

TOMASZ KURASIŃSKI  
CZESŁAW KUNCEWICZ

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

# Cyrkulacja cieczy w mieszalniku i jej wpływ na czasy przebywania gazu w mieszalniku

## Wprowadzenie

W przypadku napowietrzania cieczy w mieszalnikach zbiornikowych szybkość transportu masy np. tlenu w wnętrza pęcherzyka powietrza do cieczy zależy przede wszystkim od wartości objętościowego współczynnika wnikania masy ( $k_L a$ ), na którego wartość lokalną wpływa wartość współczynnika wnikania masy  $k_L$  i powierzchnia międzyfazowa  $a$  [ $m^2/m^3$ ]. Globalna ilość tlenu, która przejdzie lokalnie do cieczy będzie zależała nie tylko od wartości ( $k_L a$ ), ale również od czasu przebywania pęcherzyka gazu w określonym obszarze mieszalnika. Im czas przebywania jest większy tym większa ilość tlenu przechodzi lokalnie do cieczy (nie dotyczy to bardzo małych pęcherzyków, w których zawartość tlenu szybko się wyczerpuje). Czasy przebywania pęcherzyka zależą w oczywisty sposób od sposobu cyrkulacji cieczy w mieszalniku, gdyż pęcherzyk powietrza cyrkuluje razem z cieczą.

Jak wiadomo, na sposób cyrkulacji cieczy wewnątrz mieszalnika wpływają dwie cyrkulacje: cyrkulacja pierwotna  $V_p$  [ $m^3/s$ ] czyli cyrkulacja obwodowa związana z ruchem obrotowym mieszadła oraz cyrkulacja wtórna  $V_s$  [ $m^3/s$ ] związana z ruchem cieczy w płaszczyźnie promieniowo-osiowej, a trajektoria pojedynczego pęcherzyka gazu jest wypadkową oddziaływań obu cyrkulacji [1].

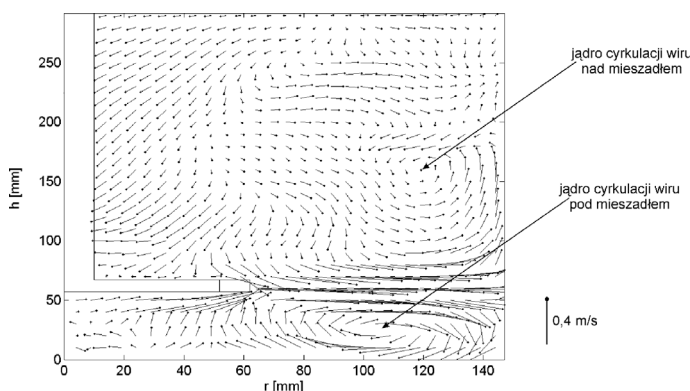
Celem pracy było doświadczalne określenie pola średnich prędkości w mieszalniku dla składowej obwodowej, promieniowej i osiowej oraz określenie kształtu i wielkości wirów cyrkulacji wtórnej w mieszalniku, w których cyrkulują pęcherzyki powietrza.

## Aparatura doświadczalna

Głównym elementem stanowiska pomiarowego był szklany płaskodenny, cylindryczny zbiornik o średnicy  $D = 292$  mm z osiowo zamontowanym samozasysającym mieszadłem tarczowym [2] o średnicy  $d = 125$  mm umieszczonym w odległości  $h = 62$  mm od dna. Mieszalnik z czterema standardowymi przegrodami o szerokości  $0,1D$  wypełniony był cieczą do wysokości  $H = D$ . Pomiarów prędkości chwilowych dokonano za pomocą anemometru laserowego firmy DANTEC®. Więcej informacji na ten temat można znaleźć w pracy [2]. Pomiarów prędkości chwilowych (20000 wartości w każdym punkcie) dokonano w płaszczyźnie promieniowo-osiowej wyznaczonej przez dwusieczną konta pomiędzy sąsiadującymi przegrodami w około 180 jej punktach. Następnie wartości te interpolowano [3] do całej płaszczyzny  $r - h$ .

## Wyniki

Na rys. 1 przedstawiono wyniki uzyskane dla wody dla częstości obrotowej mieszadła  $N = 365 \text{ min}^{-1}$ , dla zakresu mieszania burzliwego ( $Re = 95050$ ).



