

ANNA GANCARCZYK, GRAŻYNA BARTELMUS, ANDRZEJ BURGHARDT

WYMUSZONY PRZEPIY W PULSACYJNY JAKO SPOSÓB INTENSIFYKACJI PROCESÓW PROWADZONYCH W REAKTORACH TRÓJFAZOWYCH

Instytut Inżynierii Chemicznej PAN Gliwice, ul. Bałtycka 5, 44-100 Gliwice

Wyznaczono eksperymentalnie podstawowe parametry hydrodynamiczne reaktora trójfazowego, pracującego przy cyklicznie zmiennym zasilaniu złoża cieczą prowadzonym metodą BAZA-IMPULS. Opracowano równania korelujące zmierzone wartości parametrów hydrodynamicznych w zależności od parametrów operacyjnych reaktora i fizykochemicznych właściwości cieczy. Wyniki eksperymentów potwierdzają, że testowany sposób zasilania złoża cieczą może wpłynąć korzystnie na przebieg procesów prowadzonych w tego typu reaktorach.

The basic hydrodynamic parameters of a trickle bed reactor operating at the so-called SLOW MODE of the BASE-IMPULSE periodic liquid feeding were determined experimentally. The experimental data were the correlated depending on the operational parameters of the reactor and physicochemical properties of the liquid phase. The results of the experiments showed that the tested way of the bed feeding with liquid may be advantageous for the processes carried out in such type of reactors.

1. WPROWADZENIE

Reaktory trójfazowe ze stałym złożem (ang. Trickle Bed Reactor, TBR), pracujące przy współprądowym przepływie gazu i cieczy w dół kolumny, są szeroko stosowane w przemyśle naftowym, chemicznym i petrochemicznym (katalityczne procesy hydrooczyszczania i uwodornienia ropy naftowej, olejów smarowych, związków nitrowych czy karbonylowych) oraz w procesach biochemicznych (np. utlenianie zanieczyszczeń w ściekach). W tego typu aparatach przerabiana ilość surowca liczona jest w milionach ton, a zatem każda zmiana sposobu ich pracy, zwiększająca wydajność bądź selektywność prowadzonych procesów, daje wymierne korzyści ekonomiczne. Poprawę efektywności tego typu reaktorów można uzyskać, w zależności od rozpatrywanego procesu, poprzez zmianę reżimu hydrodynamicznego pracy aparatu, podwyższenie ciśnienia i/lub temperatury, lub też zmianę sposobu przepływu faz

(współprąd lub przeciwprąd). Jedną z metod zintensyfikowania procesu może być również cykliczne zmienianie w czasie parametrów wlotowych, np. stężenia reagentów, temperatury reagentów, natężenia przepływu fazy ciekłej lub gazowej [1]. W latach osiemdziesiątych dwudziestego wieku zainteresowano się możliwością zwiększenia wydajności bądź selektywności procesów prowadzonych w reaktorach trójfazowych poprzez periodyczną zmianę natężenia przepływu fazy ciekłej [2–4]. Przepływ taki realizowany może być albo przez okresowe zatrzymanie przepływu cieczy przez reaktor (metoda ON-OFF), albo modulację jej przepływu pomiędzy małą, ale nie zerową, i dużą wartością natężenia przepływu cieczy zasilającej złożę (metoda BAZA-IMPULS).

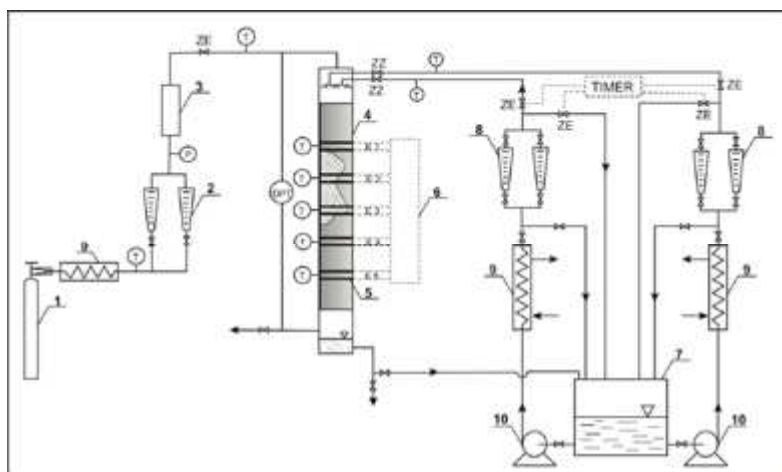
Szybkość wielu procesów przemysłowych kontrolowana jest transportem masy ciekłego reagenta do powierzchni kontaktu. Dla tych procesów istotne jest dobre rozprowadzenie cieczy po powierzchni cząstek katalizatora w celu uniknięcia suchych miejsc na jego powierzchni. Reaktory dla tego typu procesów powinny więc pracować przy wysokich prędkościach masowych gazu i cieczy, najlepiej w reżimie przepływu pulsacyjnego (ang. Pulsing Flow, PF), bowiem wówczas stwierdzono nawet o 60% wyższy stopień konwersji α -metylostyrenu, niż uzyskiwany w reżimie przepływu stróżkowego [5]. Jak wykazano w literaturze, alternatywą może być prowadzenie procesu przy niższych średnich prędkościach fazy ciekłej, zmienianych cyklicznie metodą BAZA-IMPULS. Prowadzenie procesu tą metodą powinno być preferowane dla procesów kontrolowanych transportem ciekłego reagenta do powierzchni kontaktu [5–7]. Jeśli dodatkowo proces taki prowadzony będzie w reżimie przepływu pulsacyjnego wymuszonego zmiennym przepływem cieczy (ang. Liquid Induced Pulsing Flow, LIPF), co oznacza, że w impulsie cieczy generowane są naturalne pulsy, wówczas proces transportu masy w fazie ciekłej jest dodatkowo intensyfikowany, co potwierdziły wyniki przedstawione w pracach [5–6].

Do projektowania, przenoszenia skali oraz prawidłowej eksploatacji przemysłowego reaktora trójfazowego z modulowanym przepływem fazy ciekłej konieczna jest znajomość wielu parametrów hydrodynamicznych reaktora (reżim pracy, zawieszenie cieczone, spadki ciśnienia, stopień zwilżenia złoża) oraz kinetycznych (współczynniki wnikania masy i ciepła) [8]. Doniesienia literaturowe dotyczące parametrów hydrodynamicznych reaktorów pracujących przy periodycznie zmiennym zasilaniu jedną z faz realizowanym metodą BAZA-IMPULS są raczej skromne [9–20], a zawarte w nich wnioski są przede wszystkim wnioskami jakościowymi, a nie ilościowymi. Jedynie w pracach [12–16, 20] podjęto próby ilościowego ujęcia tych parametrów.

Przedmiotem badań była zatem szczegółowa analiza parametrów hydrodynamicznych reaktora trójfazowego ze stałym złożem, pracującego w reżimie wymuszonego przepływu pulsacyjnego prowadzonego metodą BAZA-IMPULS. Eksperymenty wykonane dla reżimu GCF i PF stanowiły bazę porównawczą.

