

## Krystian CZERNEK

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

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

## Wpływ zmiany właściwości cieczy podczas przepływu dwufazowego na jego hydrodynamikę

### Wstęp i opis stanowiska badawczego

W literaturze przedmiotu [Troniewski i in., 2006; Czernek i in., 2008; Oriol i in., 2008; Czernek i in., 2010], zwraca uwagę niewielka liczba prac związanych z badaniami dynamiki pierścieniowego dwufazowego przepływu gazu i cieczy bardzo lepkiej. W celu określenia zjawisk przepływowych zachodzących przy współprądowym opadającym przepływie pierścieniowym, zbudowano stanowisko badawcze typowe dla tego rodzaju badań, które umożliwiło ocenę wielkości opisujących hydrodynamikę filmu cieczy w warunkach adiabatycznych oraz z wymianą ciepła. Przeźroczysta konstrukcja tego kanału o średnicy wewnętrznej 22 mm i długości 1,5 m zapewniała możliwość oceny charakteru zmian natury przepływającego filmu cieczy przy zmieniającej się temperaturze cieczy, powodującej zmianę jej lepkości na drodze przepływu. Konstrukcja kanału pomiarowego typu rura w rurze zapewniała prowadzenie badań w warunkach ogrzewania i chłodzenia mieszaniny dwufazowej, którą stanowił układ powietrze – olej typu Iterm.

Badania prowadzono w zakresie zmian prędkości gazu  $w_{g0} = 0,731 \div 5,117$  m/s oraz cieczy  $w_{c0} = 0,002 \div 0,043$  m/s. Zakres pomiarowy temperatury oleju wynosił  $t_c = 18 \div 42^\circ\text{C}$ , co prowadziło do zmiany dynamicznego współczynnika lepkości oleju w zakresie  $\eta_c = 90 \div 3500$  mPa·s.

### Wyniki badań i ich analiza

Przyjmując dla ogólnych warunków przepływu z wymianą ciepła (ogrzewanie, chłodzenie) ustalanie właściwości faz względem średniej logarytmicznej parametrów wlotowych i wylotowych, podjęto próbę ilościowego ujęcia wartości średniej grubości filmu cieczy. Pomocne w tym były wyniki porównawcze dla stanu adiabatycznego – dla tej samej rury – dla którego warunków parametry te wyznaczano w ten sam sposób (pułapka objętościowa).

Ilościowy opis odniesiono początkowo do warunków splywu grawitacyjnego, korzystając z przesłanek, jakie dla takich warunków odnotowuje się w literaturze. Wynikająca z przepływu dwufazowego olej – powietrze grubość warstewki ( $s$ ) może być wówczas ujęta względem jej odpowiednika dla takiego splywu ( $s_0$ ). Stąd:

$$\frac{s}{s_0} = f(Re_g, Re_z) \quad (1)$$

Analityczna interpretacja tego typu relacji utwierdziła w przekonaniu, że jej postać w znaczącym stopniu zależy od obu charakteryzujących dynamikę przepływu dwufazowego parametrów ( $Re_z, Re_g$ ). Korzystne przy tym okazało się zapisanie tej relacji w postaci funkcji:

$$\frac{s}{s_0} = \frac{1}{1 + C Re_z^{n1} Re_g^{n2}} \quad (2)$$

która przy zaniku strumienia gazu, tj. dla  $Re_g = 0$ , prowadzi do  $s = s_0$ , przy wartości grubości wynikającej z wyrażenia występującego w mianowniku tej funkcji.

Względem splywu rejestrowana w przepływie strugi dwufazowej gaz – ciecz grubość filmu cieczy jest zawsze mniejszego wymiaru, niezależnie od panujących w kanale warunków. Niewątpliwie przyczynia się do tego obecność rdzeniowej strugi gazu w przepływie pierścieniowym, której dynamika prowadzi do pocieniania się warstewki w przepływie dwufazowym gaz – ciecz.

