

Paweł SOBIESZUK

e-mail sobieszuk@ichip.pw.edu.pl

Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Warszawska, Warszawa

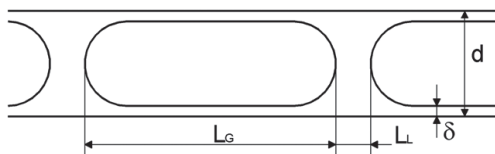
Analiza wykorzystania powierzchni międzyfazowej w przepływie *Taylora* w mikrokanalach gaz – ciecz i ciecz – ciecz

Wstęp

Mikroreaktory heterofazowe gaz – ciecz i ciecz – ciecz są szeroko badane i coraz częściej stosowane. Ich podstawową zaletą jest bardzo duża powierzchnia międzyfazowa, nawet rzędu $10\,000\text{ m}^2/\text{m}^3$. Ponadto ich rozmiar charakterystyczny zawarty w przedziale od $10\ \mu\text{m}$ do 1 mm powoduje występowanie dużych gradientów stężeń i temperatury. Obie te cechy intensyfikują wymianę masy, w szczególności w układach wielofazowych. Hydrodynamika tych układów różni się od hydrodynamiki aparatów większych. Najpopularniejszym reżimem przepływu jest przepływ *Taylora* cechujący się dużą stabilnością. W pracy przedstawiono analizę możliwości wykorzystania całej powierzchni międzyfazowej w przepływie *Taylora* w układach ciecz – gaz i ciecz – ciecz.

Przepływ *Taylora* w układzie ciecz – gaz

Schemat przepływu *Taylora* przedstawiono na rys. 1. Wielkościami charakterystycznymi tego reżimu hydrodynamicznego są: długość pęcherza gazowego (L_G), długość mostka cieczy (L_L) oraz grubość filmu cieczy (δ). Średnicę mikrokanalu oznaczono jako d .

Rys. 1. Schemat przepływu *Taylora*

Występujący film cieczy jest bardzo cienki i ma niewielką objętość. W związku z tym w przypadku absorpcji fizycznej może dojść do jego nasycenia absorbowanym gazem lub w przypadku absorpcji chemicznej – do wyczerpania składnika reagującego z cieczą. Jednocześnie powierzchnia międzyfazowa związana z filmem może stanowić nawet 90% całkowitej powierzchni międzyfazowej. Istnieje zatem możliwość drastycznego zmniejszenia powierzchni kontaktu faz. *Pohorecki* [2007] zaproponował kryterium wykorzystania powierzchni międzyfazowej w przepływie *Taylora* w następującej postaci

$$\frac{L_G D}{u_{TP} \delta^2} \ll 1 \quad (1)$$

gdzie:

 D – dyfuzyjność, u_{TP} – prędkość pozorna przepływu dwufazowego.

W niniejszej pracy przeprowadzono obliczenia wartości kryterium (1) stosując etanol jako fazę ciekłą. Długości pęcherzy gazowych obliczono z korelacji [*Sobieszuk, 2010*]:

$$\frac{L_G}{d} = 1,3 \varepsilon_G^{0,07} (1 - \varepsilon_G)^{-1,01} We^{-0,1} \quad (2)$$

gdzie:

 ε_G – zatrzymanie gazu, We – liczba *Webera* dla fazy ciekłej ($We = u_{TP}^2 dp/\sigma$), ρ – gęstość σ – napięcie powierzchniowe.

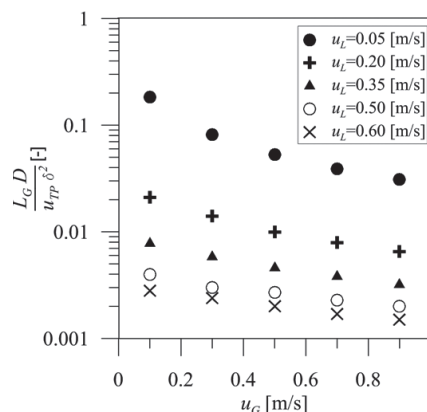
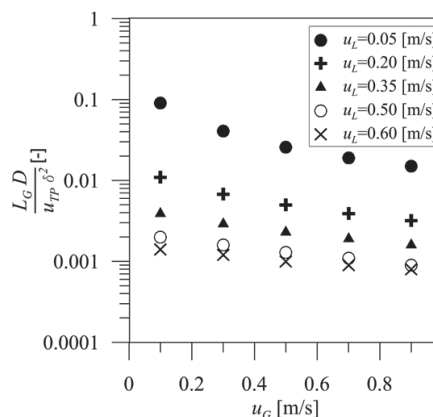
Grubość występującego filmu została obliczona z korelacji [*Aussilous i Querre, 2000*]:

$$\frac{\delta}{d} = 0,25 Ca^{0,5} \quad (3)$$

gdzie:

 Ca – liczba kapilarna dla cieczy ($Ca = u_{TP} \mu/\sigma$), μ – lepkość dynamiczna.