2. INSTALACJA DOŚWIADCZALNA

Głównym elementem instalacji doświadczalnej (rys. 1) była kolumna o średnicy 0,057m i wysokości 1,4m wykonana z przezroczystego polichlorku winylu. Kolumna wypełniona była kulkami szklanymi o średnicy 3mm ($\epsilon=0,38$; $a=1240 \text{ m}^{-1}$), usypanymi na wysokość 1,373m.



Rys. 1. Schemat instalacji doświadczalnej: 1 – butla z gazem, 2 – rotometry gazowe, 3 – zbiornik wyrównawczy, 4 – kolumna z wypełnieniem, 5 – celki konduktometryczne (E1 ÷ E5), 6 – zestaw do akwizycji danych, 7 – zbiornik cieczy, 8 – rotometry cieczowe, 9 – wymienniki ciepła, 10 – pompy, T – pomiar temperatury, P – pomiar ciśnienia, DPT – różnicowy miernik ciśnienia, ZE – zawory elektromagnetyczne, ZZ – zawory zwrotne

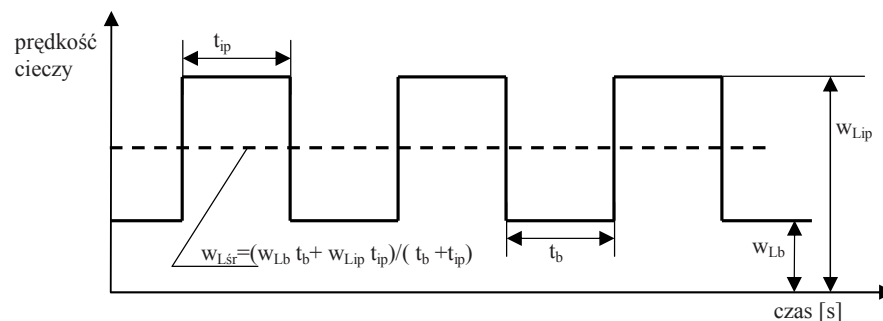
Fig. 1. Scheme of experimental set-up: 1- nitrogen cylinder, 2 – gas flow meters, 3 – dampener, 4 – packed column, 5 – conductivity cells, 6 – data acquisition, 7 – liquid tank, 8 – liquid flow meters, 9 – thermostat, 10 – liquid pumps, ZE – electromagnetic valve, ZZ – check valve

Faza gazowa (azot) podawana była w sposób ciągły na szczyt kolumny. Ciecz doprowadzana była na szczyt kolumny za pomocą dwóch oddzielnych nitek (baza i impuls). Obie nitki wyposażone były w układ zaworów elektromagnetycznych sterowanych przełącznikiem czasowym, który pozwalał regulować czas trwania małego i dużego natężenia przepływu cieczy w kolumnie. Naprzemienna praca obu nitek pozwalała na otrzymanieżądanego, cyklicznego przepływu cieczy, który opisywany jest za pomocą czterech parametrów: prędkości cieczy w impulsie (w_{Lip}) i czasem jego trwania (t_{ip}) oraz prędkości cieczy w bazie (w_{Lb}) i czasem trwania bazy (t_b), co schematycznie przedstawiono na rysunku 2. Jako fazę ciekłą stosowano roztwory o różnej gęstości, lepkości i napięciu powierzchniowym (Tabela 1). Pomiary prowadzono dla ciśnienia bliskiego ciśnieniu atmosferycznemu w temperaturze ok. 25°C .

Wartości zawieszenia cieczowego określano metodą konduktometryczną. W tym celu w kolumnie rozmieszczono równomiernie 5 celek konduktometrycznych (co

0,225m), z których równocześnie zbierano i zapisywano w pamięci komputera sygnał elektryczny, odpowiadający zmianie przewodnictwa dwufazowej mieszaniny gaz-ciecz płynącej przez kolumnę.

METODA "BAZA - IMPULS"



Rys. 2. Sposób prowadzenia oraz parametry charakteryzujące cykliczne zasilanie złoża cieczą
Fig. 2. The mode of operation and parameters characterizing the cycling flow of fluids through the bed

Tabela 1. Właściwości fizykochemiczne roztworów stosowanych w badaniach ($t = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Table 1. Physicochemical properties of the solutions used in experiments ($t = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Nr	Faza ciekła	Gęstość [kg/m ³]	Lepkość ·10 ³ [Pa·s]	Napięcie powierzchniowe ·10 ³ [N/m]
1	woda	999,8	1,04	72,4
2	r-r gliceryny (ok. 30% wag.)	1072,2	2,5	72,0
3	r-r gliceryny (ok. 45% wag.)	1111,8	4,14	68,8
4	r-r metanolu (ok. 24% wag.)	960,1	1,64	45,8

Wartości parametrów ruchowych reaktora, przy których następuje zmiana hydrodynamicznego reżimu pracy aparatu, wyznaczano dwiema metodami: wizualną – obserwując pracujące złożę przez przezroczystą ścianę kolumny, oraz konduktometryczną – analizując sygnały z celek konduktometrycznych. Obie metody dawały zgodne wyniki. Spadek ciśnienia gazu w złożu mierzono za pomocą różnicowego piezoelektrycznego miernika ciśnienia, z którego sygnał zapisywany był w pamięci komputera.

Eksperymenty prowadzono metodą cykli wolnych (SLOW MODE), tzn. czasy poszczególnych cykli są na tyle długie, że pomiędzy kolejnymi przełączeniami reaktor osiąga stan pseudoustalony [21, 22].

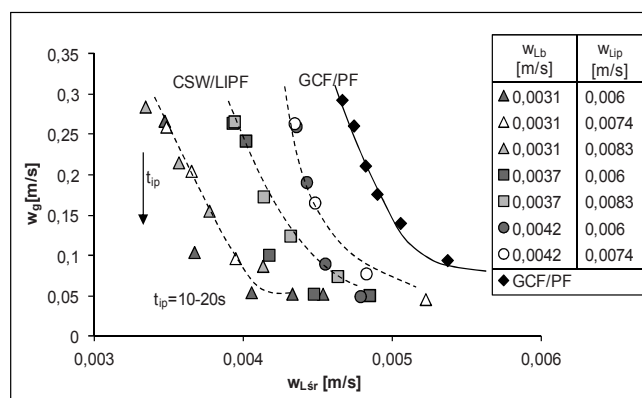
3. WYNIKI EKSPERYMENTÓW

3.1. ZMIANA REŻIMU HYDRODYNAMICZNEGO

Poprzez odpowiedni dobór prędkości cieczy zraszającej złożę w poszczególnych cyklach, operacje periodyczne można prowadzić w dwóch różnych reżimach hydrodynamicznych [23]:

- ciągłych fal uderzeniowych (ang. Continuity Shock Waves – CSW), w którym zarówno prędkości cieczy w bazie jak i w impulsie znajdują się w obszarze prędkości odpowiadającym reżimowi przepływu stróżkowego,
- wymuszonego przepływu pulsacyjnego (ang. Liquid Induced Pulsing Flow, LIPF), gdy prędkość cieczy w impulsie znajduje się w obszarze prędkości odpowiadającym reżimowi przepływu pulsacyjnego (ang. Pulsing Flow, PF), w bazie – w obszarze reżimu przepływu stróżkowego (ang. Gas Continuous Flow, GCF), natomiast tzw. średnia barycentryczna prędkość cieczy ($w_{L,śr}$) odpowiada również wartościom charakterystycznym dla reżimu przepływu stróżkowego.

