mieszalnikowo–odstojnikowe (poziome lub pionowe).
- Aparaty kolumnowe zabudowane półkami, pomiędzy którymi fazy płyną oddzielnie, a na półkach mieszają się ze sobą.

Liczbę stopni równowagowych wyznacza się

- metodami graficznymi lub
- analitycznie (sposobami obliczeniowymi).

Wielostopniowe wymienniki masy

Graficzna metoda wyznaczania liczby stopni teoretycznych

Metodą McCabe – Thielego

Stężenia składnika:

x_p	x_k
y_p	y_k

Podobnie jak w przypadku jednostopniowego wymiennika masy przyjmijmy,
że stężenia w obu fazach są na tyle małe,
że strumienie obu faz nie zmieniają się wzdłuż aparatu

$$\dot{n}_{Xp} = \dot{n}_{Xk} = \dot{n}_X$$

$$\dot{n}_{Yp} = \dot{n}_{Yk} = \dot{n}_Y$$

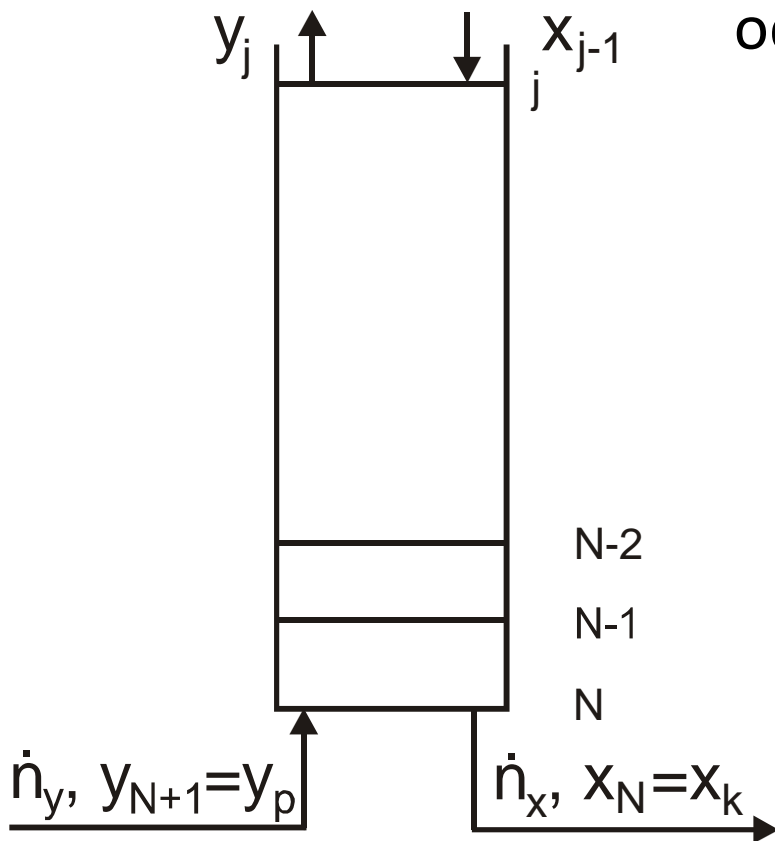
Wielostopniowe wymienniki masy

Zbilansujmy dowolnie wybrany fragment **kolumny absorpcyjnej** od wlotu fazy Y do dowolnego stopnia „j” włącznie.

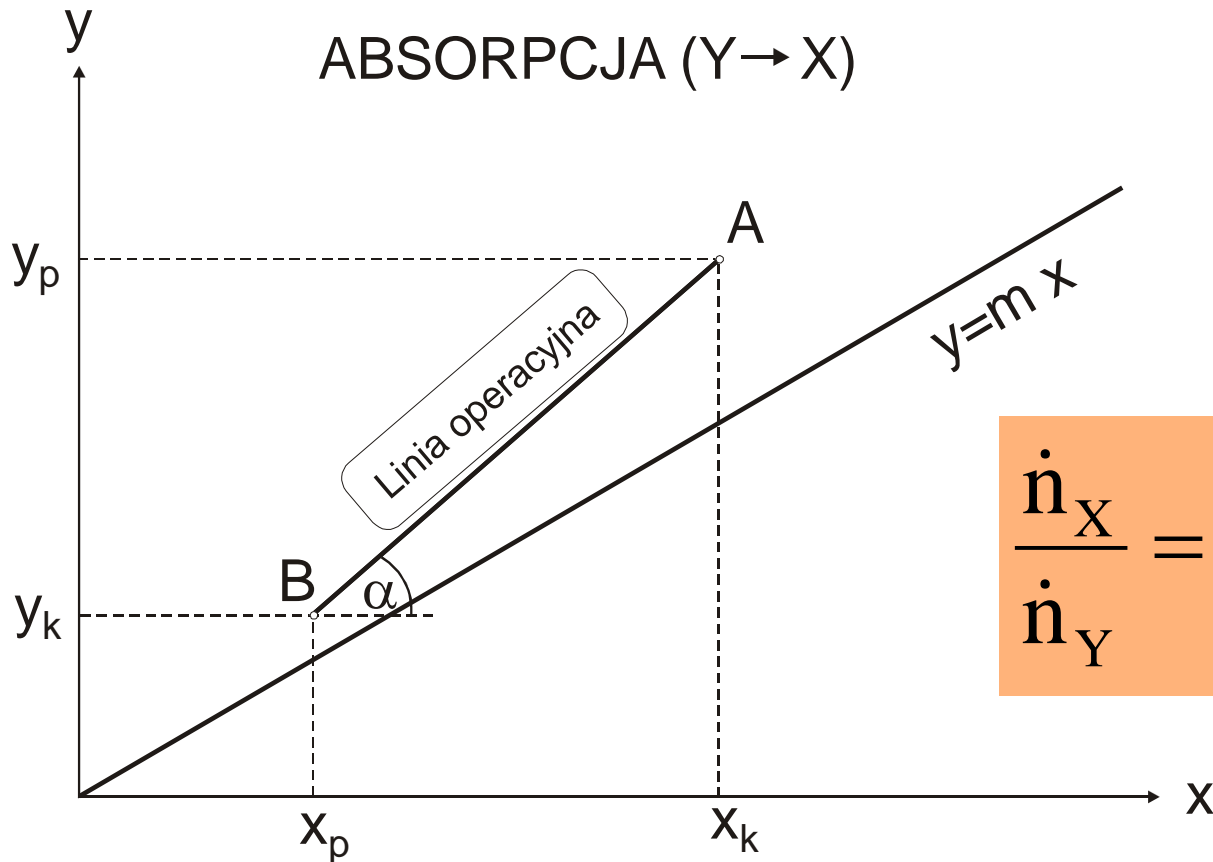
$$\dot{n}_Y y_p + \dot{n}_X x_{j-1} = \dot{n}_Y y_j + \dot{n}_X x_k$$

