

JACEK STELMACH

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

# Współczynniki wnikania masy dla mieszadeł Rushtona i samozasysającego

## Wprowadzenie

Mieszanie mechaniczne z jednoczesnym napowietrzaniem jest procesem stosowanym m.in. podczas oczyszczania ścieków [1]. W tego typu procesach strumień tlenu przenikającego z fazy gazowej do ciekłej powinien być jak największy. Intensywność transportu masy zależy m.in. od wartości współczynników wnikania masy

$$j_m = k_G(p - p^*) = k_L(c^* - c) \quad (1)$$

Wychodząc z zależności definicyjnej współczynnika przenikania masy [2], można stwierdzić, że gdy główny opór wnikania masy skupiony jest po stronie jednej z faz, o wartości tego współczynnika decyduje wartość współczynnika wnikania masy dla tejże fazy. Zatem dla gazu trudno rozpuszczalnego w cieczy, tak jak ma to miejsce w przypadku tlenu i wody, można przyjąć, że wartość współczynnika przenikania masy będzie w przybliżeniu równa wartości współczynnika wnikania masy po stronie cieczy.

Bezpośredni pomiar współczynnika wnikania masy jest możliwy, ale tylko w roztworze silnego elektrolitu [3]. Dlatego w większość metod pomiarowych [4] uzyskuje się wartości objętościowego współczynnika wnikania masy  $k_L\alpha$ . Na jego podstawie można obliczyć wartość współczynnika wnikania masy  $k_L$ , jeżeli znane są rozmiary pęcherzyków gazu (a właściwie średnica zastępcza  $d_{32}$ ) i zatrzymanie fazy gazowej  $\Phi$ . Między tymi wielkościami a powierzchnią właściwą pęcherzyków  $\alpha$  istnieje bowiem zależność [4, 5]

$$d_{32} = 6 \frac{\Phi}{\alpha} \quad (2)$$

Celem niniejszej pracy jest określenie wartości współczynnika wnikania masy dla mieszadła turbinowo-tarczowego (*Rushtona*) i samozasysającego mieszadła tarczowego i porównanie otrzymanych wartości.

## Opis badań

Badania przeprowadzono w płaskodennym zbiorniku o średnicy  $T = 300$  mm wyposażonym w cztery standardowe przegrody. Zbiornik wypełniony był wodą destylowaną ( $t = 20^\circ\text{C}$ ) do wysokości  $H = T$ . Użyto mieszadła turbinowo-tarczowego (*Rushtona*) o średnicy  $D = 100$  mm i samozasysającego mieszadła tarczowego ( $D = 100, 125$  i  $150$  mm). Zakres częstości obrotowych mieszadeł  $N$  zmieniano w zakresie od  $200$  do  $800$   $\text{min}^{-1}$ , a strumień gazu  $V$  dostarczany przez bełkotkę pod mieszadło *Rushtona* od  $1$  do  $4$   $\text{m}^3/\text{h}$ . W podanym zakresie częstości obrotowych strumień gazu dyspergowany przez mieszadła samozasysające dochodzi do  $5$   $\text{m}^3/\text{h}$ . W ściance bocznej mieszalnika umieszczona była elektroda tlenowa, mierząca zmiany stężenia tlenu w wodzie.

## Metodyka obliczeń

Dla mieszadła samozasysającego pracującego w podanych wcześniej warunkach określono objętościowy współczynnik wnikania tlenu do wody  $k_L\alpha$ , zatrzymanie fazy gazowej  $\Phi$  oraz średnicę *Sautera*  $d_{32}$  pęcherzyków gazu i opisano je równaniami korelacyjnymi [6, 7]

$$\begin{cases} Fr'_{kr} < Fr' \leq 1,8 & \Rightarrow Sh = 195 \cdot 10^{-6} (Fr' - Fr'_{kr})^{0,831} \left(\frac{D}{T}\right)^{0,729} \\ Fr' > 1,8 & \Rightarrow Sh = 287 \cdot 10^{-6} \left(\frac{D}{T}\right)^{0,729} \end{cases} \quad (3)$$

$$\Phi = 0,386 (Fr' - Fr'_{kr})^{0,818} \left(\frac{D}{T}\right)^{2,270} \quad (4)$$

$$d_{32} = 14,8 \cdot 10^{-3} N^{1,379} (H - h)^{-0,243} D^{2,141} \quad (5)$$

Natomiast dla mieszadła *Rushtona* doświadczalnie określono jedynie wartości  $k_L\alpha$  dla wnikania tlenu do wody i opisano je wymiarową zależnością korelacyjną, która dla częstości obrotowej mieszadeł  $N$  wyrażonej w  $[\text{s}^{-1}]$  i strumienia gazu  $V$  w  $[\text{m}^3/\text{s}]$  ma postać

$$k_{La} = 5,65 \cdot 10^{-3} N^{1,25} V^{0,125} \quad (6)$$

Powierzchnię właściwą pęcherzyków gazu obliczono na podstawie danych literaturowych [8].