Rys. 1. Wektory prędkości wypadkowej w kierunku promieniowo-osiowym

Jak wynika z analizy tego rysunku hydrodynamika cieczy jest skomplikowana (zwłaszcza nad mieszadłem), mimo to można zauważyć charakterystyczne struktury cyrkulacji wtórnej, które składają się z dwóch niesymetrycznych wirów obracających się w przeciwnych kierunkach [1]. W aparacie z mieszadłem samozasysającym pęcherzyk gazu po oderwaniu się od warkocza gazowego wyrzucany jest z obszaru łopatk mieszadła w kierunku promieniowym. Jeżeli siła wyporu pęcherzyka jest mała (taka sytuacja występuje w przypadku małych pęcherzyków poniżej 1 mm [4]) w porównaniu do siły odśrodkowej, wówczas znajdując się nawet nieznacznie powyżej osi symetrii mieszadła, może się on znaleźć w obszarze wiru pod mieszadłem. W przeciwnym przypadku ruchem spiralnym będzie płynął ku górze.

Wartość bezwymiarowej liczby cyrkulacji pierwotnej  $K_p$  można określić z równania definicyjnego (1)

$$K_p = \frac{\dot{V}_p}{Nd^3} = \frac{\int_0^H \int_0^R \bar{w}_\varphi dr dh}{Nd^3} \quad (1)$$

gdzie:  $\bar{w}_\varphi$  oznacza prędkość średnią w kierunku obwodowym, natomiast licznik powyższego równania określa cyrkulację pierwotną  $\dot{V}_p$  [ $m^3/s$ ] w kierunku obwodowym.

Cyrkulacja wtórna (promieniowo-osiowa) określa wydajność objętościową wirów cyrkulacji wtórnej [ $m^3/s$ ] przedstawionych na rys. 2. Całkowita cyrkulacja wtórna w całym mie-

szalnika wynika z sumy  $\dot{V}_s = \dot{V}_{s1} + \dot{V}_{s2}$  objętościowego natężenia przepływu w górnym i dolnym wirze (nad i pod mieszadłem), a wartości  $\dot{V}_{s1}$  oraz  $\dot{V}_{s2}$  można obliczyć np. z rozkładu prędkości osiowej z klasycznych zależności

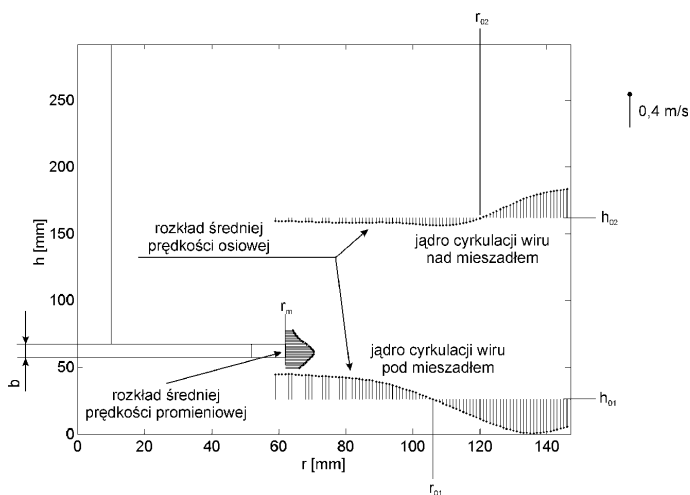
$$\dot{V}_{s1} = \int_0^R \int_{r_{01}}^{2\pi} [(\bar{w}_h)_{h=h_{01}} r] dr d\phi; \quad \dot{V}_{s2} = \int_0^R \int_{r_{02}}^{2\pi} [(\bar{w}_h)_{h=h_{02}} r] dr d\phi \quad (2)$$

w których  $(\bar{w}_h)_{h=h_{01}}$  oznacza średnią prędkość w kierunku osiowym na wysokości odpowiadającej centrum analizowanego wiru. Podobnie jak w przypadku cyrkulacji pierwotnej operuje się zapisem w postaci bezwymiarowej liczby cyrkulacji wtórnej  $K_s = V_s / (Nd^3)$ .

Dysponując informacją o polu prędkości określono również natężenie objętościowe strumienia cieczy wyrzucanego przez łopatkę mieszadła w kierunku promieniowym, czyli określono tzw. wydajność pompowania mieszadła. W tym przypadku mieszadło potraktowane jako wirnik pompy, który generuje strumień cieczy wypływający z jego obszaru. Wartość  $\dot{V}_{pomp}$  [m<sup>3</sup>/s] może być wyrażona przez bezwymiarową liczbą pompowania  $K_{pomp}$ .

$$K_{pomp} = \frac{\dot{V}_{pomp}}{Nd^3} = \frac{\pi d \int_{r=r_m}^{b/2} (\bar{w}_r)_{r=r_m} dh}{Nd^3} \quad (3)$$

gdzie:  $b$  jest szerokością łopatki mieszadła, natomiast  $(\bar{w}_r)_{r=r_m}$  oznacza średnią prędkość promieniową na odległości promienia odpowiadającego końcu łopatki mieszadła. Rozkład poszczególnych składowych prędkości obrazujący podane wyżej definicje liczby cyrkulacji wtórnej  $K_s$  oraz liczby pompowania  $K_{pomp}$  przedstawia rys.2.