$$y = \frac{\dot{n}_X}{\dot{n}_Y} x + y_p - \frac{\dot{n}_X}{\dot{n}_Y} x_k$$

Równanie linii operacyjnej



Wielostopniowe wymienniki masy

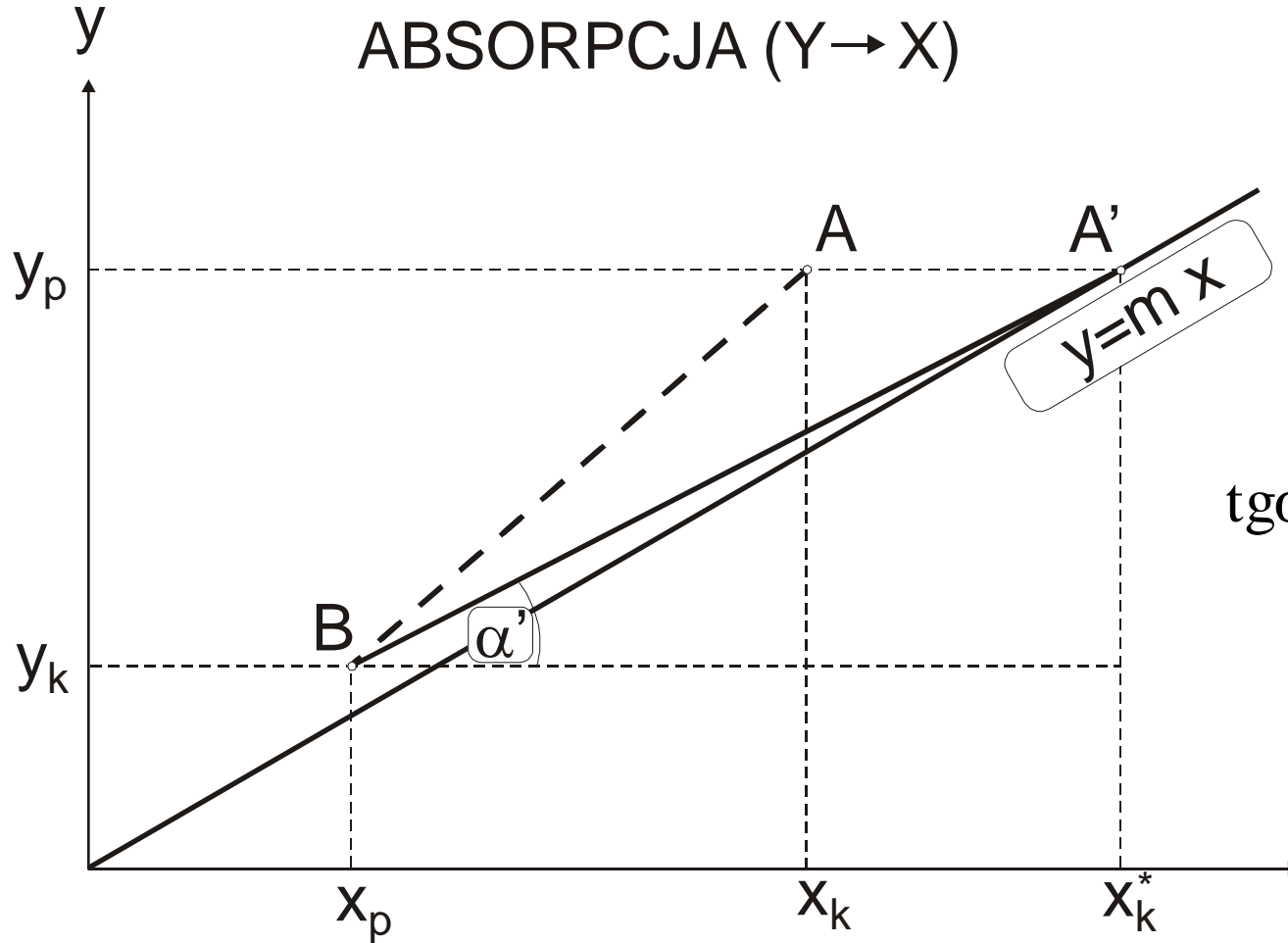


$$\frac{\dot{n}_X}{\dot{n}_Y} = \frac{y_p - y_k}{x_k - x_p} = \operatorname{tg} \alpha$$

Jeśli zmniejsza się strumień (zużycie) fazy X wykorzystywanej w procesie, to nachylenie linii operacyjnej maleje.

Wielostopniowe wymienniki masy

ABSORPCJA ($Y \rightarrow X$)