$$\alpha = 144 \left[ \frac{(P_G / V_L)^{0,4} \rho_L^{0,2}}{\sigma^{0,6}} \right] \left( \frac{w_G}{w_s} \right)^{0,5} \quad (7)$$

Niezbędną w obliczeniach moc mieszania podczas napowietrzania określono doświadczalnie i opisano równaniem wymiarowym ( $N$   $[\text{s}^{-1}]$ ,  $V$   $[\text{m}^3/\text{s}]$ )

$$P_G = 0,02 N^3 V^{-0,33} \quad (8)$$

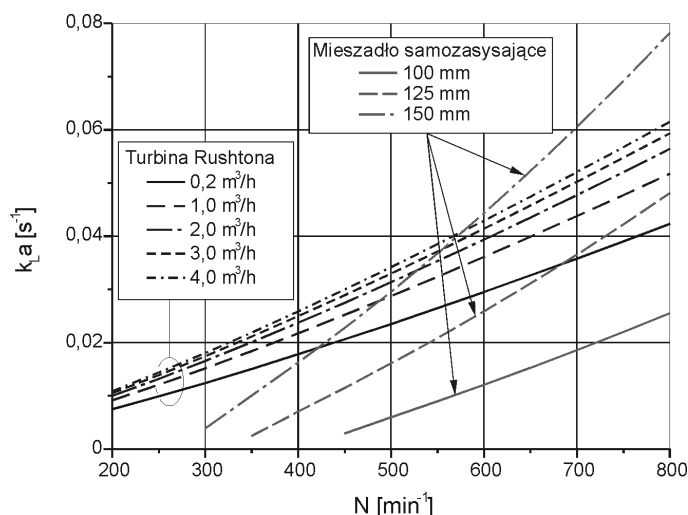
natomiast prędkość wznoszenia się pęcherzyka w cieczy obliczono ze znanych zależności [2] dla średnicy *Sautera* obliczonej z zależności [8]

$$d_{32} = 11,41 \cdot 10^{-3} (P_G / V_L)^{-0,10} w_G^{0,08} \quad (9)$$

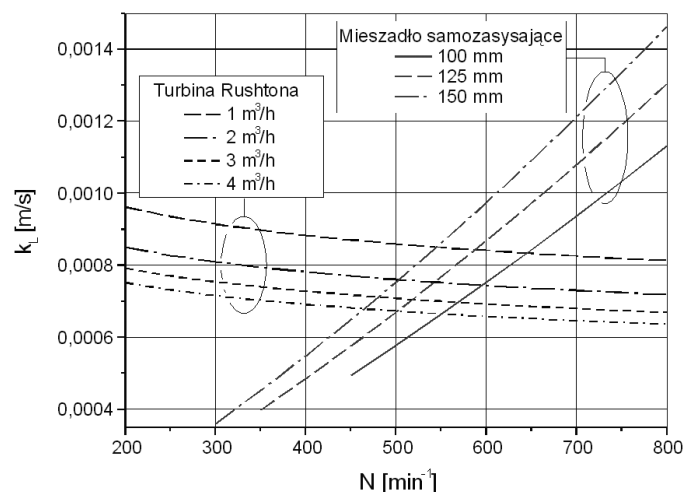
## Omówienie wyników

Ponieważ pomiary  $k_L\alpha$  dla obu typów mieszadeł odbywały się w identycznych warunkach, toteż ich wyniki można porównywać ze sobą bez popełniania większych błędów. Otrzymane wyniki przedstawiono na rys. 1.

Przy tej samej średnicy  $D = 100$  mm mieszadło turbinowo-tarczowe zapewnia uzyskanie od dwóch do trzech razy większych wartości objętościowego współczynnika wnikania masy



Rys. 1. Objętościowe współczynniki wnikania masy



Rys. 2. Współczynniki wnikania masy

w porównaniu z mieszadłem samozasysającym. Wraz ze zwiększaniem średnicy mieszadeł samozasysających uzyskuje się większe wartości  $k_L a$  przy tej samej częstotliwości obrotowej mieszadła. Dla największego z przebadanych mieszadeł samozasysających przy częstotliwościach obrotowych większych od  $N = 600 \text{ min}^{-1}$  uzyskano, wartości  $k_L a$  większe od mieszadła Rushtona. Wydaje się też, że zwiększenie przepływu gazu podawanego pod mieszadło turbinowo-tarczowe nie spowoduje dużych przyrostów wartości objętościowego współczynnika wnikania masy.