Dla prawidłowego prowadzenia procesu niezbędna jest znajomość reżimu hydrodynamicznego, w którym pracuje reaktor. Konieczne było zatem wyznaczenie obszaru występowania reżimu LIPF SLOW, tj. zakresu zmian prędkości gazowej i ciekłej ograniczonej z jednej strony linią zmiany reżimów GCF/PF a z drugiej strony – CSW/LIPF SLOW (rys.3).

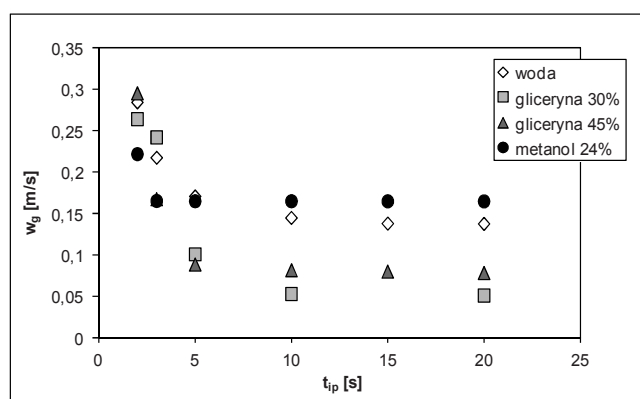


Rys. 3. Linie zmiany reżimów GCF/PF i CSW/LIPF SLOW ($t_b=20s$, $t_{ip}=20-1s$). Układ: azot - roztwór gliceryny 30%

Fig. 3. Transition lines GCF/PF and CSW/LIPF SLOW ($t_b=20s$, $t_{ip}=20-1s$). System: nitrogen – glycerol solution 30%

Analizując otrzymane mapy przepływu stwierdzono, że – niezależnie od właściwości fizykochemicznych fazy ciekłej – dla periodycznie zmiennego zasilania złoża fazą ciekłą, realizowanego metodą SLOW, reżim przepływu pulsacyjnego uzyskiwany jest przy mniejszych średnich wartościach prędkości cieczy niż przy ustalonej pracy

kolumny, co zgodne jest z wnioskami przedstawionymi w pracach [12, 13, 16-18, 20]. Poprzez odpowiedni dobór prędkości cieczy w bazie i w impulsie oraz czasów ich trwania, można znacznie poszerzyć zakres parametrów ruchowych reaktora korzystnych dla intensyfikacji jego pracy. Nie należy jednak zapominać, że średnia wartość prędkości cieczy zależy zarówno od prędkości cieczy w bazie i w impulsie, jak i czasów ich trwania, a zatem każda zmiana jednego z tych parametrów zmienia wartość w_{Lsr} . Stwierdzono ponadto, że dla czasu trwania impulsu cieczy $t_{ip} \geq 10s$, a w przypadku roztworu gliceryny o stężeniu 45%, już dla $t_{ip} \geq 5s$, niezależnie od czasu trwania bazy, prędkość gazu niezbędna dla wyindukowania w złożu naturalnych pulsacji przestaje zależeć od czasu trwania impulsu cieczy, co na rys. 3 zaznaczono zaciemnionym obszarem. Wartość prędkości fazy gazowej jest wówczas bliska prędkości gazu na linii zmiany reżimu GCF/PF dla prędkości zraszania równych prędkości cieczy w impulsie (w_{Lip}), co zgodne jest z wynikami przedstawionymi w pracach [13, 17, 18], a co przedstawiono na rysunku 4.

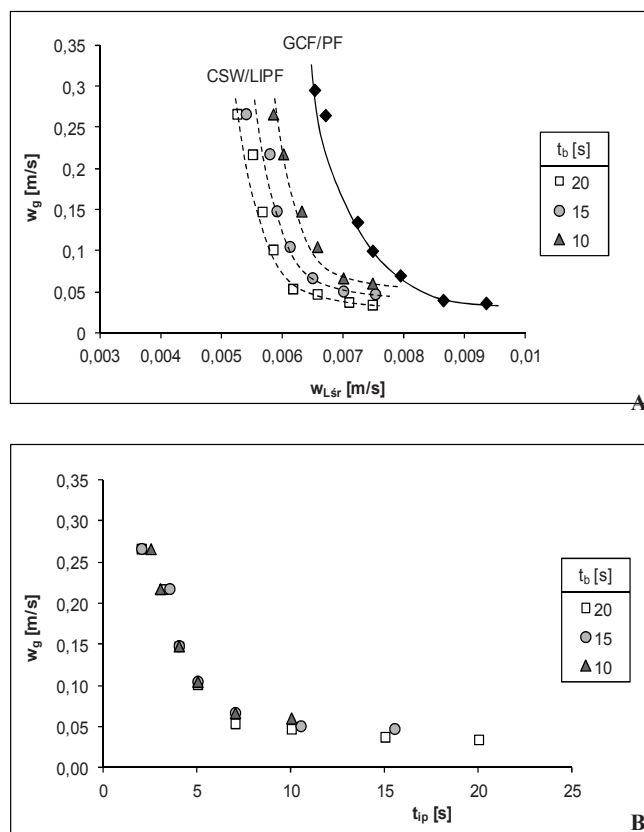


Rys. 4. Wpływ czasu trwania impulsu cieczy na prędkość gazu niezbędną dla uzyskania zmiany reżimu CSW/LIPF SLOW

Fig. 4. Effect of impulse time duration on the necessary gas velocity for the regime change CSW/LIPF SLOW

Czas trwania bazy (t_b) nie ma wpływu na wartość prędkości gazu niezbędną dla zainicjowania w złożu przepływu pulsacyjnego, co wynika z porównania rysunków 5.A i 5.B, chociaż jego zmiana zmienia oczywiście wartość w_{Lsr} .

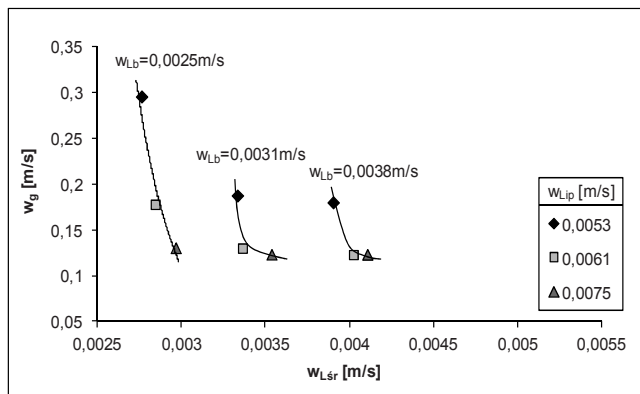
O wiele trudniej jest określić wpływ prędkości cieczy w impulsie i w bazie na położenie granicy zmiany reżimu CSW/LIPF SLOW. Wpływ tych parametrów widoczny jest jedynie dla małych wartości tzw. współczynnika podziału (ang. SPLIT, $S=t_{ip}/(t_b+t_{ip})$) oraz dla najniższych ze stosowanych w eksperymentach wartości prędkości cieczy w bazie i impulsie. Jak widać z przedstawionego na rysunku 6 porównania, dla małych wartości w_{Lb} i w_{Lip} zmiana każdego z tych parametrów powoduje znaczącą zmianę wartości prędkości gazu, niezbędnej dla wyindukowania w złożu naturalnych pulsów.