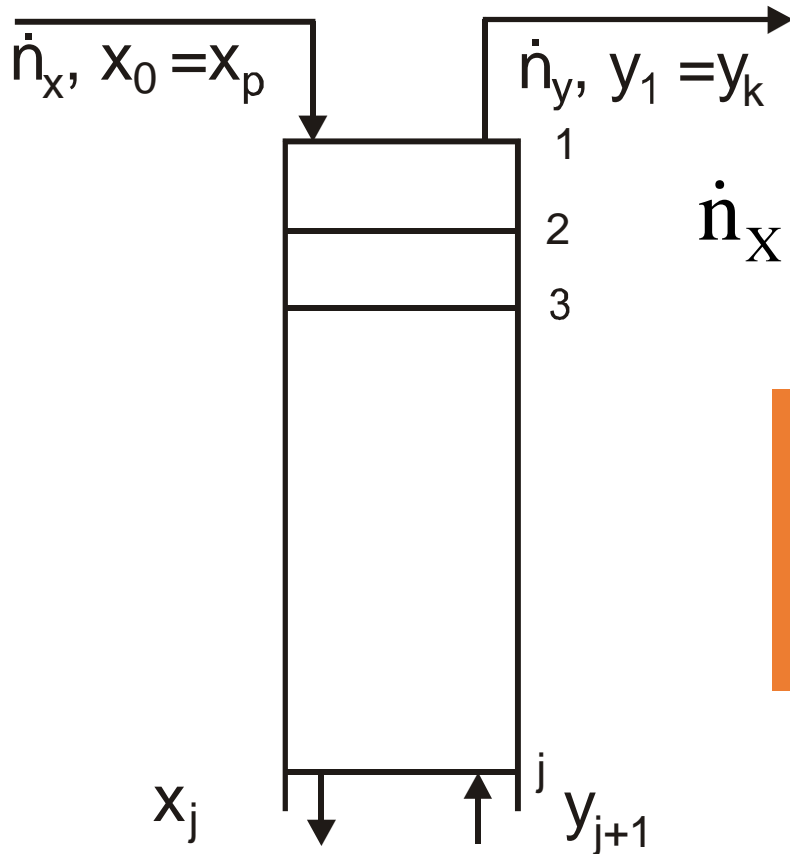


$$\operatorname{tg} \alpha' = \left(\frac{\dot{n}_X}{\dot{n}_Y} \right)_{\min} = \frac{y_p - y_k}{x_k^* - x_p}$$