Wykonane obliczenia statystyczno-porównawcze pozwoliły w konsekwencji na ilościowy opis relacji (2), której korelacyjną postać wyraża równanie:

$$\frac{s}{s_0} = \frac{1}{1 + 5,68 \cdot 10^{-3} Re_z^{0,132} Re_g^{0,471}} \quad (3)$$

Równanie to skorelowano zarówno względem warunków adiabatycznych jak i z wymianą ciepła w zakresie zmian współczynnika lepkości  $\eta_c = 90 \div 3500$  mPa·s. Analiza porównawcza wykazała przy tym, że może ono też służyć ocenie grubości filmu cieczy w rurach o innej średnicy.

Uwzględniając to, że dla układów rzeczywistych ocena ilościowa warunków splywu nie jest jednoznaczna – co podkreśla się dość często w literaturze przedmiotu – w dalszych poszukiwaniach relacji do oceny grubości filmu cieczy skupiono się na poszukiwaniu bardziej uniwersalnej metody.

Uzyskane wyniki badań wskazują jednoznacznie, że prowadzenie procesu wymiany ciepła w warunkach wymuszonego przepływu pierścieniowego gaz – ciecz lepka może być bardzo korzystne, gdyż sposób ten pozwala na uzyskanie relatywnie cienkich a zarazem stabilnych filmów cieczy na całej długości rur aparatu cienkowarstewkowego. Uwzględniając, że proponowane metody obliczeniowe dla takich warunków charakteryzują się stosunkowo dużą dokładnością, mogą one być w pełni wykorzystane zarówno w toku projektowania jak i analizy warunków działania aparatów (wyparek, reaktorów itp.), w których ma się do czynienia z tego rodzaju przepływem.

### Model przepływu

Określenie modelu, charakteryzującego hydrodynamikę pierścieniowego przepływu dwufazowego gaz – ciecz bardzo lepka, służyło dwóm zasadniczym celom:

- 1) wskazaniu na najbardziej prawdopodobne mechanizmy tego przepływu, wraz z uwzględnieniem zakresu ich występowania,
- 2) weryfikacji możliwych do bezpośredniej oceny parametrów modelu oraz przyjętych do jego rozwiązania metod obliczeniowych, poprzez porównanie wyników obliczeń z wynikami badań doświadczalnych.

W obu przypadkach ilościowy opis związanych z tym przepływem zjawisk wymagał rozróżnienia wynikających z hydrodynamiki tego przepływu mechanizmów. W szczególności odnosił się do takich parametrów jak:

- a) grubości filmu (w stanach lokalnych i uśrednionych);
- b) parametrów identyfikujących charakter struktur falowych, a w szczególności:
  - amplitudy fal i ich długości,
  - częstotliwości pojawiania się fal oraz prędkości ich rozchodzenia;
- c) powierzchni międzyfazowej, w różnych stanach splywającego filmu cieczy.

Wszystkie te parametry, jako wielkości identyfikowane w badaniach, składają się w swym ogólnym ujęciu na kompleksowy opis hydrodynamiki rozpatrywanego przepływu.

Proponowane w literaturze [Czernek i in., 2008] metody obliczeniowe oparto na identyfikacji charakterystycznych dla strugi gaz – ciecz bardzo lepka parametrów, a proponowane do ich wyznaczania metody odniesiono do podobnych warunków, z tym zastrzeżeniem, że odnosiły się one do dużo mniejszego zakresu zmian lepkości cieczy ( $90 \div 1700$  mPa·s). Uzasadnieniem dla dokonanego wyboru było to, że w literaturze przedmiotu brak jest nadal modeli identyfikujących hydrodynamikę opadającego przepływu pierścieniowego gaz – ciecz z udziałem cieczy bardzo lepkiej w tak szerokim zakresie zmian dynamicznego współczynnika lepkości.

Celem przywołania modelu stanowiącego źródło dotychczasowych analiz w tym zakresie, w tab. 1 zestawiono metody wyznaczania wy-

mienionych parametrów, jako charakterystycznych dla dwufazowego przepływu pierścieniowego gaz – ciecz bardzo lepka.

Kierując się tymi założeniami, oraz biorąc pod uwagę wszystkie dotychczasowe wyniki badań, jakie dla warunków tego przepływu były dostępne, zarówno dla stanu adiabatycznego jak i z wymianą ciepła, dokonano odpowiedniego modelowania warunków tego przepływu. Poczyniono przy tym założenie, aby w modelowaniu tym wyeliminować z rozważań analitycznych takie przypadki, które są trudne do jednoznacznej interpretacji (np. poślizg faz), oraz wielkości, które są niejednoznaczne w ocenie.