Rys. 5. Wpływ czasu trwania bazy i średniej prędkości fazy ciekłej (A) oraz czasu trwania impulsu ciekłej (B) na prędkość gazu niezbędną do zmiany reżimu CSW/LIPF SLOW, dla $w_{Lb}=0,0048\text{m/s}$ i $w_{Lip}=0,01\text{m/s}$; układ: azot – woda

Fig. 5. Effect of base time duration and average liquid velocity (A) and impulse time duration (B) on the necessary gas velocity for the CSW/LIPF SLOW regime change; $w_{Lb}=0,0048\text{m/s}$ i $w_{Lip}=0,01\text{m/s}$; system: nitrogen – water

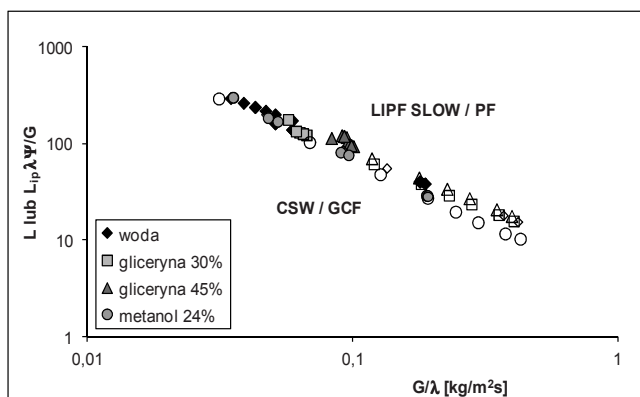
Bardzo trudno jest opracować mapę przepływu dla badanych układów pomiarowych, i to nie tylko ze względu na różniące je właściwości fizykochemiczne, ale również ze względu na liczbę parametrów ruchowych, które muszą być uwzględnione. Opracowując mapę przepływu wzięto pod uwagę przede wszystkim wpływ czasu trwania impulsu ciekłej na granicę zmiany reżimu CSW/LIPF SLOW, wyrażoną poprzez współczynnik podziału (S). W oparciu o wartość tego parametru opracowano dwie uniwersalne mapy przepływu. Dla długich czasów trwania impulsu ciekłej, a więc dla wartości współczynnika podziału $S \geq 0,3$, jak już wspomniano powyżej, prędkość ciekłej w impulsie powinna być równa prędkości ciekłej na granicy GCF/PF dla $G=\text{idem}$.



Rys. 6. Wpływ prędkości cieczy w bazie i impulsie na prędkość gazu niezbędną do zmiany reżimu CSW/LIPF SLOW, dla $t_b=20s$ i $t_{ip}=2s$; układ azot – gliceryna 45%

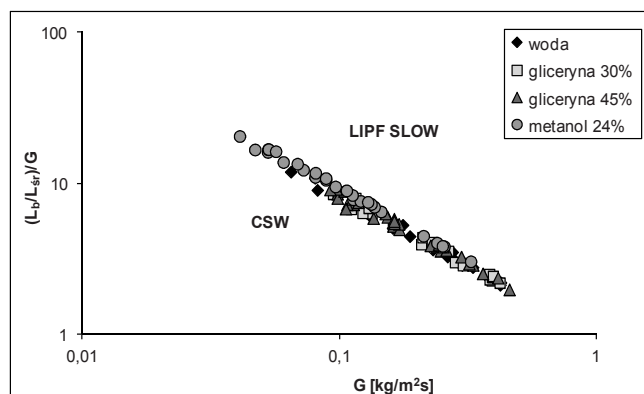
Fig. 6. Effect of liquid velocity in the base and in impulse on the necessary gas velocity for the CSW/LIPF SLOW regime change; $t_b=20s$ i $t_{ip}=2s$; system: nitrogen – glycerol solution 45%

Mapa przedstawiona na rysunku 7 potwierdza tę prawidłowość dla wszystkich badanych układów pomiarowych, co zgadza się z sugestiami zawartymi w pracach [10, 16].



Rys. 7. Mapa przepływu dla długich czasów trwania impulsu cieczy ($S \geq 0,3$). Punkty puste – granica zmiany reżimu GCF/PF, punkty pełne – granica zmiany reżimu CSW/LIPF SLOW
Fig. 7. Flow regime map for long impulse time duration ($S \geq 0.3$). Transition lines GCF/PF – open points; transition lines CSW/LIPF SLOW – solid points

Dla krótkich czasów trwania impulsu cieczy ($S < 0,3$), opracowano mapę przepływu w zmodyfikowanym układzie współrzędnych ($L_b/L_{sr})/G = f(G)$, przedstawioną na rysunku 8. Mapa ta, dla założonych wartości t_b i t_{ip} ($S < 0,3$) oraz G i L_b (z obszaru przepływu GCF) umożliwi obliczenie wartości L_{ip} , przy której w impulsie cieczy wyidukowane zostaną naturalne pulsy.



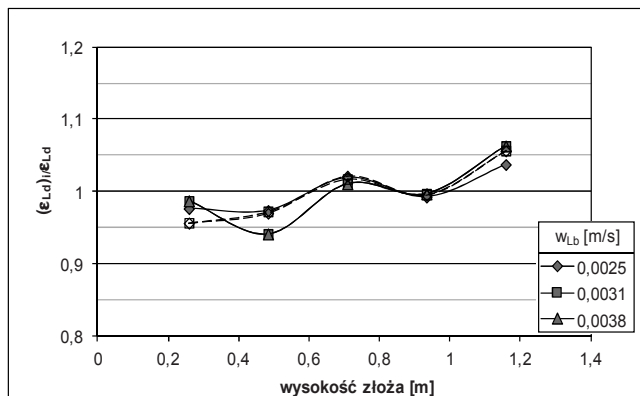
Rys. 8. Mapa przepływu dla $S < 0,3$. Reżim LIPF SLOW
 Fig. 8. Flow regime map for $S < 0,3$. LIPF SLOW mode regime