$$(\dot{n}_X)_{\min} = \dot{n}_Y \frac{y_p - y_k}{x_k^* - x_p}$$

Wielostopniowe wymienniki masy

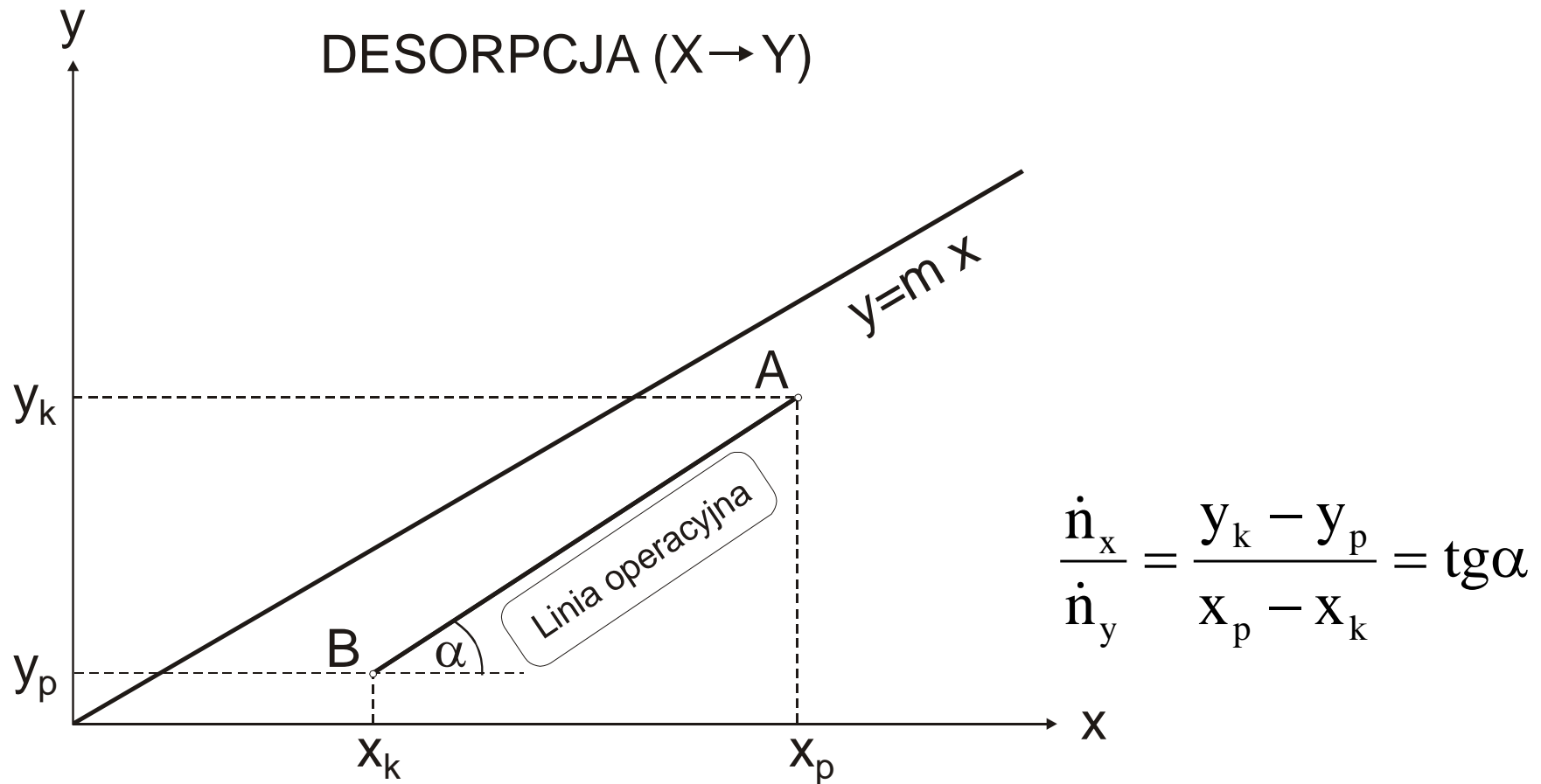
DESORPCJA



$$\dot{n}_X x_p + \dot{n}_Y y_{j+1} = \dot{n}_X x_j + \dot{n}_Y y_k$$

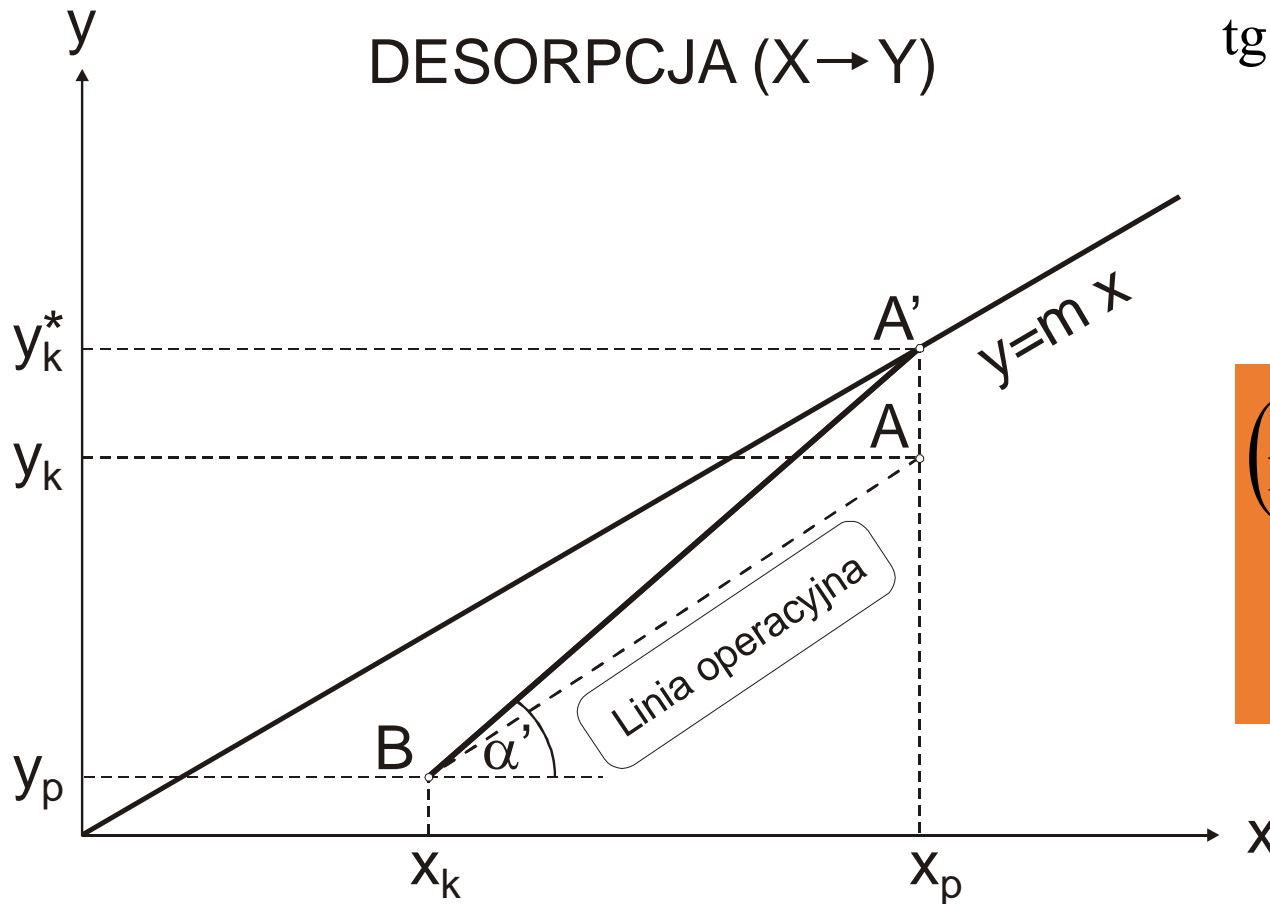
$$y = \frac{\dot{n}_X}{\dot{n}_Y} x + y_k - \frac{\dot{n}_X}{\dot{n}_Y} x_p$$

Wielostopniowe wymienniki masy



Jeśli zmniejsza się strumień (zużycie) fazy Y wykorzystywanej w procesie, to nachylenie linii operacyjnej rośnie.

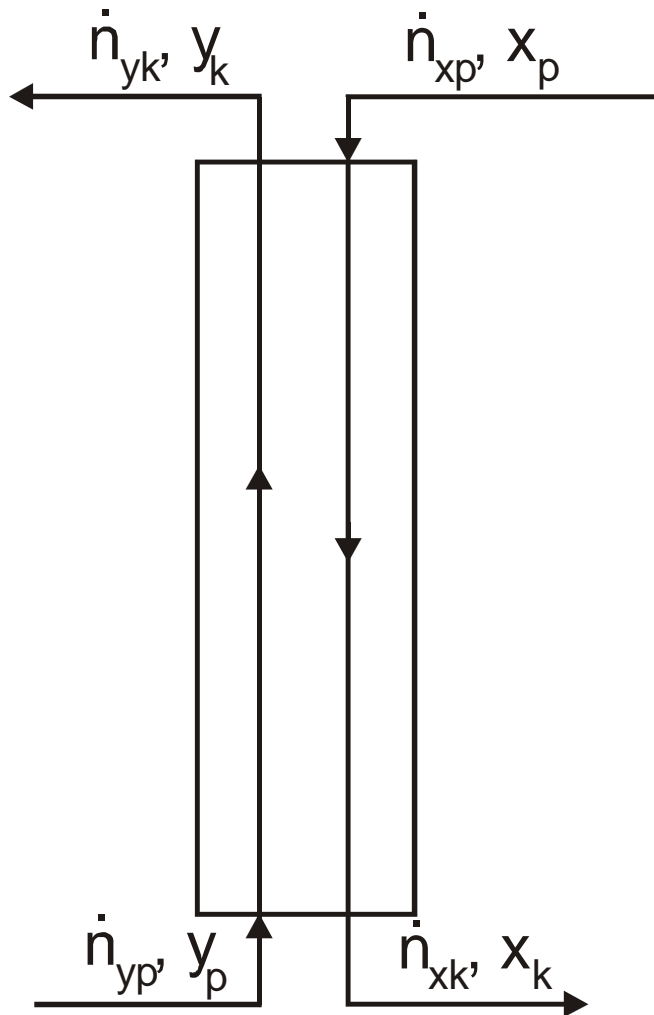
Wielostopniowe wymienniki masy



$$\operatorname{tg} \alpha' = \left(\frac{\dot{n}_x}{\dot{n}_y} \right)_{\max} = \frac{y_k^* - y_p}{x_p - x_k}$$

$$\left(\dot{n}_y \right)_{\min} = \frac{\dot{n}_x}{\frac{y_k^* - y_p}{x_p - x_k}}$$