Założono średnicę mikrokanalu $0,0004\text{ m}$ lub $0,0008\text{ m}$. W obliczeniach przyjęto wartości prędkości pozornej gazu ($u_G = 0,1 \div 0,9\text{ m/s}$) i cieczy ($u_L = 0,05 \div 0,6\text{ m/s}$). Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 2 ($d = 0,0004\text{ m}$) i rys. 3 ($d = 0,0008\text{ m}$). Jak widać we wszystkich wariantach kryterium (1) jest spełnione i cała powierzchnia międzyfazowa w przepływie *Taylora* gaz – ciecz powinna brać udział w procesie absorpcji. Wniosek ten został potwierdzony doświadczalnie w literaturze [*Yue i in., 2007; Sobieszuk, 2011*]. W cytowanych pracach przedstawiono pomiary powierzchni międzyfazowej, z których wynika, że nie obserwuje się nasycania cieczy w filmie. Zmierzona powierzchnia międzyfazowa ma wartości zbliżone do oczekiwanych na podstawie kształtu i wielkości pęcherzy gazowych.

Rys. 2. Graficzna prezentacja wyników obliczeń kryterium (1), w układzie ciecz – gaz, $d = 0,0004\text{ m}$ Rys. 3. Graficzna prezentacja wyników obliczeń kryterium (1), w układzie ciecz-gaz, $d = 0,0008\text{ m}$

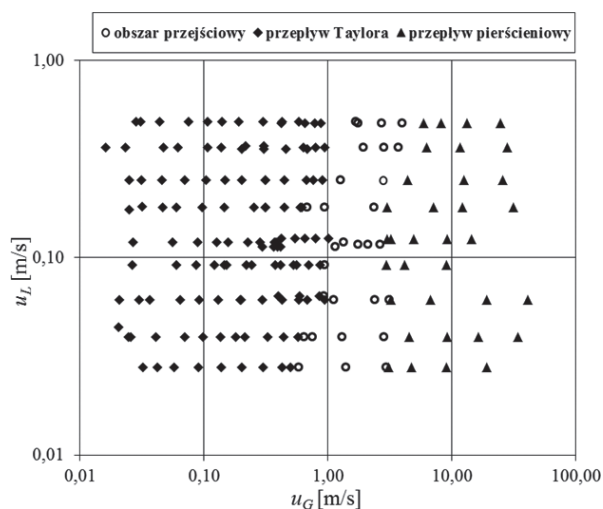
W celu sprawdzenia kiedy może dojść do nasycenia filmu cieczy przeprowadzono obliczenia dla mikrokanalu o średnicy $0,0005\text{ m}$ i rozważanego wyżej układu fizykochemicznego. W rozważaniach dobrano prędkości pozorne gazu i cieczy, aby w uzyskanych warunkach hydrodynamicznych kryterium (1) nie było spełnione. Wyniki obliczeń przedstawiono w tab. 1. Jak widać możliwe jest, że kryterium (1) przyjmie wartość >1 dla systemu gaz – ciecz. Sytuacja taka występuje, gdy prędkość

kości przepływu mediów są bardzo niewielkie. Jednakże w tym przypadku nie można określić charakteru przepływu.

Tab. 1. Warunki hydrodynamiczne, w których kryterium (1) nie jest spełnione

u_L [m/s]	u_G [m/s]	$\frac{L_K D}{u_{TP} \delta^2}$
0,012	0,10	1,069
0,020	0,04	1,146
0,030	0,01	1,024

Liczne dostępne doniesienia literaturowe dotyczące hydrodynamiki w mikrokanalach gaz – ciecz przedstawiają mapy przepływu, w których przepływ *Taylor* jest zawsze uzyskiwany dla większych prędkości pozornych. Przykładową mapę przepływu dla układu etanol – azot przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Mapa przepływu w układzie etanol – azot [Sobieszuk, 2010]

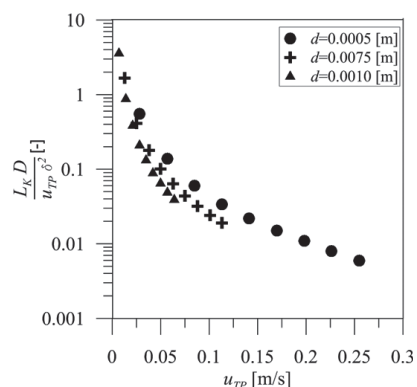
Świadczy to, że doświadczalna weryfikacja kryterium (1) w układach ciecz – gaz jest obecnie niemożliwa i wynika z dużych prędkości w przepływie gaz – ciecz. Powoduje to, że czas kontaktu pęcherza gazowego z cieczą jest zbyt krótki, aby doszło do nasycenia cieczy w filmie. Można zatem stwierdzić, że w badanych warunkach hydrodynamicznych w przepływie *Taylor* obserwuje się pełne wykorzystanie powierzchni międzyfazowej.

