

Mariusz R. RZAŚA

e-mail: m.rzasa@po.opole.pl

Katedra Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Wyznaczanie masy gazu przedyfundowanej w kolumnie aeracyjnej z zastosowaniem tomografii obrazowej

Wstęp

Wymiana masy między gazem i cieczą jest bardzo istotna z punktu widzenia inżynierii procesowej. Zachodzi ona w wielu procesach chemicznych [Hobler, 1976; Chang i Morsi, 1992]. Ponadto wymiana masy odgrywa ważną rolę w inżynierii środowiska przy napowietrzaniu ścieków lub procesach uzdatniania wody [Zarzycki, 2005]. Zjawisko przenikania gazu do cieczy często zachodzi w obszarach, gdzie występuje dość znaczna turbulencja. Jest to proces bezładnego ruchu cząstek prowadzący do równowagi stężeń, czyli przenoszenia cząsteczek z miejsc o większym stężeniu do miejsc o mniejszym stężeniu. Proces ten zależy od gradientu stężenia i wielkości powierzchni wymiany, a także właściwości gazu i cieczy.

Proces wymiany masy jest opisany prawem Ficka [Callister i Rethwisch, 2005]. Jednym z modeli stosowanych do obliczenia strumienia masy gazu zaabsorbowanego przez ciecz jest model penetracji Higbiego [Maćkowiak, 2011; Asano, 2006]. Zgodnie z nim masę gazu, jaka przeniknie do fazy ciekłej w wyniku dyfuzji można obliczyć z równania [Dobbins, 1956]:

$$m = 2A(C_S - C_0)\sqrt{\frac{Dt_e}{\pi}} \quad (1)$$

gdzie:

- A – powierzchnia wymiany [m^2],
- C_S – stężenie gazu w stanie nasycenia [g/m^3],
- C_0 – początkowe stężenie gazu w cieczy [g/m^3],
- t_e – czas kontaktu elementów cieczy z fazą gazową [s],
- D – kinematyczny współczynnik dyfuzji [m^2/s].

Na wymianę masy, jak wynika z powyższej zależności, istotny wpływ ma wielkość pęcherzyka, a dokładnie jego powierzchnia oraz czas przebywania pęcherzyka w kolumnie aeracyjnej. Te dwa parametry można mierzyć tomografem optycznym. Wyniki uzyskane z równ. (1) mogą służyć do analizy zależności między objętością pęcherzyka gazu i jego prędkością poruszania się w kierunku pionowym.

W niniejszej pracy stosując zaawansowane techniki pomiarowe oparte na tomografii procesowej wyznaczono ilości przedyfundowanego gazu na podstawie obliczeń wynikających z modelu dyfuzji.

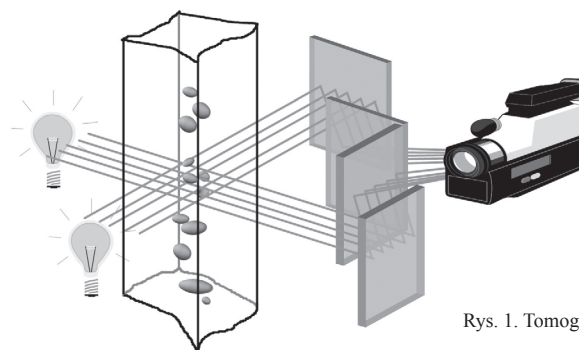
Ponadto w zwrócono uwagę na występowanie optymalnego strumienia gazu dostarczanego do kolumny aeracyjnej pod względem ilości przedyfundowanej masy.

Metoda pomiarowa

Zastosowano system pomiarowy oparty na tomografii obrazowej [Rzasa, 2010], która polega na zastosowaniu metod fotograficznych połączonych z analizą obrazu. W przypadku cyfrowej rejestracji obrazu możliwa jest nie tylko obserwacja przepływu, lecz także wyznaczenie pewnych parametrów poruszających się pęcherzyków gazu. Zalicza się do nich objętość pęcherzyków, powierzchnia, kształt a nawet struktura przepływu. Poza wielkościami geometrycznymi możliwe jest wyznaczenie prędkości poruszania się pęcherzyków oraz ich trajektoria ruchu.