Wielostopniowe wymienniki masy



ABSORPCJA

Z fazy Y do fazy X

$$y_p > y_k$$

$$x_k > x_p$$

DESORPCJA

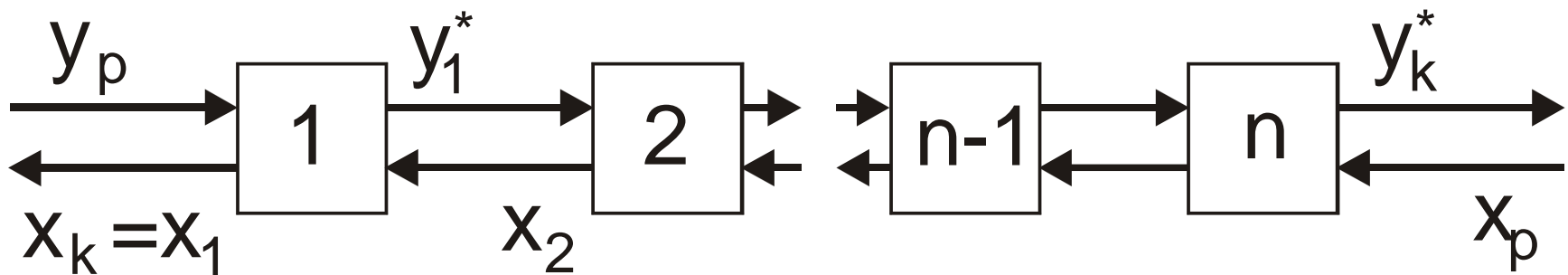
Z fazy X do fazy Y

$$y_k > y_p$$

$$x_p > x_k$$

Wielostopniowe wymienniki masy

Schemat wielostopniowego wymiennika masy pracującego przy przeciwprądowym przepływie faz

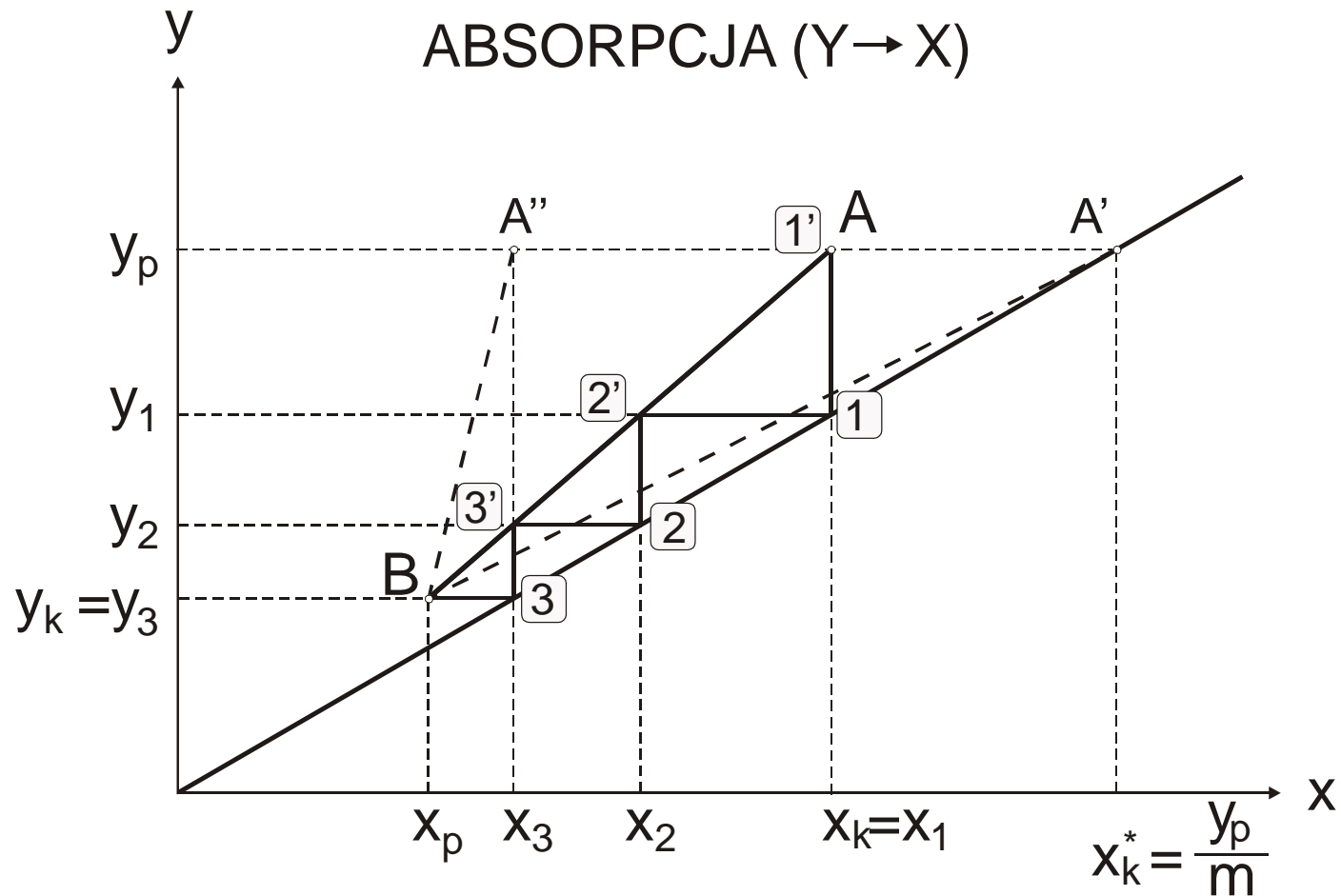


Z każdego stopnia wypływają dwie fazy będące ze sobą **w równowadze**

Pomiędzy stopniami przepływają dwie fazy spełniające **równanie linii operacyjnej**