Tab. 1. Źródłowe metody obliczeń parametrów strugi dwufazowej gaz – ciecz bardzo lepka [Czernek i in., 2008]

Parametr	Postać równania	Numer równania
Grubość filmu, $s$	$\frac{s}{s_0} = \frac{1}{1 + 5,68 \cdot 10^{-3} Re_z^{0,132} Re_g^{0,471}}$	(3)
Częstotliwość fal, $f$	$\frac{f \vartheta_z}{w_{c,0}} = 0,9177 \left( \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \right)^{0,344} Re_g^{-0,272} Re_z^{-0,429}$	(4)
Prędkości fal, $c$	$\frac{c}{w_{c,0}} = 141,1 \left( \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \right)^{0,848} Re_g^{-0,725} Re_z^{0,112}$	(5)
Długość fal, $\lambda$	$\frac{\lambda}{\vartheta_z} = 65,23 We_z^{0,373} \left( \frac{Re_z}{1 + Re_g} \right)^{0,029}$	(6)
Amplituda fal, $a$	$\frac{a}{\vartheta_z} = 0,0222 \left( \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \right)^{0,476} Re_g^{-0,109} Re_z^{0,744}$	(7)
Powierzchnia rozwinięcia granicy faz	$\frac{F_{2F}}{F_r} = 46,73 \left( \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \right)^{0,635} Re_g^{-0,679} Re_z^{-0,108}$	(8)

Uwzględniając przyjęte założenia, w swym ogólnym ujęciu opracowanie modelu przepływu odniesiono do wskazania na analityczne metody wyznaczania parametrów pierścieniowej strugi dwufazowej, charakterystycznych dla wymuszonego przepływu dwufazowego gaz-ciecz z udziałem cieczy o dużej lepkości.

Zagadnienia wynikające z opisu ilościowego dynamiki pierścieniowego przepływu dwufazowego gaz – ciecz bardzo lepka odnosiły się do podania sposobu wyznaczania takich parametrów hydrodynamiki badanego przepływu jak:

- grubość filmu cieczy, jako wartość identyfikowaną zarówno dla stanów lokalnych jak i uśrednionych,
- stan zafalowania powierzchni międzyfazowej, możliwy do odwzorowania za pośrednictwem takich charakterystycznych parametrów wpływającego filmu cieczy jak: częstość i amplituda pojawiających się na powierzchni filmu fal, ich długość oraz prędkość przemieszczania się na granicy faz,
- średnia powierzchnia międzyfazowa przepływu pierścieniowego gaz-ciecz lepka, identyfikowana dla wszystkich obserwowanych form pierścieniowego przepływu dwufazowego olej – powietrze.

W celu określenia tych parametrów, przeprowadzono szczegółową analizę jakościowo-ilościową zgromadzonego materiału badawczego, co przy wykorzystaniu rachunku wyrównawczego doprowadziło do opracowania szczegółowych równań modelowych, opisujących te parametry.

W odniesieniu do grubości filmu cieczy ( $s$ ) proponuje się dwie alternatywne relacje, a mianowicie:

- a) uzależnioną od udziału masowego fazy gazowej ( $x = g_g/g_T$ ), oraz charakteru przepływu gazu i cieczy ( $Re_g, Re_c$ ), w odniesieniu do zastępczego wymiaru liniowego ( $\vartheta_z$ ):

$$\frac{s}{\vartheta_z} = 54 \left( \frac{x}{1-x} \right)^{0,325} Re_c^{0,539} Re_g^{-0,484} \quad (9)$$

dla której współczynnik korelacji  $r = 0,98$ , a średnie odchylenie standardowe  $\delta = 0,18$ ,

- b) uzależnioną od parametru Lockharta-Martinelli'ego ( $X_{II}$ ) oraz lepkości gazu i cieczy ( $\eta_g, \eta_c$ ), w postaci równania:

$$\frac{s}{\vartheta_z} = 158,2 X_{II}^{0,208} \left( \frac{\eta_c}{\eta_g} \right)^{-0,551} \quad (10)$$

przy:

$$X_{II} = \left( \frac{x}{1-x} \right)^{0,9} \left( \frac{\rho_c}{\rho_g} \right)^{0,5} \left( \frac{\eta_c}{\eta_g} \right)^{0,1}$$

dla którego współczynnik korelacji  $r = 0,92$ , a średnie odchylenie standardowe  $\delta = 0,21$ .