Ze względu na różne sposoby określania  $d_{32}$  porównania wartości  $k_L$  mogą być obciążone większym błędem. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 2.

Dla mieszadła turbinowo-tarczowego największe wartości współczynnika wnikania masy otrzymano dla najmniejszych przepływów gazu. Zwiększanie przepływu gazu zmniejsza uzyskiwane wartości  $k_L$ , co sugeruje zmniejszanie się burzliwości w układzie dwufazowym i zwiększanie grubości warstwy granicznej. Dlatego też widoczne na rys. 2 zmniejszanie się wartości  $k_L$  wraz ze wzrostem częstotliwości obrotowej – a więc i burzliwości w mieszalniku – jest najprawdopodobniej wynikiem niecałkowitej zgodności warunków dla jakich uzyskano zależności literaturowe z warunkami panującymi w badanym układzie.

W przypadku mieszadła samozasysającego najmniejsze wartości współczynnika wnikania masy przy danej częstotliwości

obrotowej obserwuje się dla mieszadła o najmniejszej średnicy. Mieszadło to ma najmniejsze łopatki i w związku z tym wytwarza najmniejszą burzliwość. Mimo to, w zakresie dużych częstotliwości obrotowych wartości  $k_L$  dla tego mieszadła przewyższają wartości uzyskane dla mieszadła Rushtona. Jeżeli jednak porówna się wartości współczynnika wnikania masy w zależności od liczby *Reynoldsa*, którą można potraktować jako pewną miarę burzliwości, okazuje się, że dla ustalonej wartości liczby *Re* największe wartości  $k_L$  występują dla mieszadła o najmniejszej średnicy i najmniejszej powierzchni łopatek. Zatem na wartość musi silnie wpływać sposób dystrybucji gazu oraz burzliwość wewnątrz mieszadła samozasysającego.

Dodatkowe badania przeprowadzone dla mieszadła samozasysającego, w których określono lokalne wartości  $k_L a$  oraz  $k_L$  w mieszalniku [3] wykazały odmiennosc ich rozkładów. Objętościowy współczynnik wnikania masy największe wartości osiąga przy ścianie mieszalnika (o ok. 40% większe od wartości średniej), podczas gdy największe wartości współczynnika wnikania masy obserwuje się w obszarze za łopatkami mieszadła (ok. 3 razy większe od wartości średniej). Niewątpliwym wpływem na to ma sposób cyrkulacji pęcherzyków gazu w mieszalniku, a więc i warunki hydrodynamiczne wytwarzane przez mieszadło. Mimo, iż oba porównywane typy mieszadeł wytwarzają promieniowo-osiową cyrkulację cieczy w mieszalniku, to jednak ze względu na sposób dostarczania gazu jego cyrkulacja i czas przebywania będą różne. Wymaga to jednak dalszych badań określających względne prędkości cieczy i pęcherzyków gazu.

## Wnioski

Na wartości współczynnika wnikania masy wpływają warunki hydrodynamiczne w mieszalniku oraz sposób dyspergowania gazu.

W przebadanym zakresie zmienności częstotliwości obrotowych i przepływów powietrza objętościowe współczynniki wnikania masy dla mieszadła turbinowo-tarczowego i samozasysającego mieszadła tarczowego mają zbliżone wartości. Ponieważ jednak w badanych warunkach powierzchnia właściwa pęcherzyków gazu dyspergowanego przez mieszadło samozasysające jest mniejsza, to współczynnik wnikania masy przy większych częstotliwościach obrotowych osiąga dla tego typu mieszadła nieco większe (około 1,5 raza) wartości.

## LITERATURA

1. E. Paul, V. Atiemo-Obeng, S. Kresta: Handbook of industrial mixing, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 2004.
2. M. Serwiński: Zasady inżynierii chemicznej i procesowej, Warszawa, WNT, 1982.
3. T. Kurasiński: Wpływ parametrów pola turbulentnego na szybkość transportu masy dla mieszadeł samozasysających, Praca doktorska, Politechnika Łódzka, 2007.
4. M. Zlokarnik: Stirring. Theory and practice, Weinheim, Wiley-VCH, 2001.
5. F. Stręk: Mieszanie i mieszalniki, Warszawa, WNT, 1981.
6. Cz. Kuncewicz, J. Stelmach: Mat. 10<sup>th</sup> Europ. Conf. on Mixing, Delft, Holandia, 2000.
7. J. Stelmach: Badanie pracy samozasysających mieszadeł tarczowych, Praca doktorska, Politechnika Łódzka, 2000.
8. J. Kamiński: Mieszanie układów wielofazowych, Warszawa, WNT, 2004.

Praca powstała w ramach działalności statutowej W-10/1/2009/Dz.St.