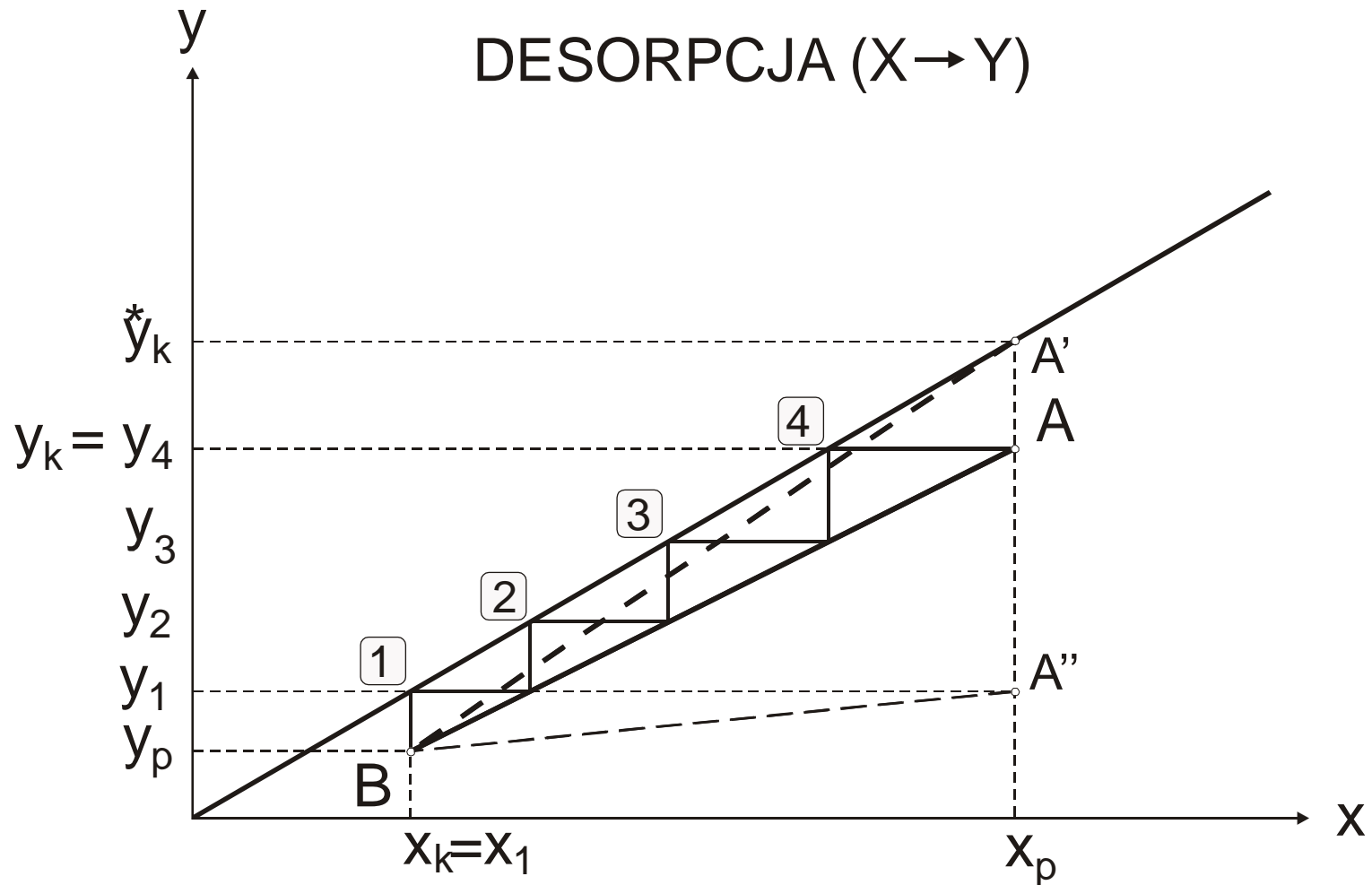
Wielostopniowe wymienniki masy

Wyznaczanie liczby stopni teoretycznych metodą McCabe-Thiele'go



Wielostopniowe wymienniki masy

Wyznaczanie liczby stopni teoretycznych metodą McCabe-Thiele'go



Wielostopniowe wymienniki masy

WNIOSKI

- im linia operacyjna leży **blżej** linii równowagi, tym **więcej** stopni potrzebnych jest do zrealizowania procesu wymiany masy w wymaganym zakresie stężeń,
- jeśli punkt A leży na linii równowagi (A'), to wymagana jest nieskończona liczba stopni teoretycznych, czyli w praktyce należy zastosować większy strumień fazy roboczej (fazy X dla absorpcji lub fazy Y dla desorpcji), aby uzyskać wymagane stężenia.

Wielostopniowe wymienniki masy

Dla dużych stężeń:

Równowaga

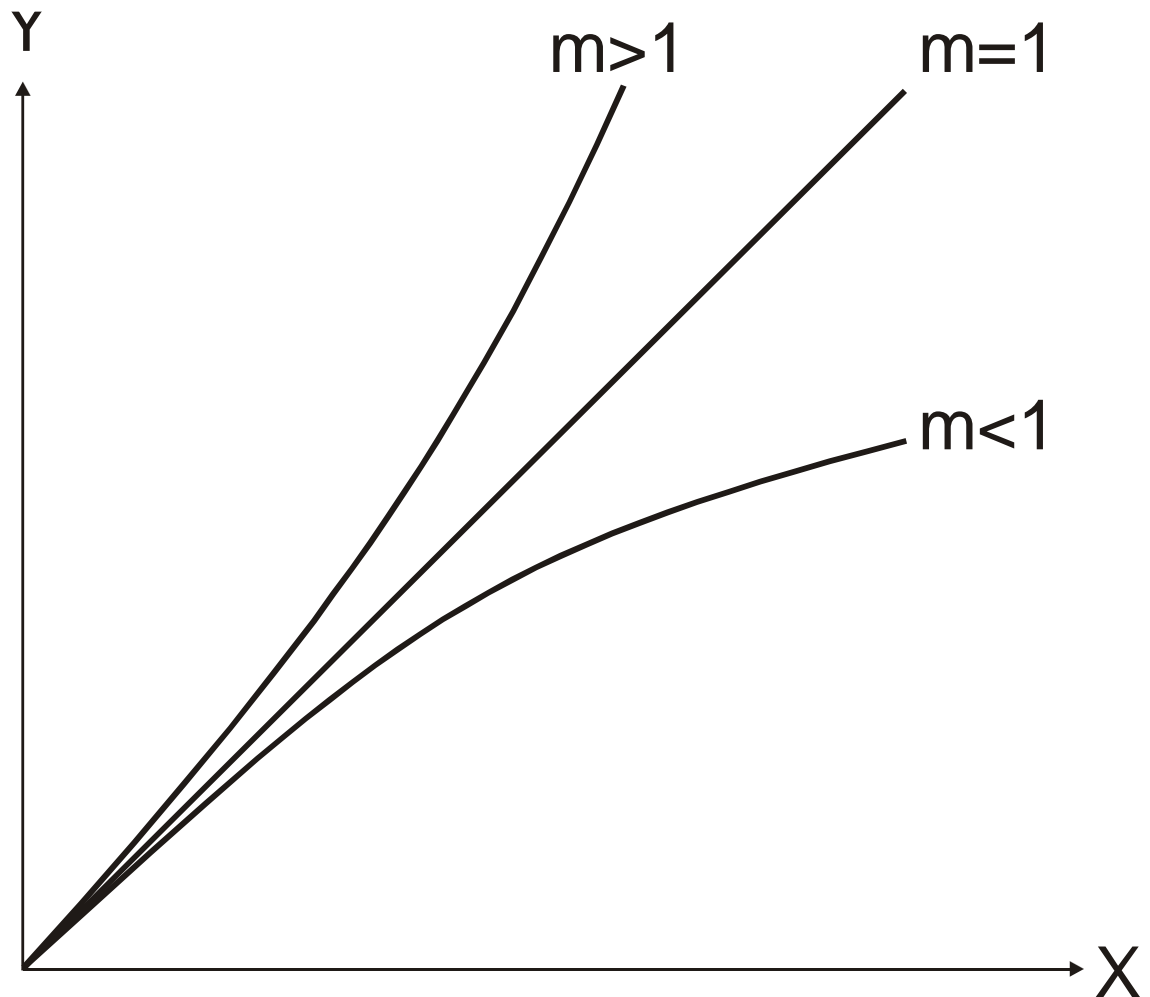
$$y = m x$$

$$\frac{Y}{1+Y} = m \frac{X}{1+X}$$

$$Y = \frac{m X}{1 + (1 - m) X}$$

Wielostopniowe wymienniki masy

$$Y = \frac{m X}{1 + (1 - m) X}$$



Wielostopniowe wymienniki masy

Dla dużych stężeń:

$$\bar{\dot{n}}_x = \text{const} \quad \text{i} \quad \bar{\dot{n}}_y = \text{const}$$

$$Y = \frac{\bar{\dot{n}}_x}{\bar{\dot{n}}_y} X + Y_p - \frac{\bar{\dot{n}}_x}{\bar{\dot{n}}_y} X_k \quad \text{ABSORPCJA}$$

$$Y = \frac{\bar{\dot{n}}_x}{\bar{\dot{n}}_y} X + Y_k - \frac{\bar{\dot{n}}_x}{\bar{\dot{n}}_y} X_p \quad \text{DESORPCJA}$$

Wielostopniowe wymienniki masy

Matematyczna metoda obliczania liczby stopni teoretycznych

Dla procesu absorpcji opracował Kremser,
a dla procesu desorpcji Sauders i Brown

Współczynnik absorpcji

lub

Współczynnik desorpcji

$$A = \frac{\bar{\dot{n}}_x}{\bar{\dot{n}}_y m}$$

$$D = \frac{\bar{\dot{n}}_y m}{\bar{\dot{n}}_x}$$

Stopień wyabsorbowania

$$\Psi_Y = \frac{\bar{\dot{n}}_y Y_p - \bar{\dot{n}}_y Y_k}{\bar{\dot{n}}_y Y_p - \bar{\dot{n}}_y Y_k^*} = \frac{Y_p - Y_k}{Y_p - m X_p}$$

Stopień wydesorbowania

$$\Psi_X = \frac{\bar{\dot{n}}_x X_k - \bar{\dot{n}}_x X_p}{\bar{\dot{n}}_x X_k - \bar{\dot{n}}_x X_p^*} = \frac{X_k - X_p}{X_k - Y_k/m}$$

Wielostopniowe wymienniki masy

Matematyczna metoda obliczania liczby stopni teoretycznych

Jeśli medium robocze jest czyste, tj.
pozbawione składnika wymienianego między fazami

Dla absorpcji:

$$X_p = 0$$

$$\Psi_Y = \frac{Y_p - Y_k}{Y_p}$$

Dla desorpcji:

$$Y_p = 0$$

$$\Psi_X = \frac{X_k - X_p}{X_k}$$

dla małych stężeń

$$\Psi_y = \frac{y_p - y_k}{y_p}$$

$$\Psi_x = \frac{x_k - x_p}{x_k}$$

Wielostopniowe wymienniki masy

Wyprowadzenie wzoru dla absorpcji:

Założenia: $m = \text{const}$ $X_p = 0$

Bilanse kolejnych stopni:

Dla stopnia „n”: $\bar{\dot{n}}_y Y_n + \bar{\dot{n}}_x X_n = \bar{\dot{n}}_y Y_{n-1} + \bar{\dot{n}}_x X_{n+1}$

$$X_n = \frac{Y_n}{m} \quad Y_{n-1} = Y_n + \frac{\bar{\dot{n}}_x}{\bar{\dot{n}}_y} X_n = Y_n + \frac{\bar{\dot{n}}_x}{\bar{\dot{n}}_y m} Y_n = Y_n (1 + A)$$

$$Y_{n-1} = Y_n (1 + A)$$

Wielostopniowe wymienniki masy

Wyprowadzenie wzoru dla absorpcji:

Bilanse kolejnych stopni:

Dla stopnia „n”: $Y_{n-1} = Y_n (1 + A)$

Dla stopnia „(n-1)”: $\bar{n}_y Y_{n-1} + \bar{n}_x X_{n-1} = \bar{n}_y Y_{n-2} + \bar{n}_x X_n$

$$X_n = \frac{Y_n}{m} \quad X_{n-1} = \frac{Y_{n-1}}{m}$$

$$\begin{aligned} Y_{n-2} &= Y_{n-1} + \frac{\bar{n}_x}{\bar{n}_y m} (Y_{n-1} - Y_n) = \\ &= Y_n (1 + A) + A (Y_{n-1} - Y_n) = \\ &= Y_n (1 + A) + A (Y_n (1 + A) - Y_n) = \\ &= Y_n (1 + A) + A (Y_n + Y_n A - Y_n) = \\ &= Y_n (1 + A + A^2) \end{aligned}$$

$$Y_{n-2} = Y_n (1 + A + A^2)$$

Wielostopniowe wymienniki masy

Wyprowadzenie wzoru dla absorpcji:

Bilanse kolejnych stopni:

Dla stopnia „n”:

$$Y_{n-1} = Y_n (1 + A)$$

Dla stopnia „(n-1)”:

$$Y_{n-2} = Y_n (1 + A + A^2)$$

Dla stopnia „(n-2)”:

$$Y_{n-3} = Y_n (1 + A + A^2 + A^3)$$

Dla stopnia „1”:

$$Y_0 = Y_n (1 + A + A^2 + \dots + A^n) = Y_n \frac{A^{n+1} - 1}{A - 1}$$

Uwzględniając, że:

$$Y_n = Y_k$$

$$Y_0 = Y_p$$

$$Y_p = Y_k \frac{A^{n+1} - 1}{A - 1}$$

Wielostopniowe wymienniki masy

Wyprowadzenie wzoru dla absorpcji:

$$Y_p = Y_k \frac{A^{n+1} - 1}{A - 1}$$

$$\psi_Y = \frac{Y_p - Y_k}{Y_p} = \frac{Y_k \frac{A^{n+1} - 1}{A - 1} - Y_k}{Y_k \frac{A^{n+1} - 1}{A - 1}}$$

$$\psi_Y = \frac{\frac{A^{n+1} - 1}{A - 1} - 1}{\frac{A^{n+1} - 1}{A - 1}} = \frac{A^{n+1} - 1 - A + 1}{A^{n+1} - 1}$$

$$\psi_Y = \frac{A^{n+1} - A}{A^{n+1} - 1}$$

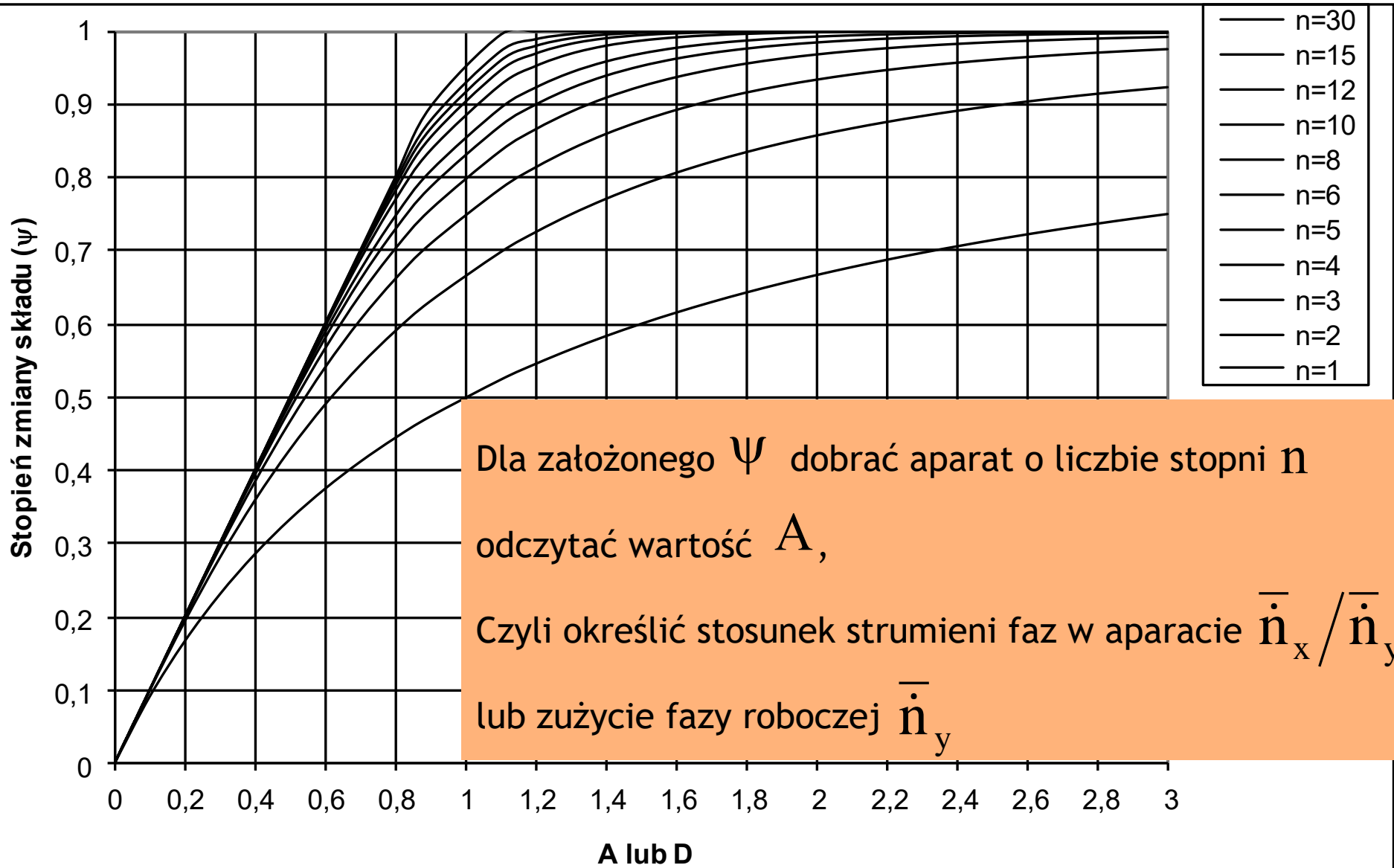
Wielostopniowe wymienniki masy

ABSORPCJA

$$\Psi_Y = \frac{A^{n+1} - A}{A^{n+1} - 1}$$

DESORPCJA

$$\Psi_X = \frac{D^{n+1} - D}{D^{n+1} - 1}$$



Dla założonego ψ dobrać aparat o liczbie stopni n
 odczytać wartość A ,
 Czyli określić stosunek strumieni faz w aparacie \bar{n}_x / \bar{n}_y
 lub zużycie fazy roboczej \bar{n}_y