

GRZEGORZ LIGUS
ROMAN ULBRICH

Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

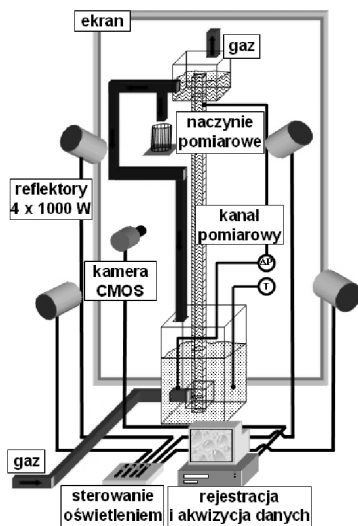
Badania indukowanego przepływu dwufazowego w pompie aeracyjnej

Wprowadzenie

Przepływ dwufazowy gaz – ciecz występujący podczas pracy pompy aeracyjnej jest szczególnym przypadkiem przepływu w przewodzie pionowym. Ze względu na indukowany przez fazę gazową ruch fazy ciekłej, pełna analogia tego przypadku z klasycznym przepływem w kanale pionowym nie jest możliwa. Hydrodynamika indukowanego przepływu gaz – ciecz w pompie aeracyjnej, charakteryzuje się trudnymi w identyfikacji heterogenicznymi strukturami przepływu [1] oraz występowaniem lokalnych cyrkulacji fazy ciekłej w kanale. W odniesieniu do pompy aeracyjnej jako aparatu przepływowego parametrem często korelowanym z innymi charakterystykami jest całkowity spadek ciśnienia [2]. Określenie jego wartości jest istotne z punktu widzenia zarówno konstruktora jak i eksploatatora aparatu, gdyż parametr ten uwzględnia się zarówno przy doborze układu zasilania jak i optymalnych parametrów pracy układu.

Stanowisko badawcze

Prowadzenie badań z zakresu hydrodynamiki przepływów dwufazowych z wykorzystaniem metod wizualizacyjnych, wymagało zaprojektowania i skonstruowania odpowiedniego stanowiska pomiarowego (Rys. 1). Koncepcję pompy aeracyjnej w formie kanału prostokątnego, pełniącego rolę rury wznoszącej zaproponowano ze względu na fakt iż tego typu geometria nie wprowadza liniowych zniekształceń rejestrowanego obrazu przepływu. Kanał o wymiarach wewnętrznych 35×20×2045 mm, podzielono na cztery segmenty i wykonano z pleksiglasu. Pierwszy segment stanowił króciec wlotowy z dystrybutorem gazu w postaci komory mieszalnikowej. Następnie, w zależności od żądanej wysokości podnoszenia, rurę wznoszącą tworzą: jeden lub dwa segmenty prostopadłościennych. Ostatnim elementem jest segment pełniący rolę króćca wylotowego (kolanowy i przelewowy). Tor optyczny stanowiska tworzyły ustawione osiowo: szybka kamera CMOS o częstotliwości rejestracji do 2000 Hz, kanał pomiarowy oraz ekran z tkaniny. Oświetlenie obserwowanej części

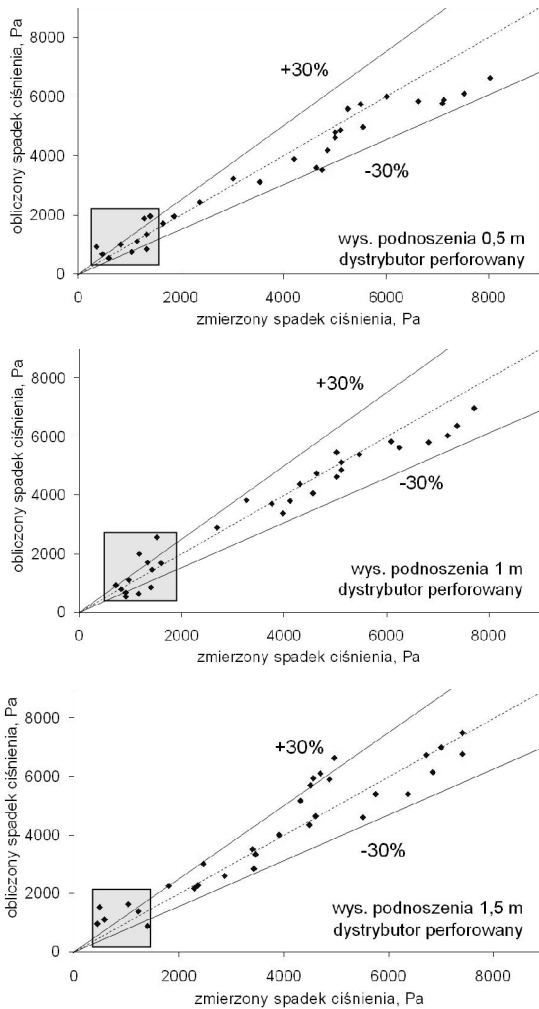


Rys. 1. Schemat stanowiska do badań przepływu indukowanego

ci rury wznoszącej realizowano metodą jasnego pola dzięki światłu emitowanemu przez dwie pary reflektorów halogenowych o mocy 1000 W każdy. Rejestrację kamerą CMOS w rozdzielczości 1024×256 pikseli wykonywano z dwoma częstotliwościami: 260 Hz dla wolno zachodzących zjawisk przepływowych i 465 Hz dla szybko zachodzących zjawisk przepływowych.