Opracowano metodę wyznaczania trajektorii ruchu pęcherzyków wykorzystując obrazy wideo uzyskane z prześwietlenia przepływu z dwóch prostopadłych kierunków (Rys.1). Na podstawie dwóch półobrazów wyznaczany jest środek masy dla poszczególnych pęcherzyków, które są odpowiednio archiwizowane [Chałubiec i in., 2007]. Kolejne klatki obrazów umożliwiają określenie zwrotu, jak i wartości wektora prędkości poruszającego się pęcherzyka. Na tej podstawie możliwe jest określenie trajektorii ruchu pęcherzyków poruszających się w cieczy.

Przez przybliżenie kształtu pęcherzyka za pomocą znanych figur geometrycznych możliwe jest określenie jego objętości i pola powierzchni [Rzasa, 2011].



Rys. 1. Tomograf obrazowy

Badania procesu wymiany masy

Mechanizm ruchu pęcherzy gazowych

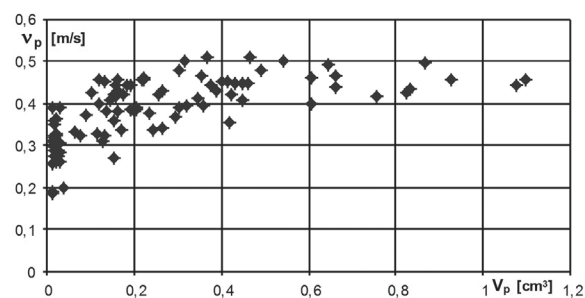
Na proces wymiany masy wpływa prędkość poruszania się pęcherzyka oraz jego pole powierzchni. Określanie prędkości przepływu pęcherzy gazowych w cieczy stanowi złożony problem zarówno z teoretycznego, jak i eksperymentalnego punktu widzenia. Pomimo wielu prac na ten temat zagadnienie to nie jest zadowalająco dobrze rozwiązane. Wynika to ze skomplikowanego mechanizmu ruchu, na który składa się: prostoliniowy, zygzakowaty lub śrubowy tor przepływu pęcherzyka.

Ponadto w zależności od warunków przepływu kształt poruszającego się pęcherzyka ulega ciągłym zmianom w bardzo krótkim czasie. Zmierzenie wszystkich wielkości, jakie mają wpływ na te zmiany jest niemożliwe. Ponadto na trajektorię ruchu pojedynczego pęcherzyka ma wpływ oddziaływanie dużych pęcherzyków poruszających się w jego sąsiedztwie, jak i efekty przyścienne oraz trudne do zdefiniowania pole prędkości płynu opływającego pęcherz [Dziubiński, 2005]. Tomografia obrazowa nie umożliwia wyznaczania wszystkich wymienionych parametrów, jednak jest to metoda pomiarowa umożliwiająca śledzenie zmian kształtu oraz kierunku ruchu pęcherzyków, a następnie na tej podstawie wyznaczenia parametrów procesu wymiany masy.

Przeprowadzono badania doświadczalne wymiany masy między wodą i powietrzem w eksperymentalnej kolumnie aeracyjnej o wymiarach $0,2 \times 0,2 \times 1,4$ m. Powietrze dostarczano za pomocą dyszy o średnicy 1,5 mm umieszczonej w dnie kolumny.

Prędkość poruszania się pęcherzyków

Na rys. 2 przedstawiono wyniki pomiaru średnich prędkości poruszania się pęcherzyków w zależności od ich objętości. Duże pęcherzyki

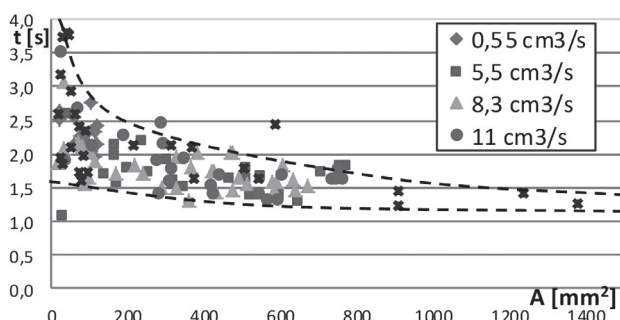


Rys. 2. Zależność prędkości poruszania się pęcherzyków od ich objętości

poruszają się ze zblizoną prędkością, natomiast małe mogą poruszać się dwukrotnie wolniej. Ponadto na uwagę zasługuje duży rozrzut wartości prędkości dla małych pęcherzyków. Spowodowane jest to, tym, że na ich prędkość duży wpływ ma ruch cieczy w ich otoczeniu. Bardzo często małe pęcherzyki poruszają się w sąsiedztwie dużego pęcherzyka porusza się ze zblizoną prędkością, z jaką porusza się duży pęcherzyk. Również obszar, w którym porusza się mały pęcherzyk nie jest bez znaczenia. Ruch strugi pęcherzyków wywołuje cyrkulację cieczy, która niejednokrotnie ma dominujący wpływ na wartość prędkości poruszania się małego pęcherzyka.

