

Krzysztof CZERNEK, Gabriel FILIPCZAK, Stanisław WITCZAK

e-mail: k.czernek@po.opole.pl

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Zastosowanie nieinwazyjnych technik rozpoznawania przepływów dwufazowych

Wstęp

Przepływ dwufazowy gaz-ciecz z udziałem cieczy o dużej lepkości jest zjawiskiem występującym w wielu układach technologicznych realizowanych we współczesnym przemyśle, zarówno w odniesieniu do procesów transportu jak i przetwarzania substancji ciekłych. Jako przykład można wymienić tu przemysły: chemiczny, petrochemiczny czy też spożywczy, w których znaczna ilość procesów zachodzi w dwufazowych układach gaz-ciecz. Wynikająca z istoty tych procesów jednoczesna obecność faz gazowej i ciekłej o dużej lepkości, stwarza wiele trudności w zapewnieniu odpowiednich warunków działania różnego rodzaju aparatów. Jako przykład można wymienić tu wymienniki ciepła czy wyparki, w których realizuje się procesy wymiany pędu, ciepła i masy. Głównych przyczyn pojawiających się problemów eksploatacyjnych należy upatrywać w dużej stochastyczności przepływu dwufazowego gaz-ciecz. W zakresie tego typu przepływu – w zależności od udziału strumieni faz ciekłej i gazowej, a także właściwości fizycznych składników mieszaniny – mogą pojawiać się różne struktury przepływu, od stabilizacji których w dużej mierze zależy utrzymanie właściwych parametrów procesowych wzdłuż drogi przepływu.

Dużego znaczenia nabierają takie rozwiązania, które zapewniają prawidłowe działanie aparatury, a jednocześnie, pozwalają eliminować związane z przebiegiem procesów niekorzystne zjawiska. Do zjawisk tych można zaliczyć powstawanie osadów na powierzchniach rur grzejnych wymienników i wyparek, pienienie się cieczy, niestabilność powierzchni międzyfazowej itp. Korzystne są takie rozwiązania, które pozwalają na zmniejszenie wymiarów aparatów. Jedną z dróg poszukiwania takich rozwiązań jest wskazywanie na możliwość realizacji procesów technologicznych przy ściśle określonym reżimie przepływu, a co za tym idzie - wskazywanie na możliwość prowadzenia procesów wymiany ciepła lub masy w najbardziej efektywnym zakresie przepływu. W tej mierze zwłaszcza. W aspekcie procesów wymiany ciepła i masy duże korzyści uzyskuje się podczas przepływu pierścieniowego [Troniewski i in., 2006; Czernek i in., 2008; Czernek, 2013]. W tym przepływie ciecz płynie cienką warstwą po ścianie kanału, a gaz z dużą prędkością jego środkiem.

Cienka warstwa cieczy (film cieczy) może być wytwarzana w różny sposób, np. ze względu na sposób rozprowadzenia cieczy po powierzchni grzejnej aparatów wyparnych Czernek [2013] wskazuje trzy podstawowe sposoby: statyczny, mechaniczny i hydrauliczny. W tym ostatnim przypadku wytwarzanie filmu cieczy polega na jednoczesnym doprowadzeniu do kanału grzejnego cieczy i gazu (pary tej cieczy lub gazu inertnego) w ilościach zapewniających powstanie przepływu pierścieniowego oraz prowadzeniu procesu w taki sposób, aby ten rodzaj przepływu utrzymać na całej długości kanału grzejnego [Czernek i in., 2013].

Niezależnie od sposobu wytworzenia strugi dwufazowej gaz-ciecz, w kanałach przepływowych mogą pojawiać się różne struktury [Czernek i in., 2008]. Forma i rodzaj tych struktur zależą od strumieni faz, geometrii kanału przepływowego, jego konfiguracji (pionowy, poziomy i in.), a także właściwości fizykochemicznych składników mieszaniny dwufazowej, zwłaszcza fazy ciekłej.