Przepływ Taylor w układzie ciecz – ciecz

W układzie heterofazowym ciecz – ciecz w reżimie *Taylor* stosuje się mniejsze prędkości pozorne. W pracy [Ghaini i in., 2010] badano wymianę masy w układzie *n*-heptan – woda. Wyznaczano powierzchnię międzyfazową metodą fotograficzną oraz chemiczną w trzech mikrokanalach o średnicach 0,0005; 0,00075 oraz 0,001 m. Zaobserwowano zmniejszanie się powierzchni międzyfazowej wyznaczonej metodą chemiczną wraz ze zmniejszaniem prędkości pozornej przepływu. Dla najmniejszej wartości u_{TP} stwierdzono, że powierzchnia międzyfazowa jest tak mała, jakby nie było kontaktu kropli cieczy z filmem drugiej cieczy.

Cytowane wyniki nasunęły przypuszczenie, że uzyskiwane dużo mniejsze prędkości w układzie ciecz – ciecz w stosunku do układu ciecz – gaz mogą powodować w reżimie *Taylor* niespełnienie kryterium (1). W celu sprawdzenia tych przypuszczeń w dalszej części niniejszej pracy wykorzystano kryterium (1) do weryfikacji wyników doświadczalnych z pracy [Ghaini i in., 2010] Zaczepnięto z niej również doświadczalne wartości długości kropli cieczy L_K oraz grubość filmu w układzie *n*-butanol – woda. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 5. Stwierdzono, że zgodnie z przypuszczeniami, można uzyskać warunki, w których kryterium (1) jest niespełnione. Obserwuje się to dla najmniejszych przepływów, czyli dla dużych czasów kontaktu obu faz. Ghaini i in.

[2010] zaobserwowali minimalną wartość powierzchni kontaktu faz przy prędkościach nieco większych niż przedstawione na rys. 5.



Rys. 5. Graficzna prezentacja wyników obliczeń kryterium (1) w układzie ciecz – ciecz

Powyższa dyskusja została oparta na kryterium (1), które wyprowadzono stosując założenie całkowitego wymieszania filmu i mostka cieczy, co w rzeczywistości nie musi mieć miejsca. W rzeczywistości wymieszanie (*odnowienie filmu*) jest niepełne i przy dłuższym czasie kontaktu faz powinno się obserwować sukcesywne nasycenie filmu, aż do pełnego nasycenia przy odpowiednio małej prędkości przepływu. Taki efekt stopniowo doprowadzałby do zmniejszania powierzchni międzyfazowej.

Wnioski

Z przedstawionych w pracy obliczeń wynika, że badane kryterium wykorzystania powierzchni międzyfazowej jest spełnione w całym zakresie przepływu *Taylor* dla mikrokanalów gaz – ciecz. Udało się ustalić teoretyczne warunki, przy których rozpatrywane kryterium nie jest spełnione. Jednakże, warunki te wykraczają poza zakresy doświadczalnych map przepływu. Nie jest zatem możliwe określenie charakteru przepływu mediów dla wyznaczonych teoretycznych prędkości pozornych.

Dostępne w literaturze dane dotyczące pomiarów powierzchni międzyfazowej w przepływie *Taylor* gaz – ciecz [Yue i in., 2007; Sobieszuk, 2011] potwierdzają pełne wykorzystanie tej powierzchni.

W pracy wykazano, że badane kryterium dla układu ciecz – ciecz nie jest spełnione w całym zakresie przepływu. Dla małych prędkości jest ono niespełnione. W tym przypadku istnieje możliwość zmniejszenia wartości czynnej powierzchni międzyfazowej. Jest to zgodne jakościowo z badaniami przedstawionymi w pracy [Ghaini i in., 2010].

LITERATURA

- Aussillous P., Querre D., 2000. Quick deposition of a fluid on the wall of a tube. *Physics of Fluids*, 12, nr 10, 2367–2371. DOI: 10.1063/1.1289396
- Ghaini A., Kashid M.N., Agar D.W., 2010. Effective interfacial area for mass transfer in the liquid-liquid slug flow capillary microreactors. *Chem. Eng. Proc.*, 49, nr 4, 358–366. DOI: 10.1016/j.ccep.2010.03.009
- Pohorecki R., 2007. Effectiveness of interfacial area for mass transfer in two-phase flow in microreactors. *Chem. Eng. Sci.*, 62, nr 22, 6495–6498. DOI: 10.1016/j.ces.2007.07.015
- Sobieszuk P., Cygański P., Pohorecki R., 2010. Bubble lengths in the gas-liquid Taylor flow in microchannels. *ChERD*, 88, nr 3, 263–269. DOI: 10.1016/j.cherd.2009.07.007
- Sobieszuk P., Pohorecki R., Cygański P., Grzelka J., 2011. Determination of the interfacial area and mass transfer coefficients in the Taylor gas-liquid flow in a microchannel. *Chem. Eng. Sci.*, 66, nr 23, 6048–6056. DOI: 10.1016/j.ces.2011.08.029
- Yue J., Chen G., Tuan Q., Luo L., Gonthier Y., Hydrodynamics and mass transfer characteristics in gas-liquid flow through a rectangular microchannel. *Chem. Eng. Sci.*, 62, nr 7, 2096–2108. DOI: 10.1016/j.ces.2006.12.057

Praca była finansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki, Grant Nr N N209 026140.