W obu przypadkach, poprzez uwzględnienie masowego udziału faz gazowej i ciekłej (odpowiednio  $x$  i  $1-x$ ), równania te są określone względem bilansu masowego strugi dwufazowej gaz – ciecz, jako bardziej (od objętościowego) reprezentatywnego sposobu modelowania zjawisk cieplno-przepływowch.

Obie zależności charakteryzują się stosunkowo wysoką zgodnością z wynikami badań, stąd też można je rekomendować do opisu wszelkiego rodzaju zjawisk zachodzących w pierścieniowym przepływie dwufazowym gaz – ciecz bardzo lepka, a związanych zarówno z procesami przenoszenia pędu jak i z wymianą ciepła i masy.

Dalsze, charakterystyczne dla dynamiki pierścieniowych form przepływu parametry, jakie wynikają z odwzorowania stanu powierzchni międzyfazowej, a uwzględnione w niniejszej ocenie, opisano następującymi równaniami modelowymi:

– częstotliwość fal,  $f$ :

$$\frac{f \vartheta_z}{w_{c,0}} = 5,43 \left( \frac{x}{1-x} \right)^{0,345} Re_g^{-0,221} Re_c^{-0,442} \quad (11)$$

– prędkość przemieszczania się fal,  $c$ :

$$\frac{c}{w_{c,0}} = 0,348 \left( \frac{x}{1-x} \right)^{-0,541} Re_g^{-0,225} Re_c^{-0,053} \quad (12)$$

– długość fal,  $\lambda$ :

$$\frac{\lambda}{\vartheta_z} = 4,93 \cdot 10^3 \left( \frac{x}{1-x} \right)^{0,504} Re_g^{-0,471} Re_c^{0,526} \quad (13)$$

– amplituda fal,  $a$ :

$$\frac{a}{\vartheta_z} = 10,3 \cdot 10^{-3} \left( \frac{x}{1-x} \right)^{0,232} Re_g^{0,421} Re_c^{0,757} \quad (14)$$

w których:  $\frac{a}{\vartheta_z} = \left( \frac{\eta_c^2}{g \rho_c^2} \right)^{1/3}$ ,  $x = \frac{g_g}{g_T} = \frac{g_g}{g_g + g_c}$ ,

$$Re_g = \frac{g_T x D}{\eta_g}, \quad Re_c = \frac{g_T (1-x) D}{\eta_c}$$

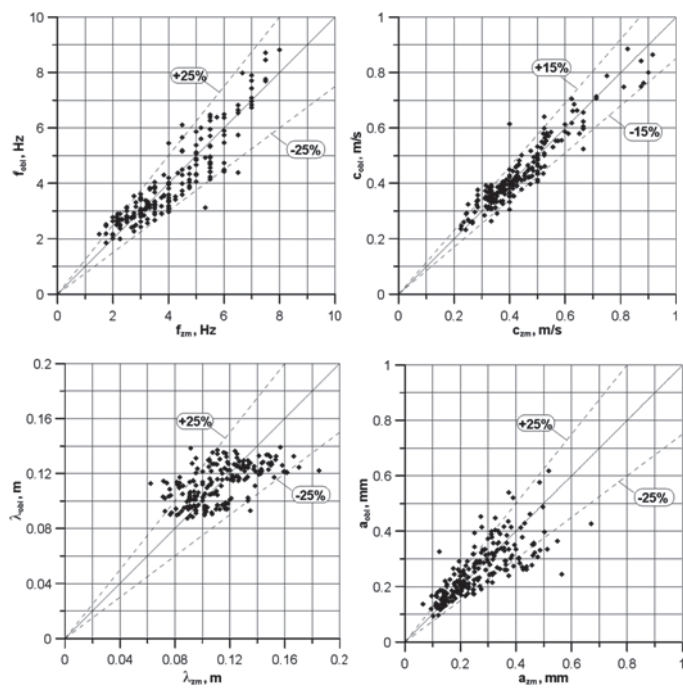
Równania (9)-(14) ujmują pod względem funkcyjnym praktycznie wszystkie charakterystyczne dla warunków przepływu dwufazowego gaz – ciecz parametry, w tym udział masowy ( $x$ ) oraz parametr Lockharta-Martinelli'ego, jako wielkości identyfikowane zarówno dla warunków adiabatycznych jak i diabatyicznych. Modułowy zapis tych równań stanowi o ich ogólności, co z aplikacyjnego punktu widzenia ułatwia ich wykorzystanie dla dowolnego w zasadzie zadania procesowo-projektowego.