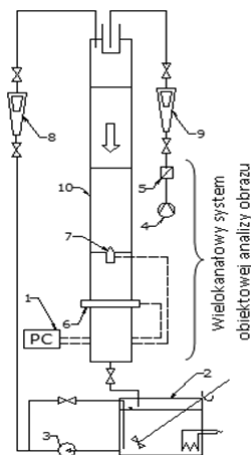
Metodyka prowadzenia pomiarów

Systematyki struktur dokonuje się z reguły w oparciu o obserwację wizualną płynącej mieszaniny. W przypadku, gdy obserwacja taka jest niemożliwa, stosuje się różnego rodzaju układy wizyjne,

gdzie wykorzystuje się niekonwencjonalne techniki obserwacyjne, w tym m.in.: specjalne układy fototechniczne [Alekseenko i in., 2009, Clayton i in., 2012], jedno- lub wielostrefowe zdejmowanie obrazów w przekroju poprzecznym strugi [Bin i in., 2006, Celata i in., 2007], fotografowanie z wykorzystaniem wiązki promieni X, γ lub β [Boden i in., 2008, Heindel i in., 2008], tomografię komputerową [Deng i in., 2001, Inada i in., 2004] czy też fotografowanie holograficzne [Jong i in., 2010].

Przykładem nowoczesnych układów pomiarowych mogą być także urządzenia optoelektroniczne wykorzystywane w realizacji własnych badań doświadczalnych.

Schemat ogólny stanowiska doświadczalnego wykorzystywanego do badań pierścieniowego przepływu dwufazowego gaz-ciecz bardzo lepka przedstawiono na rys. 1.



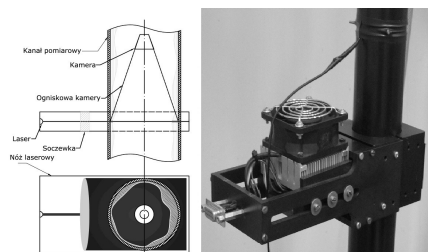
Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1-komputer PC, 2-zbiornik oleju z mieszadłem i grzałką, 3-pompa oleju, 4-sprężarka powietrza, 5-reduktor ciśnienia, 6-nóż laserowy, 7-kamera, 8-zestaw rotametrów oleju, 9-zestaw rotametrów powietrza, 10-kanał pomiarowy z nożem laserowym [Czernek i Witczak, 2013]

Jako czynniki robocze wykorzystywano powietrze oraz oleje masyne o różnym zakresie współczynnika lepkości. Strumienie gazu i cieczy dobierano w takich ilościach, aby dla wytworzonej mieszaniny uzyskać pierścieniową formę przepływu dwufazowego gaz-ciecz. Celem uzyskania szerokiego zakresu zmian wartości lepkości oleju, badania hydrodynamiki przepływu prowadzono w zakresie temperatury (0÷40)°C, przy którym wartości dynamicznego współczynnika lepkości oleju zawierały się w zakresie 90÷4000 mPa·s.

Wielokanałowy system obiektywnej analizy obrazu, jako zintegrowany układ pomiarowy, umożliwiał dokonywanie oceny hydrodynamiki strugi dwufazowej w odniesieniu do pełnego przekroju kanału (Rys. 2).

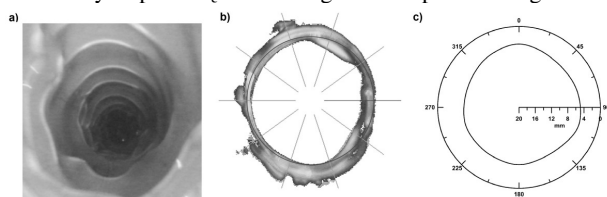
W swej zasadniczej części system ten stanowi optoelektroniczny układ rejestracji i analizy obrazu, oparty na zasadzie tłumienia wiązki światła w fazie ciekłej. Sygnał wiązki światła skupionej na przekroju poprzecznym kanału zintegrowano z endoskopową kamerą cyfrową umieszczoną w osi kanału pomiarowego.

System taki, oparty jest o zasadę działania tzw. noża laserowego i polega na rejestracji obrazu widocznego w płaskiej wiązce światła, skupionej w płaszczyźnie poprzecznej kanału wraz z adjustacją tego obrazu, wynikającą z zastosowanego tzw. dachowego układu optycznego, umożliwiającą identyfikację powierzchni międzyfazowej na całym obwodzie kanału.