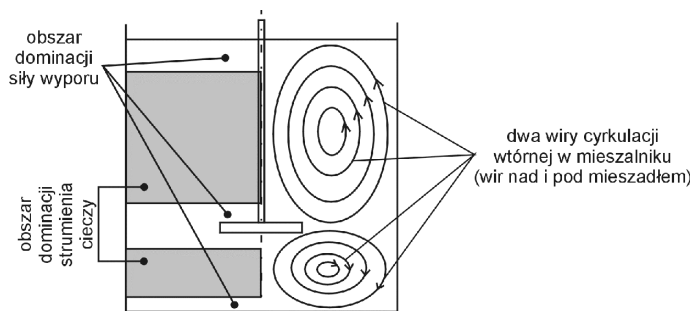


Rys. 2. Rozkłady prędkości średnich definiujących liczby  $K_p$  i  $K_s$  dla  $N = 365 \text{ min}^{-1}$

W wyniku całkowania numerycznego zmierzonego rozkładu prędkości uzyskano następujące wartości poszczególnych liczb:  $K_p = 0,561$ ,  $K_{pomp} = 0,087$  oraz  $K_s = 0,166$ . Należy nadmienić, że poszczególne konstrukcje mieszalników (różniących się parametrami geometrycznymi, jak i konstrukcją mieszadła) można porównać ze sobą porównując omówione wyżej trzy bezwymiarowe liczby.

Uzyskane wyniki wskazują, że za cyrkulację cieczy pod mieszadłem odpowiedzialny jest jeden, duży wir zajmujący praktycznie cały obszar od dna mieszalnika do tarczy mieszadła. Nad mieszadłem na cyrkulację wtórną wpływa kilka struktur wirowych o mniejszych rozmiarach. Uzyskany w tej pracy stosunek bezwymiarowych liczb  $K_p/K_s$  dla całego mieszalnika jest zbliżony do wartości obserwowanej przez wielu badaczy cytowanych w monografii Stręka [1] ( $K_p/K_s \approx 0,5$ ).

Na podstawie uzyskanych wykresów można jakościowo przeanalizować trajektorię pęcherzyków gazu w mieszalniku. Pęcherzyki gazu po wypłynięciu z otworów wylotowych mieszadła ruchem spiralnym poruszają się w kierunku osiowym, ku górze. Składowa osiowa prędkości pęcherzyków zmienia się wzdłuż wysokości i promienia mieszalnika, co jest wynikiem działania dwóch elementów. Po pierwsze wpływu strumienia cieczy wewnątrz wirów cyrkulacji wtórnej nad i pod mieszadłem [1], po drugie siłą wyporu związaną z różnicą gęstości fazy ciągłej i rozproszonej. W ten sposób można wyodrębnić w mieszalniku dwa obszary, w których dominujący wpływ na prędkość osiową pęcherzyka gazu (a zatem i na czas jego przebywania) mają wymienione wcześniej dwa elementy [5].



Rys. 3. Obszary dominującego wpływu strumienia cyrkulującego i siły wyporu na składową osiową prędkość pęcherzyka gazu

Wspomniane siły decydują o szybkości poruszania się pęcherzyka gazu wewnątrz mieszalnika, decydują zatem o czasach przebywania jego przebywania a tym samym będą wpływały na ilości np. tlenu, który lokalnie zostanie wymieniony pomiędzy obiema fazami. Temu zagadnieniu będzie poświęcona nasza następna praca [6].

## LITERATURA

1. F. Stręka: Mieszanie i mieszalniki, Warszawa, WNT, 1973.
2. T. Kurasiński, Cz. Kuncewicz: 13<sup>th</sup> European Conference on Mixing, London, April 2009.
3. T. Sandwell, T. David: Geophysical Research Letters, 2, 139 (1987).
4. J. Kamiński: Mieszanie układów wielofazowych, Warszawa, WNT, 2004.
5. A. Kania: Hydrodynamika układu dwufazowego gaz-ciecz w aparatach z mieszadłami samozasysającymi. Praca doktorska. Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2004.
6. T. Kurasiński, Cz. Kuncewicz: Badanie lokalnych objętościowych współczynników wnikania masy dla mieszadeł samozasysających. Praca w przygotowaniu.

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