3.2. ZAWIESZENIE CIECZOWE

3.2.1. ROZKŁAD ZAWIESZENIA CIECZOWEGO WZDŁUŻ WYPEŁNIENIA

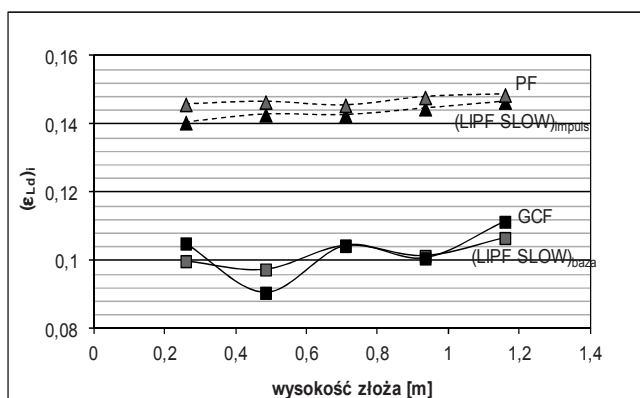
Prowadząc proces przy cyklicznie zmienianym zasilaniu złoża cieczą, niezależnie od czasu trwania poszczególnych cykli, zaobserwować można tworzenie się tzw. fal uderzeniowych, którym odpowiada periodycznie zmienna wartość zawieszenia cieczowego w danym przekroju kolumny. Jak pokazano w literaturze [19, 22, 24], w reżimie CSW obserwuje się zanikanie fali w dolnej części wypełnienia. Jeśli natomiast reaktor pracuje w reżimie LIPF SLOW, wówczas fale uderzeniowe nie zanikają, ale zauważyć można wyraźną ewolucję sygnału. Podczas wędrówki fali wzdłuż złoża obserwuje się bowiem zanikanie i tworzenie nowych naturalnych pulsów w czasie trwania impulsu cieczy. Jak pokazały wyniki doświadczeń (rys. 9), ewolucja ta jednak nie wpływa znacząco na wartość zawieszenia cieczowego w poszczególnych przekrojach wypełnienia (ϵ_{Ld})_i, wartości te nie różnią się bowiem więcej niż $\pm 5\%$ od średniej wartości ϵ_{Ld} , liczonej jako średnia arytmetyczna wartości zawieszenia cieczowego wyznaczonych w pięciu przekrojach kolumny. Można zatem uznać, że ciecz jest równomiernie rozprowadzona wzdłuż wypełnienia, co zgodne jest z sugestiami zawartymi w pracach [14, 20]. Wobec tego, do dalszej analizy oraz opracowania równań korelacyjnych stosowano uśrednioną zarówno w czasie jak i wzdłuż złoża wartość tego parametru.

Interesujące wnioski otrzymano w wyniku porównania lokalnych wartości zawieszenia cieczowego otrzymanych w reżimie LIPF SLOW w bazie i impulsie z wartościami ϵ_{Ld} odpowiednio w reżimie GCF i PF dla $(w_L)_{GCF} = (w_{Lb})_{LIPF}$ oraz $(w_L)_{PF} = (w_{Lip})_{LIPF}$, co przedstawiono na rysunku 10, a co sygnalizowano już w pracy [16].



Rys. 9. Rozkład wartości $(\epsilon_{L,d})/\epsilon_{L,d}$ dla reżimu LIPF SLOW; układ azot – gliceryna 45%, $w_{Lip}=0,0043\text{m/s}$, $t_b=20\text{s}$, $t_{ip}=15\text{s}$, $w_g=0,14\text{m/s}$ – punkty pełne, $w_g=0,26\text{m/s}$ – punkty puste

Fig. 9. Distribution of the values $(\epsilon_{L,d})/\epsilon_{L,d}$ along the bed for LIPF SLOW regime; system: nitrogen-glycerol solution 45 %, $w_{Lip}=0,0043\text{m/s}$, $t_b=20\text{s}$, $t_{ip}=15\text{s}$, $w_g=0,14\text{m/s}$ – open points, $w_g=0,26\text{m/s}$ – solid points



Rys. 10. Porównanie rozkładów zawieszenia cieczowego wzdłuż złoża w bazie (linia ciągła) i impulsie (linia przerywana) otrzymanych w reżimie LIPF SLOW, odpowiednio z właściwymi wartościami dla reżimów GCF i PF. Układ: azot – woda; $w_{Lb}=0,0037\text{m/s}$, $w_{Lip}=0,0082\text{m/s}$, $w_g=0,14\text{m/s}$, $t_b=20\text{s}$, $t_{ip}=20\text{s}$

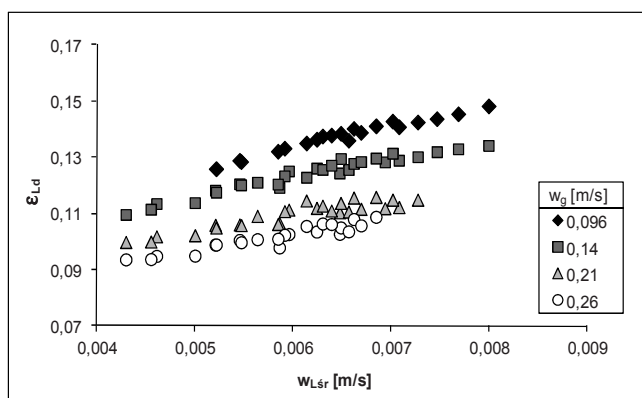
Fig. 10. Liquid holdup distribution along the bed in the base (solid line) and impulse (dotted line) obtained in LIPF SLOW regime in comparison with those obtained in GCF and PF regime, respectively. System: nitrogen – water; $w_{Lb}=0.0037\text{m/s}$, $w_{Lip}=0.0082\text{m/s}$, $w_g=0.14\text{m/s}$, $t_b=20\text{s}$, $t_{ip}=20\text{s}$

Porównanie to wskazuje, że okresowe zraszanie złoża większą ilością cieczy powoduje lepsze rozproszczenie cieczy po jego powierzchni, wynikiem czego jest bardziej równomierny rozkład zawieszenia cieczowego w czasie trwania bazy, w porównaniu do wartości zawieszenia cieczowego wyznaczonej w reżimie GCF przy $(w_L)_{GCF}=(w_L)_{LIPF}$. Można zatem oczekiwać mniejszego prawdopodobieństwa tworze-

nia się tzw. „gorących miejsc” na powierzchni wypełnienia, co jest szczególnie niebezpieczne w aparacie pracującym w reżimie GCF, a zatem i dłuższego „życia” katalizatora.

3.2.2. UŚREDNIONE ZAWIESZENIE CIECZOWE

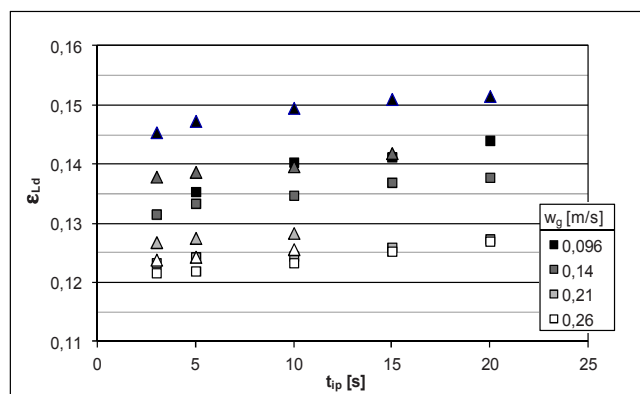
Uśrednione w czasie i wzdłuż złoża wartości zawieszenia cieczowego w reaktorze pracującym przy periodycznie zmiennym zasilaniu złoża cieczą, podobnie jak i dla przepływu ustalonego, rosną ze wzrostem średniej prędkości fazy ciekłej, a maleją ze wzrostem prędkości fazy gazowej, co przedstawiono na rysunku 11. Ponieważ o wartości średniej prędkości fazy ciekłej, jak już wspomniano, decydują cztery parametry (w_{Lb} , w_{Lip} , t_b , t_{ip}), zatem zmiana każdego z nich powinna znaleźć odzwierciedlenie w zmianie ilości cieczy zawieszonych na wypełnieniu.