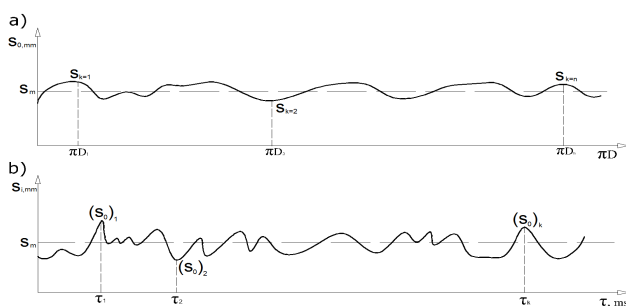
Rys. 2. Schemat obrazujący zasadę działania noża laserowego i jego widok [Czernek i Witczak, 2013]

Zastosowany interfejs pomiarowy umożliwił przy tym sterowanie parametrami rejestracji obrazu oraz ich archiwizację, dostosowaną do możliwości systemu pomiarowego. Na rys. 3, tytułem przykładu, przedstawiono kilka możliwych do uzyskania obrazów warstewki cieczy za pomocą omawianego układu pomiarowego.



Rys. 3. Obraz struktur przepływu: a) kamera endoskopowa, b) nóż laserowy, c) odwzorowanie za pomocą układu pomiarowego

Posiadanie odpowiedniego oprogramowania interfejsu umożliwia ocenę *on-line* parametrów pomiarowych, tak jak to przedstawiono przykładowo na rys. 4.

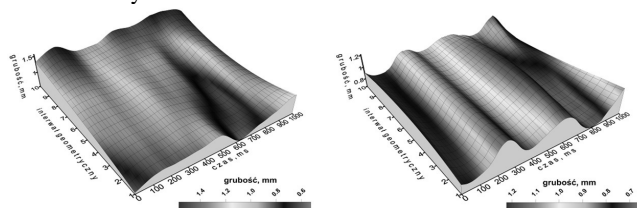


Rys. 4. Interpretacja parametrów przepływu: a) rozkład grubości filmu w przekroju poprzecznym, b) odwzorowanie grubości i stanu powierzchni międzyfazowej wzdłuż osi przepływu

Uzyskiwane wg tej metodyki wyniki odzwierciedlały obliczeniowy rozkład danych pomiarowych zarejestrowanych dla całego interwału, zarówno geometrycznego jak i czasowego. Tak zebrane dane umożliwiały dalsze przeliczenia parametrów hydrodynamicznych charakteryzujących przepływ pierścieniowy olej-powietrze.

Analiza wyników badań

W celu zobrazowania zmian zachodzących na powierzchni filmu cieczy na rys. 5 przedstawiono obrazy płaszczyznowe tej powierzchni, w rozwinięciu na obwód kanału (interwał geometryczny). Obrazy te odzwierciedlają formę przepływu pierścieniowego oraz wskazują na zmianę grubości spływającego filmu, odniesioną do stanów lokalnych.



Rys. 5. Rozwinięcie powierzchni międzyfazowej i rozkład grubości warstewki oleju wzdłuż drogi przepływu: film gładki i mocno zafalowany

Z przedstawionych wykresów wynika, że niezależnie od formy przepływu, charakter zmiany grubości przepływającego filmu cieczy

jest silnie zróżnicowany, co jest szczególnie charakterystyczne dla struktur hydraulicznych. W odniesieniu do pozostałych form przepływu, tendencja ta jest mniej znacząca. Szczególnym przypadkiem są symetryczne struktury zafalowane, dla których tendencja ta jest regularna, z dającą się jednoznacznie zidentyfikować amplitudą i wysokością tworzących się fal.

Podsumowanie

Uzyskane wyniki potwierdzają, że dwufazowy przepływ gaz-ciecz bardzo lepka jest niezwykle złożonym zjawiskiem hydrodynamicznym, z wielowymiarową asymetrią filmu cieczy. Zjawiska przepływowe mają charakter stochastyczny, a ich skala, w zależności od warunków przepływu, jest bardzo zróżnicowana. Jest to szczególnie widoczne w mocno zafalowanych i hydraulicznych formach przepływu, w zakresie których grubość filmu cieczy może być bardzo silnie zmienna po obwodzie kanału oraz wzdłuż drogi przepływu.