W porównaniu do modelu scharakteryzowanego w tab. 1, równania (9)-(14) zweryfikowano w dużo szerszym zakresie zmian parametrów strugi dwufazowej gaz – ciecz, co odnosi się zwłaszcza do dwukrotnie większego zakresu zmiany dynamicznego współczynnika lepkości (3500 mPa·s). Ponadto, składające się na opis dynamiki pierścieniowego przepływu cieczy bardzo lepkiej relacje (9)-(14) cechują się znacznie większą dokładnością, co pozwala z pełnym przekonaniem rekomendować te relacje do wykorzystywania w pracach projektowych oraz w analizie działania aparatów z hydraulicznie wytwarzanym filmem cieczy, pod kątem których (dla bardzo lepkich cieczy) rozpatrywano warunki hydrodynamiki ich działania.

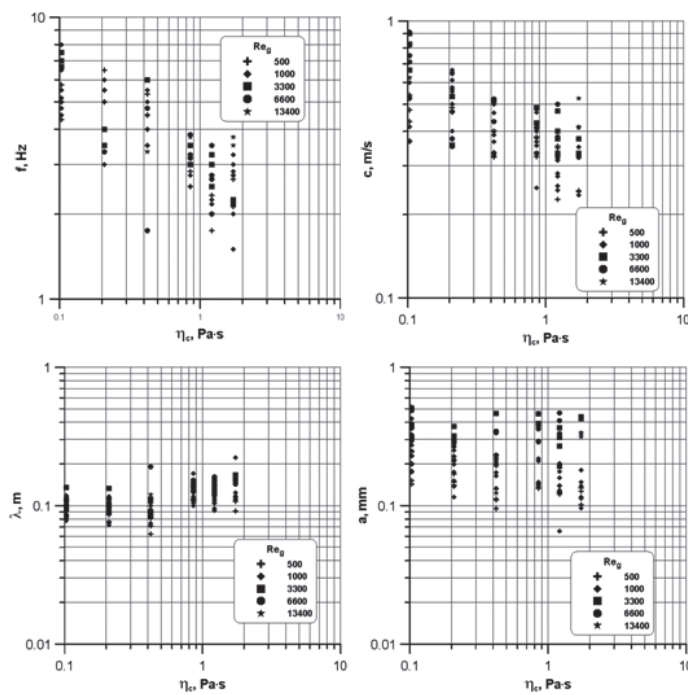
Celem zobrazowania zakresu zmian parametrów opisanych tymi równaniami, na rys. 1 przedstawiono porównanie wyników obliczeń z danymi doświadczalnymi.

Wysoka zgodność wyników obliczeń z danymi doświadczalnymi spowodowała, iż postanowiono zweryfikować jak na poszczególne wielkości wpływa zmiana lepkości na drodze przepływu. Wyniki tych obliczeń przedstawiono na rys. 2.

Zmiany te potwierdziły się w trakcie badań doświadczalnych, podczas których, dzięki zastosowaniu transparentnego kanału pomiarowego, obserwowano zmiany zafalowania powierzchni rozdziału faz na drodze



Rys. 1. Porównanie zmierzonych i obliczonych wartości dla relacji (11)÷(14)



Rys. 2. Wyniki obliczeń dla relacji (11)÷(14)

przepływu, spowodowane zmianą właściwości fizykochemicznych, co przykładowo przedstawiono na rys. 3. Widać na nim wyraźnie, że spadek lepkości spowodowany ogrzewaniem kanału powoduje zmniejszenie się częstotliwości pojawiania się fal ich prędkości i amplitudy oraz wzrost ich długości.