Rys. 11. Wpływ średniej prędkości fazy ciekłej oraz gazowej na wartość dynamicznego zawieszenia cieczowego w reżimie LIPF SLOW dla układu azot – woda

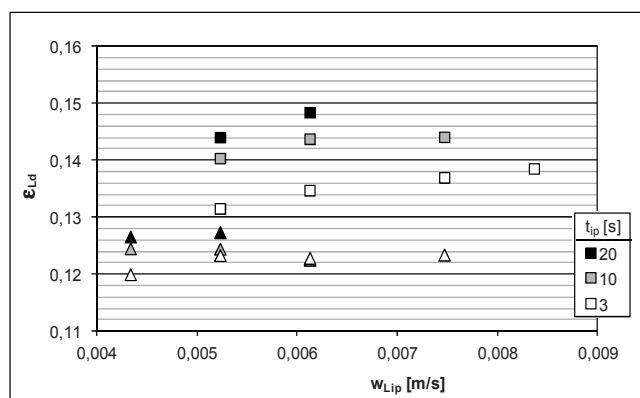
Fig. 11. Effect of average velocity of liquid phase and gas phase on the dynamic liquid holdup value in the LIPF SLOW regime; system: nitrogen-water

Hipotezę tę potwierdziły otrzymane wyniki eksperymentalne, tzn. zawieszenie cieczowe rośnie zarówno ze wzrostem czasu trwania impulsu cieczy, jak również ze wzrostem prędkości cieczy w bazie i impulsie (rys. 12 i 13).



Rys. 12. Wpływ czasu trwania impulsu cieczy oraz prędkości cieczy w bazie na wartość dynamicznego zawieszenia cieczowego dla reżimu LIPF SLOW; układ azot – gliceryna 45%, $w_{Lb}=0,0025$ m/s – kwadraty, $w_{Lb}=0,0031$ m/s – trójkąty

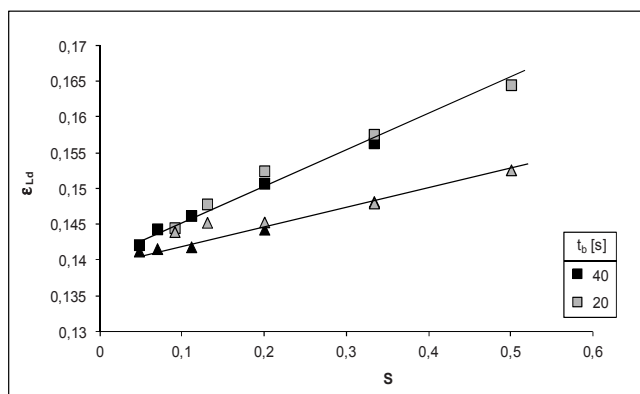
Fig. 12. Effect of impulse time duration and liquid velocity in the base on the dynamic liquid holdup value in the LIPF SLOW regime; system: nitrogen – glycerol solution 45%, $w_{Lb}=0,0025$ m/s – squares, $w_{Lb}=0,0031$ m/s – triangles



Rys. 13. Wpływ prędkości cieczy w impulsie oraz czas jego trwania na wartość dynamicznego zawieszenia cieczowego. Układ: azot – roztwór gliceryny 45%. Reżim LIPF SLOW; $w_g=0,096$ m/s – kwadraty, $w_g=0,21$ m/s – trójkąty

Fig. 13. Effect of liquid velocity in the impulse and its time duration on the dynamic liquid holdup value. System: nitrogen-glycerol solution 45%. LIPF SLOW regime; $w_g=0,096$ m/s – squares, $w_g=0,21$ m/s – triangles

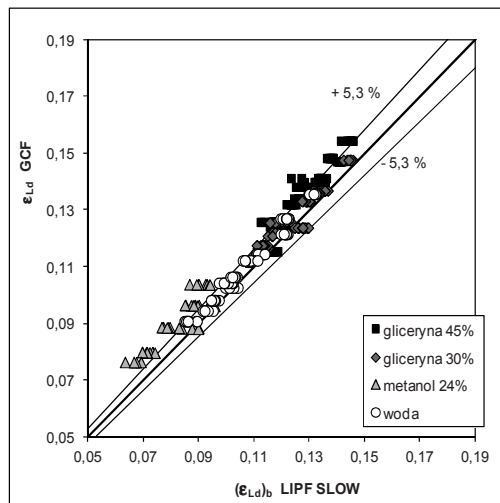
Sprawdzono również wpływ czasu trwania bazy na wartość zawieszenia cieczowego otrzymanego w reżimie LIPF SLOW. Jak stwierdzono, ϵ_{Ld} zmienia się ze zmianą t_b , ale pozostaje stałe dla takich samych wartości współczynnika podziału S (rys. 14), przy ekwiwalentnych wartościach natężeń przepływu obu faz.



Rys. 14. Wpływ zmiany współczynnika podziału (S) na wartości ϵ_{Ld} . Reżim LIPF SLOW. Układ: azot - woda, $w_g=0,096$ m/s, $w_{Lb}=0,0065$ m/s, $w_{Lip}=0,011$ m/s – kwadraty, $w_{Lip}=0,017$ m/s – trójkąty

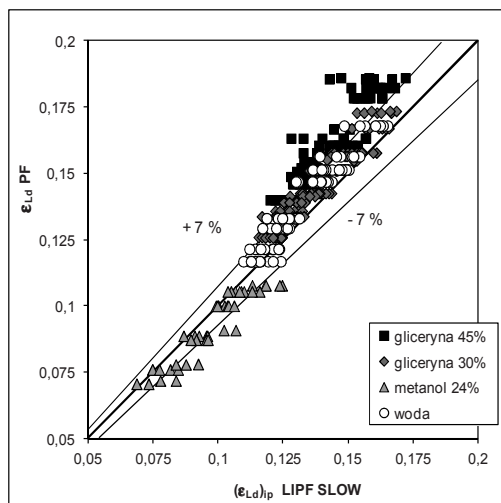
Fig. 14. Effect of SPLIT value (S) on the ϵ_{Ld} value. LIPF SLOW regime. System: nitrogen – water, $w_g=0,096$ m/s, $w_{Lb}=0,0065$ m/s, $w_{Lip}=0,011$ m/s – squares, $w_{Lip}=0,017$ m/s – triangles

Wymuszony przepływ pulsacyjny, prowadzony metodą cykli wolnozmiennych, charakteryzuje się na tyle wolnymi zmianami natężenia przepływu fazy ciekłej, że w danej chwili cała kolumna pracuje albo w reżimie przepływu strumikowego albo naturalnego pulsacyjnego, a granice pomiędzy tymi dwoma reżimami przepływu są bardzo wyraźne. Porównano zatem wartości zawieszenia cieczowego w bazie z zawieszeniem cieczowym w reżimie GCF oraz w impulsie z zawieszeniem cieczowym w reżimie PF, co przedstawiono odpowiednio na rysunkach 15 i 16. Jak można zauważyć, dla testowanych układów pomiarowych, wartości ϵ_{Ld} w bazie są porównywalne z wartościami zawieszenia cieczowego w reżimie GCF dla $(w_{Lb})_{LIPF} = (w_L)_{GCF}$, natomiast w impulsie, za wyjątkiem roztworu metanolu 24%, mniejsze niż w naturalnym przepływie pulsacyjnym. Największe różnice pomiędzy wartościami $(\epsilon_{Ld})_{PF}$ i $(\epsilon_{Ld})_{ip}$, obserwuje się dla krótkich czasów trwania impulsu cieczy i najmniejszej prędkości cieczy w bazie (co zaznaczono zaciemnionym obszarem na rysunku 16). Dla takich parametrów ruchowych reaktora obserwuje się bowiem ucieczkę cieczy w impulsie, co wpływa w widoczny sposób na wartość zawieszenia cieczowego w impulsie [13]. Odmienne wyniki otrzymane dla roztworu metanolu 24% związane są z faktem tworzenia przez ten układ w reżimach PF i LIPF SLOW intensywnej, lekkiej piany, a dla tego typu układów, jak wykazano w pracach [25, 26], inna jest struktura tworzących się pulsów oraz wartość zawieszenia cieczowego.