Wyniki analiz

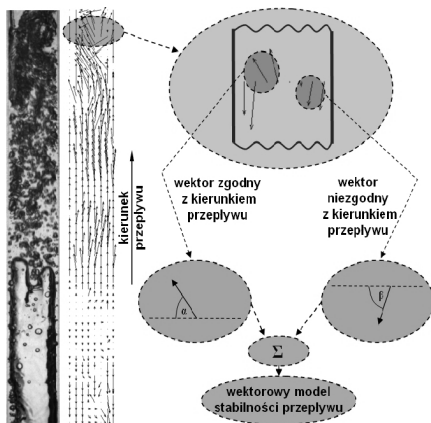
Określanie oporów przepływu mieszaniny dwufazowej w pompie aeracyjnej jest problematyczne, ponieważ w przypadku tym przepływ fazy gazowej stanowi jedyne źródło napędowe transportowanej mieszaniny dwufazowej. Wyznaczenie spadków ciśnienia odbyło się w oparciu o metodę *Lockharta-Martinelliego* [3] dającą satysfakcjonujące wyniki dla przepływu mieszaniny dwufazowej, w której fazę gazową stanowi powietrze atmosferyczne a ciekłą – woda i obejmuje szeroki zakres przepływowy niezależnie od struktur przepływu, które się wówczas tworzą. Ma to kluczowe znaczenie w takim aparacie jak pompa aeracyjna, w którym mamy do czynienia z silnie turbulentnymi i zniekształconymi strukturami przepływu, w znacznym zakresie pracy urządzenia. Na rys. 2 przedstawiono porównanie wyników pomiarów i obliczeń spadków ciśnienia. Można zauważyć, iż największe rozbieżności występują w początkowym reżimie pracy pompy aeracyjnej. Jest to spowodowane niewielkimi strumieniami fazy ciekłej opuszczającej rurę wznoszącą. Natura transportu cieczy w pompie aeracyjnej powoduje, iż do osiągnięcia początkowej prędkości transportu, ciecz krąży w rurze wznoszącej nie opuszczając jej (jak miałoby to miejsce podczas tradycyjnego przepływu przez rurociąg czy inny aparat przepływowy). Wspomniane rozbieżności modelu obliczeniowego należy uznać za odzwierciedlenie tworzącej się wówczas cyrkulacji wewnętrznej. Założyć można, iż niezgodności tego typu znikają w chwili rozpoczęcia efektywnego procesu unoszenia cieczy, jednak przy szczegółowej analizie zjawiska należy wyszczególnić porcje cieczy cyrkulujące w rurze wznoszącej w wyniku splotu filmu fazy ciekłej po ścianach kanału również przy w pełni wykształconym transporcie cieczy jako wyniku tłokowego charakteru przepływu w pompie aeracyjnej. Poza powyższymi obszarami, w pozostałych zakresach pracy urządzenia, zgodność obliczonych i zmierzonych spadków ciśnienia jest akceptowalna i nie przekracza przyjętej w literaturze 30% granicy błędów względnego. Występowaniem charakterystycznej dla przepływu indukowanego w pompie aeracyjnej cyrkulacji wewnętrznej fazy ciekłej jest również uzależnione od wysokości podnoszenia cieczy. W celu przekroczenia granicy oddziaływań indukowanych przy wroście wysokości podnoszenia, przyrost wartości strumienia zasilającego układ



Rys. 2. Wpływ cyrkulacji wewnętrznej na spadki ciśnienia podczas przepływu

fazy gazowej musi uwzględnić wydłużoną drogę porcji cieczy w rurze wznoszącej.

Wysoka wydajność transportu cieczy nie zawsze wiąże się z zapewnieniem ciągłości w jej dostarczaniu na zadaną wysokość podnoszenia [4]. Często transport cieczy w pompie aeracyjnej ma charakter tłokowy, a porcje cieczy są rozdzielone porcjami fazy gazowej, zapewniającej im moment napędowy [5]. Przeprowadzone badania umożliwiły wzbogacenie opisu hydrodynamiki pracy pompy aeracyjnej o wektorowy model stabilności transportu cieczy. Zauważono, iż dla procesu uno-