Czas przebywania pęcherzyków w cieczy

Na wymianę masy ma wpływ nie tyle prędkość poruszania się pęcherzyka, co czas jego przebywania w cieczy. W tym celu przeprowadzono badania czasu przebywania pęcherzyków w zależności od ich powierzchni (Rys. 3). Podobnie jak w przypadku prędkości poruszania się pęcherzyków również czas przebywania małych pęcherzyków w cieczy posiada znacznie większy rozrzut wartości w stosunku do dużych pęcherzy. Spowodowane jest to ruchem dużych pęcherzyków w sąsiedztwie małych. Wpływ ten jest szczególnie widoczny dla dużych strumieni gazu, np. przy przepływie $22 \text{ cm}^3/\text{s}$, gdzie rozrzut czasu przebywania małych pęcherzyków wynosił od 1,5 do 3,8 s. Nasuwa to wniosek, że istnieje pewien optymalny strumień gazu, dla którego uzyskuje się optymalną wymianę masy.



Rys. 3. Wyniki badania czasu przebywania pęcherzyków w cieczy w zależności od ich powierzchni i strumienia gazu wydostającego się z dyszy

Ilość masy przedyfundowanej do cieczy

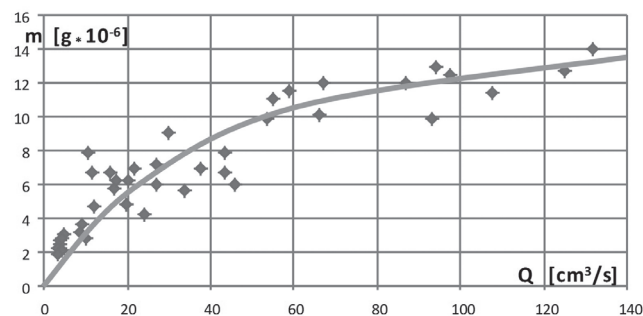
Do wyznaczenia ilości masy przedyfundowanej do cieczy posłużono się zależnością (1), a wartość powierzchni wymiany oraz czas kontaktu były mierzone tomografem obrazowym.

Kinematyczny współczynnik dyfuzji określa ilość składnika dyfundującego przez jednostkową powierzchnię w jednostce czasu, przy jednostkowym gradencie stężenia powodującym dyfuzję. Zależy on od rodzaju dyfundującej substancji, rozpuszczalnika i temperatury, oraz kierunku, w jakim zachodzi dyfuzja. Wartości kinematycznego współczynnika dyfuzji przyjęto na podstawie tabel [Doniec, 2000].

Rozpuszczalność gazu w wodzie przy stałej temperaturze jest proporcjonalna do ciśnienia nad cieczą, gdzie relacje określa prawo Henry'ego -Daltona. W przypadku rozpuszczania mieszaniny gazów w cieczy (np. powietrza w wodzie) prawo to stosuje się oddzielnie do każdego składnika mieszaniny, a ich maksymalna rozpuszczalność jest równa procentowemu udziałowi poszczególnych gazów w mieszczeniu w stosunku do maksymalnej rozpuszczalności pojedynczego gazu. Dla powietrza rozpuszczanego w odstępnej wodzie wodociągowej początkowe stężenie tlenu wynosi około $C_0 = 5,4 \text{ mg/l}$. Maksymalne stężenie tlenu zawartego w powietrzu, który może być rozpuszczony w wodzie o temperaturze 20°C przyjęto jako równe $C_S = 9,2 \text{ mg/l}$

Na rys. 4 przedstawiono wyniki obliczeń masy tlenu, jaki został rozpuszczony w wodzie podczas procesu napowietrzania. Pole powierzchni wymiany oraz czas kontaktu wyznaczono na podstawie danych z tomografu obrazowego.