Rys. 15. Porównanie wartości dynamicznego zawieszenia cieczowego w bazie dla reżimu LIPF SLOW z wartościami $\epsilon_{L,d}$ otrzymanym w reżimie GCF dla $(w_{Lb})_{LIPF} = (w_L)_{GCF}$

Fig. 15. Comparison of dynamic liquid holdup in the base for LIPF SLOW regime and $\epsilon_{L,d}$ values obtained in the GCF regime for $(w_{Lb})_{LIPF} = (w_L)_{GCF}$



Rys. 16. Porównanie wartości dynamicznego zawieszenia cieczowego w impulsie dla reżimu LIPF SLOW z wartością tego parametru w reżimie PF dla $(w_{Lip})_{LIPF} = (w_L)_{PF}$

Fig. 16. Comparison of dynamic liquid holdup in the impulse for LIPF SLOW regime and $\epsilon_{L,d}$ values obtained in the PF regime for $(w_{Lip})_{LIPF} = (w_L)_{PF}$

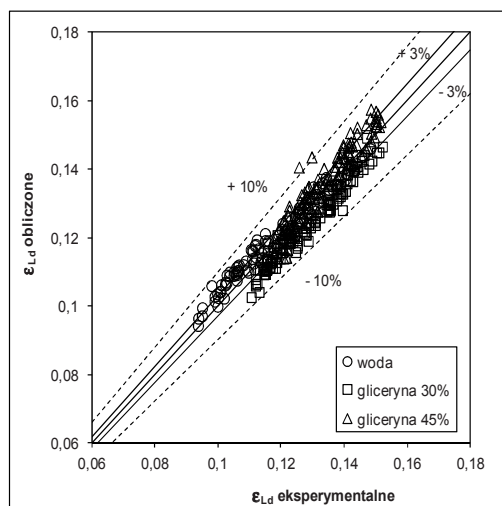
Mniejsza wartość ε_{Ld} w impulsie cieczy otrzymana w reżimie LIPF w porównaniu do reżimu PF może wydawać się niekorzystna, jednak z drugiej strony stosowanie mniejszych średnich prędkości zraszania w reżimie LIPF SLOW powoduje wydłużenie czasu przebywania reagentów znajdujących się w fazie ciekłej, a zatem, dla pewnych procesów (wymagających dłuższego czasu przebywania) oczekiwać można większego stopnia przereagowania w porównaniu do uzyskiwanego w naturalnym przepływie pulsacyjnym.

Wpływ właściwości fizykochemicznych badanych układów na wartość zawieszenia cieczowego dla reżimu LIPF SLOW jest taki sam, jak w reżimie PF i GCF. Stwierdzono bowiem, że wzrost lepkości cieczy zraszającej złoże powoduje wzrost ilości cieczy zawieszanej na wypełnieniu, natomiast obniżenie napięcia powierzchniowego obniża wartość tego parametru, co przedstawiono w pracy [13].

W literaturze znaleźć można korelacje opisujące eksperymentalne wartości zawieszenia cieczowego otrzymane w reaktorze pracującym przy okresowo zmiennym zasilaniu złoże cieczą realizowanym metodą ON-OFF i cykli szybkozmiennych [24, 27] w postaci równania opracowanego przez Larachiego i wsp. [28]. Należy jednak podkreślić, że wspomniani autorzy wykonali badania wyłącznie dla układu powietrze – woda, zatem zastosowanie równania opracowanego przez Larachiego i wsp. [28] dla skorelowania danych pomiarowych było mało uzasadnione. W pracach [14-16, 20], dla metody BAZA-IMPULS i cykli wolnozmiennych zaproponowano natomiast równanie korelacyjne w postaci zależności opracowanej dla reżimu GCF przez Specchię i Baldiego [29]. Jak pokazano w pracy [16] zależność postaci:

$$S_{Ld} = 3,304 \cdot (\text{Re}_{Lsr})^{0,5} \cdot (\text{Ga}'_{Lsr})^{-0,396} \cdot \left(\frac{ad_p}{\varepsilon} \right)^{0,65} \quad (1)$$

z najlepszą dokładnością opisuje zmierzone wartości ε_{Ld} ($e_y=3\%$ i $\sigma_{st}=2\%$), co przedstawiono na rysunku 17. W równaniu tym wpływ fazy gazowej na wartość zawieszenia cieczowego ujęty został poprzez zmodyfikowaną liczbę Galileusza. Równanie to nie opisuje jednak z wystarczającą dokładnością wartości ε_{Ld} otrzymanych dla układu azot – metanol 24%, dla którego otrzymano znacznie mniejsze zawieszenie cieczowe niż dla pozostałych układów pomiarowych, co związane jest z pienieniem się tego układu.

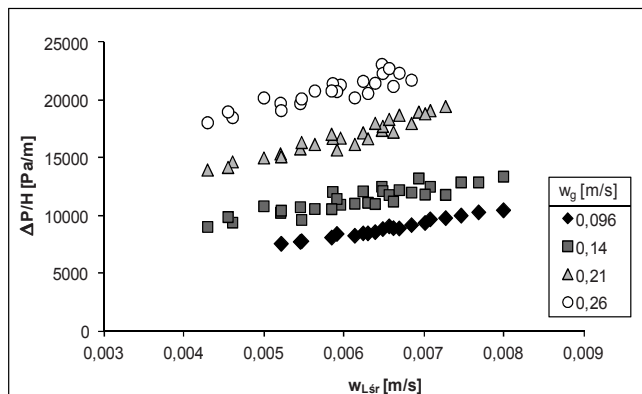


Rys. 17. Porównanie zmierzonych i obliczonych z równania (1) wartości zawieszenia cieczowego
 Fig. 17. Comparison of liquid holdup values calculated from Eq. (1) with those obtained experimentally

3.3. SPADEK CIŚNIENIA GAZU W ZŁOŻU

Wartość spadku ciśnienia gazu na wypełnieniu, która jest nierozzerwalnie związana z ilością cieczy zawieszanej w złożu, rośnie zarówno ze wzrostem prędkości fazy gazowej jak i fazy ciekłej (rys. 18). Wpływ zmiany parametrów charakteryzujących cykliczny przepływ cieczy przez kolumnę na wartość spadku ciśnienia gazu w złożu jest podobny jak na zawieszenie cieczowe – wartość $\Delta P/H$ rośnie ze wzrostem każdego z analizowanych parametrów, natomiast pozostaje stała dla takiej samej wartości współczynnika podziału S .