Mając na uwadze, że jedną z istotniejszych wielkości, która w warunkach strugi dwufazowej gaz – ciecz decyduje o warunkach wymiany ciepła i masy jest wartość powierzchni międzyfazowej, podjęto próbę jej wyznaczenia. W tym celu, w oparciu o uzyskane przebiegi zmian grubości warstewki cieczy w funkcji czasu, określono na drodze obliczeń numerycznych stan rozwinięcia tej powierzchni. Ponieważ w przypadku tym wpływ na tę wartość ma nie tylko stan zafalowania warstewki cieczy, lecz także jej grubość, w poszukiwaniach relacji do opisu powierzchni międzyfazowej skupiono się na wskazaniu zmiany wartości powierzchni międzyfazowej ( $F_{2F}$ ) względem powierzchni cha-

rakterystycznej dla zerowej grubości filmu cieczy, tj. powierzchni wewnętrznej kanału ( $F_r$ ).

Podobnie jak to uczyniono w odniesieniu do grubości filmu, do wyznaczania powierzchni międzyfazowej w przepływie dwufazowym gaz – ciecz bardzo lekko proponuje się dwie alternatywne relacje:

a) dla warunków adiabatycznych:

$$\frac{F_{2F}}{F_r} = 47,3 \left( \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \right)^{0,636} Re_g^{-0,683} Re_c^{-0,109} \quad (15)$$

b) względem udziału masowego – korzystniejszą dla warunków wymiany ciepła:

$$\frac{F_{2F}}{F_r} = 2,85 \cdot 10^3 \left( \frac{x}{1-x} \right)^{0,627} Re_g^{-0,669} Re_c^{-0,111} \quad (16)$$

gdzie:  $Re_z = \frac{4\Gamma}{\eta_c}$ ,  $Re_g = \frac{g_r x D}{\eta_g}$ ,  $Re_c = \frac{g_r (1-x) D}{\eta_c}$

Porównanie zmierzonych i obliczonych według (15) i (16) wartości powierzchni międzyfazowej wykazało, że w granicach błędów wzglę-



Rys. 3. Zmiany zafalowania powierzchni międzyfazowej na skutek zmian właściwości cieczy wskutek jej ogrzewania przy:  $w_c = 0,014$  m/s,  $w_g = 0,8 \div 1,55$  m/s,  $\eta_c = 370 \div 90$  mPa·s

nego  $\pm 15\%$  mieści się ponad 85% punktów (w obu przypadkach przy współczynniku korelacji powyżej 0,95). Można zatem przyjąć, że relacje te dość dobrze opisują wartość powierzchni międzyfazowej, jaka występuje przy współprądowym przepływie opadającym gazu i cieczy bardzo lepkiej w rurach pionowych.

### Wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowana metodyka 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 czy masy.

Stwierdzono, że natura filmu cieczy w przepływie dwufazowym powietrze – olej może być bardzo zróżnicowana. Wielkość i charakter powstających fal o różnej amplitudzie i częstotliwości uzależniona jest zarówno od strumienia i lepkości cieczy, jak i od prędkości fazy gazowej.

Opracowane w wyniku badań zależności, uwzględniające wpływ niniejszych parametrów na wielkości charakterystyczne dla przepływających filmów cieczy, mogą być w pełni przydatne w opisie działania aparatów z hydraulicznie wytwarzanym filmem cieczy.

### LITERATURA

Czernek K., Filipczak G., Witeczak S., 2008. Dynamika pierścieniowego dwufazowego przepływu gazu i cieczy bardzo lepkiej. *Przem. Chem.* **87**, 2, 105-110  
 Czernek K., Filipczak G., Witeczak S., 2010. Identyfikacja grubości filmu cieczy bardzo lepkiej w przepływie pierścieniowym. *Inż. Ap. Chem.*, **49**, nr 2, 25-26  
 Oriol J., Leclerc J.P., Jallut C., Tochon P., Clement P., 2008. Characterization of the two-phase flow regimes and liquid dispersion in horizontal and vertical tubes by using coloured tracer and non-intrusive optical detector. *Chem. Eng. Sci.*, **63**, 1, 24-34. DOI:10.1016/j.ces.2007.08.079  
 Troniewski L., Witeczak 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