Czas przebywania pęcherzyka w wodzie określono na podstawie prędkości i trajektorii poruszania się pęcherzyków na odcinku jednego metra. Ilość tlenu, jaki przeniknie do wody na odcinku jednego metra nie wzrasta proporcjonalnie wraz ze wzrostem strumienia gazu. Jest to



Rys. 4. Ilość masy gazu, jaka przenika do wody na odcinku jednego metra dla różnych strumieni gazu

spowodowane tym, że dla dużych strumieni gazu pęcherzyki łączą się ze sobą w większe aglomeraty. Pole powierzchni takiego aglomeratu jest znacznie mniejsze niż łączne pole powierzchni wszystkich pęcherzyków, z których on powstał. Ponadto prędkości poruszania się dużych pęcherzyków są znacznie większe, co skraca czas przebywania pęcherzyka w cieczy. Wszystko to powoduje zmniejszenie skuteczności wymiany masy.

Należy przy tym wspomnieć o bardzo małych pęcherzykach, które powstają przy rozpadzie dużych pęcherzy. W przepływach, w których nie zachodzi lub zachodzi bardzo rzadko rozpad pęcherzy nie występują małe pęcherzyki. Małe pęcherzyki poruszają się stosunkowo wolno, a stosunek ich objętości do powierzchni jest bardzo korzystny. W przepływach o dużym natężeniu gazu jest ich bardzo dużo i to one kompensują straty wynikające z powstawania dużych aglomeratów. Jednak nie kompensują tego w pełni, gdyż ilość masy tlenu rozpuszczonego w wodzie nie rośnie liniowo wraz z przyrostem strumienia gazu. Wynika stąd wniosek, iż istnieje optymalna wartość strumienia gazu z punktu widzenia stopnia wymiany masy w stosunku do ilości wprowadzonego gazu.

Podsumowanie

Stosując zaawansowane techniki pomiarowe oparte na tomografii procesowej można wyznaczyć ilości przedyfundowanego gazu na podstawie obliczeń wynikających z modelu dyfuzji.

Dzięki uzupełnieniu danych do obliczeń o wyniki pomiarów można znacznie precyzyjniej określić wymianę masy niż stosując jedynie zależności empiryczne.

LITERATURA

- Asano K., 2006. *Mass Transfer from fundamentals to modern industrial applications*, Wiley-VCH, Weinheimy
- Callister W.D., Rethwisch D.G., 2005. *Foundations of materials science and engineering an integrated approach*, Wiley & Sons
- Chang M.Y., Morsi B., 1992. Solubility and mass transfer coefficients of carbon monoxide in a gas-inducing reactor operating with organic liquids under high pressures and temperatures. *Chem. Eng. Science*, **47**, 3541-3548. DOI: 10.1016/0009-2509(92)85068-M
- Chałubiec J., Rząsa M.R., Tomczak Ł., 2007. Metoda rekonstrukcji kształtu pęcherzy gazu w kolumnie aeracyjnej. *Inż. Ap. Chem.*, **46**, nr 4-5, 24-29
- Dobbins W.E., 1956. *The nature of the oxygen transfer coefficients in aeration system: Biological treatment of sewage and industrial wastes*. Reinhold Pub. Co., New York
- Dziubiński M., 2005. *Hydrodynamika przepływu mieszanin dwufazowych gaz – ciecz*. Wyd. Pol. Łódzkiej, Łódź
- Hobler T., 1976. *Dyfuzyjny ruch masy i absorberzy*. WNT, Warszawa
- Maćkowiak J., 2011. Model for the prediction of liquid phase mass transfer of random packed columns for gas-liquid systems. *Chem. Eng. Res. Design*. **89**, 1308-1320. DOI: 10.1016/j.cherd.2011.01.021
- Rząsa M. R., 2010. Identyfikacja przepływu pęcherzyków powietrza za pomocą tomografii optycznej – przegląd metod. *Inż. Ap. Chem.*, **49**, nr 2, 107-108
- Rząsa M. R., 2011. *Komputerowa tomografia obrazowa w zastosowaniu do pomiaru parametrów pęcherzyków gazu*. Metrologia Wspomagana Komputerowo, IX Szkoła-Konferencja, Waplewo 24-27 maja
- Zarzycki R., 2005. *Wymiana ciepła i ruch masy w inżynierii środowiska*. WNT, Warszawa
- Doniec A. (red.), 1981. *Zbiór danych do obliczeń z inżynierii chemicznej*. Wyd. Pol. Łódzkiej, Łódź (05.2013): <http://wipos.p.lodz.pl/baza/spis07.html>