W konsekwencji pociąga to za sobą występowanie zmiennych warunków hydrodynamiki przepływu dwufazowego objawiających się występowaniem zróżnicowanego udziału faz wzdłuż drogi przepływu oraz zróżnicowanej powierzchni międzyfazowej.

Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowana metodyka pomiaru identyfikacji parametrów filmu cieczy w przepływie dwufazowym gaz-ciecz może być z powodzeniem wykorzystana do oceny powierzchni międzyfazowej na całej długości rur danego aparatu, co ma istotne znaczenie dla realizacji wielu operacji jednostkowych związanych z wykorzystaniem aparatów warstewkowych w procesach wymiany ciepła lub masy.

LITERATURA

- Alekseenko S., Antipin V., Cherdantsev A., Kharlamov S., Markovich D., (2009). Two wave structure of liquid film and wave interrelation in annular gas-liquid flow with and without entrainment. *Phys. Fluids*, 21(6), 061701.1-061701.4. DOI: 10.1063/1.3151999
- Bin S., Hongjian Z., Lu C., Yuxiao Z., (2006). Flow Regime Identification of Gas-liquid Two-phase Flow Based on HHT. *Chinese J. Chem. Eng.*, 14(1), 24-30. DOI: 10.1016/S1004-9541(06)60033-5
- Boden S., Bieberle M., Hampel U., (2008). Quantitative measurement of gas hold-up distribution in a stirred chemical reactor using X-ray cone-beam computed tomography. *Chem. Eng. J.*, 139(2), 351-362. DOI: 10.1016/j.cej.2007.08.014
- Celata G.P., D'Annibale F., Di Marco P., Memoli G., Tomiyama A., (2007). Measurements of rising velocity of a small bubble in a stagnant fluid in one- and two-component systems. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 31(6), 609-623. DOI: 10.1016/j.expthermflusc.2006.06.006
- Clayton T., Crowe C., Sommerfeld M., Tsuji Y., (2012). *Multiphase flows with droplets and particles*. CRC Press Taylor&Francis, New York
- Czernek K., (2013). *Hydrodynamiczne aspekty projektowania aparatów cienkowarstewkowych dla cieczy bardzo lepkich*. Studia i monografie, z.347, Wyd. Pol. Opolskiej, Opole
- Czernek K., Filipczak G., Witczak S., (2008). Dynamika pierścieniowego dwufazowego przepływu gazu i cieczy bardzo lepkiej. *Przem. Chem.*, 87(2), 105-110
- Czernek K., Witczak S., (2013). Non-invasive evaluation of wavy liquid film. *Chem. Proc. Eng.*, 34, 241-252. DOI: 10.2478/cpe-2013-0020
- Deng X., Dong F., Xu L.J., Liu X.P., Xu L.A., (2001). The design of a dual-plane ERT system for cross correlation measurement of bubbly gas/liquid pipe flow. *Meas. Sc. Tech.*, 8, 1024-1031
- Heindel T.J., Gray J.N., Jensen T.C., (2008). An X-ray system for visualizing fluid flows. *Flow Meas. Instr.*, 19(2), 67-78. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2007.09.003
- Inada F., Drew D.A., Lahey R.T., (2004). An analytical study on interfacial wave structure between the liquid film and gas core in a vertical tube. *Int. J. Mult. Flow*, 30(7-8), 827-851. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2004.03.002
- Jong J., Salazar J.P.L.C., Woodward S.H., Collins L.R., Meng H., (2010). Measurement of inertial particle clustering and relative velocity statistics in isotropic turbulence using holographic imaging. *Int. J. Mult. Flow*, 36(4), 324-332. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2004.03.002
- Troniewski L., Witczak S., Czernek K., (2006). Hydrodynamics and heat transfer during two-phase gas-high viscous liquid flow in film reactor. *Chem. Proc. Eng.*, 27, 1341-1359