Rys. 3. Wektorowy model stabilności przepływu w pompie aeracyjnej

szenia cieczy w pompie aeracyjnej można wyznaczyć funkcję opisującą charakter chwilowych zmian wydajności, zwaną współczynnikiem stabilności pracy pompy aeracyjnej (Rys. 3). Określa on zdolność pompy aeracyjnej do zachowania ciągłości transportu strugi cieczy. Chwilowe fluktuacje ilości cieczy transportowanej w aparacie, są determinowane zaburzeniami profilów prędkości wywołanych przez nie kontrolowane ruchy porcji cieczy w rurze wznoszącej aparatu. Bazując na powyższych założeniach zaproponowano opis współczynnika stabilności transportu cieczy korelując położenie geometryczne wektorów prędkości z wartościami prędkości do nich przypisanymi, uzyskanymi z wykorzystaniem algorytmów cyfrowej anemometrii obrazowej (DPIV). Ostatecznie dla wektorów α skonstruowano następującą zależność empiryczną:

$$S_{\alpha} = \sqrt{\frac{\text{tg}\alpha \cdot v_w}{v_w + \text{tg}\alpha \cdot v_w}} \quad (1)$$

gdzie:

α – wartość kąta utworzonego przez wektor z pionowym kierunkiem transportu cieczy, [°],

v_w – wartość wektora prędkości, [m/s],

i analogicznie dla wektorów β zależność poniższą:

$$S_{\beta} = \frac{\text{ctg}\beta \cdot v_w}{v_w + \text{ctg}\beta \cdot v_w} \quad (2)$$

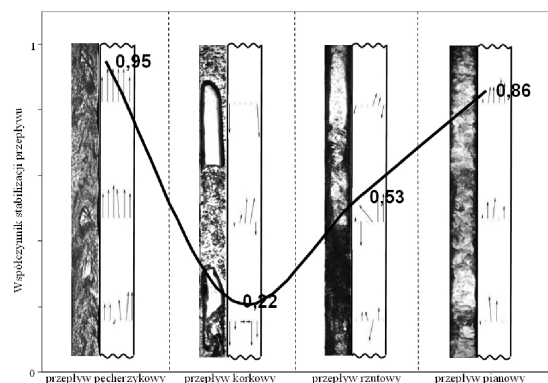
gdzie:

β – wartość kąta utworzonego przez wektor z pionowym kierunkiem transportu cieczy, [°],

v_w – wartość wektora prędkości, [m/s].

Ze względu na ilościową przewagę wektorów α w profilach prędkości mieszaniny podczas transportu w pompie aeracyjnej, dla uwypuklenia ich dominującej roli równanie (1) przyjęto, że ma charakter pierwiastkowy. Nieokreślony wynik funkcji $\text{tg } 90^\circ$ i $\text{ctg } 0^\circ$ oraz wartość równą 0 dla funkcji $\text{tg } 0^\circ$ i $\text{ctg } 90^\circ$ prowadzą do założenia, iż kąty α i β nie mogą przybierać wartości 0° i 90° . Dla przypadków gdy analizowany kąt przybiera taką wartość, przyjęto podstawienie wartości korygującej, równej odpowiednio 1° i 89° , co czyni możliwym prowadzenie obliczeń według proponowanej metody. Całkowity współczynnik stabilności transportu pneumatycznego cieczy (S) będzie wypadkową współczynników otrzymanych dla wektorów α i β :

$$S = \frac{1}{N} \sum_i S_{ij}, \quad j = \{\alpha, \beta\} \quad (3)$$



Rys. 4. Współczynnik stabilności przepływu dla obserwowanych reżimów pracy pompy aeracyjnej

Jak wynika z rys. 4 największe wartości współczynnika stabilności przepływu wyznaczono dla przepływów pęcherzykowych i pianowych. Oczywiście ilość transportowanej cieczy przy tych dwóch typach przepływu dwufazowego jest odmienna, jednakże zaproponowany model stabilności nie różnicuje transportu cieczy w dziedzinie jego wydajności a jedynie określa niezmienność przepływu elementarnych porcji cieczy w czasie.

Wnioski

Zjawiska związane z indukowaniem przepływu fazy gazowej w pompie aeracyjnej odgrywają istotną rolę w ocenie pracy aparatu i powinny być uwzględniane jako składowa opisu hydrodynamiki przepływu dwufazowego. Wykorzystanie technik wizualizacyjnych do wyznaczenia wektorowego pola prędkości transportowanej mieszaniny gaz – ciecz umożliwia

ocenę stabilności transportu cieczy. Zmiany ciągłości przemieszczania się elementarnych porcji cieczy, wynikające z reżimu pracy aparatu, mają odzwierciedlenie w zaburzeniach profilu prędkości mieszaniny, który może być podstawą w interpretacji zjawisk niestabilności przepływu w rurze wznoszącej pompy aeracyjnej.

LITERATURA

1. *A. Tramba, A. Topalidou, E.G. Kastrinakis, S.G. Nychas*: Canadian Journal of Chemical Engineering, **73**, nr 5, 765 (1995).
2. *G. Hetsroni*: Handbook of multiphase systems, Cambridge, McGraw Hill, 1985.
3. *M. Dziubiński*: Hydrodynamika przepływu mieszanin dwufazowych ciecz-gaz, Łódź Politechnika Łódzka – Monografie, 2005.
4. *F. Lawniczak, P. Francois, O. Scrivener, E.G. Kastrinakis, S.G. Nychas*: Canadian Journal of Chemical Engineering, **77**, nr 1, 3 (1999).
5. *G.K. Awari, L.B. Bhuyar, D.G. Wakde*: Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering, **29**, nr 3 (2007).