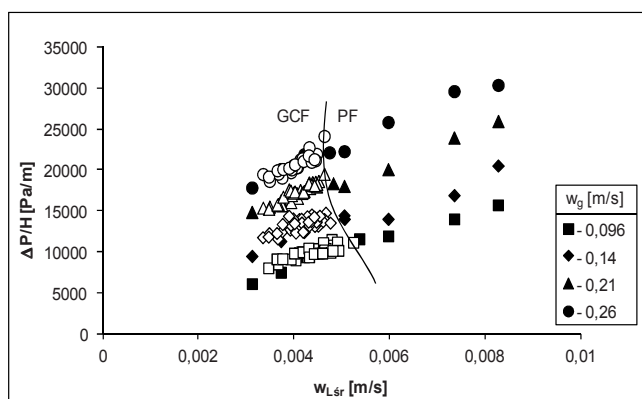
Również wpływ właściwości fizykochemicznych badanych układów na spadek ciśnienia gazu w złożu, zarówno dla przepływu ustalonego jak i cyklicznie zmiennego jest taki sam: wzrost lepkości roztworu zwiększa opory przepływu gazu przez wypełnienie, natomiast obniżenie napięcia powierzchniowego skutkuje mniejszym spadkiem ciśnienia gazu w złożu [13].



Rys. 18. Wpływ średniej prędkości fazy ciekłej i gazowej na wartość spadku ciśnienia gazu w złożu w reżimie LIPF SLOW. Układ azot – woda

Fig. 18. Effect of average velocity of liquid phase and gas phase on the pressure drop value in the LIPF SLOW regime. System: nitrogen-water

Porównując wyznaczone eksperymentalnie wartości $\Delta P/H$ dla reżimów LIPF SLOW, GCF i PF stwierdzono, że niezależnie od czasów trwania poszczególnych cykli, spadek ciśnienia gazu w złożu dla reżimu LIPF SLOW jest tylko nieco większy od wartości tego parametru hydrodynamicznego wyznaczonego w reżimie GCF dla $(w_L)_{GCF} = (w_{Lsr})_{LIPF}$ (rys. 19).



Rys. 19. Porównanie spadków ciśnienia gazu w złożu otrzymanych w reżimach GCF i PF (punkty pełne) oraz LIPF SLOW (punkty puste) dla roztworu gliceryny 30%

Fig. 19. Comparison of the pressure drop in the bed obtained in the GCF and PF regimes (solid points) and in the LIPF SLOW regime (open points) for glycerol solution 30%

Jak można znaleźć w literaturze [13, 14, 16, 20] wartości spadków ciśnienia gazu w złożu z bardzo dobrą dokładnością opisuje równanie w postaci opracowanej przez

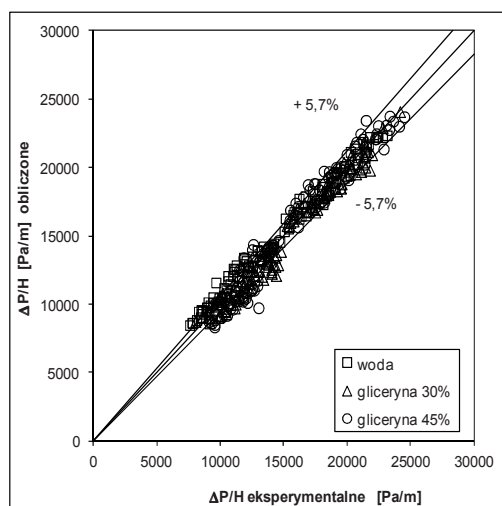
Sai i Varmę [30] dla reżimu PF, w którym wyestymowano stałą i wykładniki równania, ostatecznie otrzymując zależność:

$$F = 12231 \cdot \left(\frac{Re_g}{Re_{Lsr}} \right)^{0,7} \cdot \left(\frac{\sigma_w}{\sigma_L} \right)^{0,05} \quad (2)$$

gdzie

$$F = \left(\frac{\Delta P}{H} \right) \cdot \left(\frac{2d_p}{\rho_L w_{Lsr}^2} \right) \cdot Re_{Lsr}^{0,77} \quad (3)$$

Równanie to, ze średnim błędem względnym $e_y=5,69\%$ ($\sigma_{st}=4,27\%$), przybliża wszystkie eksperymentalne dane za wyjątkiem otrzymanych dla układu azot – metanol 24% (rys. 20).



Rys. 20. Porównanie wartości $\Delta P/H$ wyznaczonych eksperymentalnie oraz obliczonych z równania 3 dla reżimu LIPF SLOW

Fig. 20. Comparison of $\Delta P/H$ values calculated from Eq. (3) with those obtained experimentally for LIPF SLOW regime

WNIOSKI

- Potwierdzono możliwość poprawy efektywności procesów prowadzonych w reaktorach trójfazowych poprzez zmianę reżimu z GCF na LIPF SLOW (lepsze roz-

przewodzenie cieczy wzdłuż aparatu, lepsze zwilżenie złoża w czasie trwania impulsu cieczy, porównywalne w obu reżimach spadki ciśnienia gazu w złożu).

- Opracowano uniwersalne mapy przepływu, które pozwalają określić parametry ruchowe reaktora, przy których występować będzie reżim LIPF SLOW.
- Opracowano równania korelacyjne umożliwiające oszacowanie wartości podstawowych parametrów hydrodynamicznych.
- Proponowana strategia pracy reaktora wydaje się bezpieczną metodą jego eksploatacji bowiem, jak wykazały profile zmian wartości zawieszenia cieczonego wzdłuż złoża, w reżimie LIPF oczekiwać można bardziej równomiernego rozprzewodzenia cieczy po powierzchni wypełnienia, co może prowadzić do wyeliminowania niebezpieczeństwa powstawania „gorących miejsc” na powierzchni kontaktu.
- Można oczekiwać, że w aparacie pracującym w reżimie LIPF SLOW prowadzonym metodą BAZA-IMPULS, małe natężenia przepływu cieczy w bazie (czego rezultatem jest cienki film cieczy na powierzchni katalizatora) i pulsacje w czasie impulsu cieczy (które powodują odświeżenie filmu cieczy na powierzchni wypełnienia) poprawią wymianę masy oraz transport ciepła.

OZNACZENIA - SYMBOLS

a	powierzchnia właściwa wypełnienia, m^{-1} specific packing surface, m^{-1}
d_p	średnica wypełnienia, m diameter of packing, m
$e_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left \frac{Y_{eks,i} - Y_{obl,i}}{Y_{eks,i}} \right \cdot 100\%$	średni błąd względny, % average absolute relative error
G	natężenie przepływu gazu, $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ mass flow rate of gas, $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
\tilde{g}	przyśpieszenie grawitacyjne, ms^{-2} acceleration of gravity, ms^{-2}
$Ga' = \frac{d_p^3 \rho (\rho \tilde{g} + \Delta P_{Lg})}{\mu^2}$	zmodyfikowana liczba Galileusza modified Galileo number
H	wysokość złoża, m bed height, m
L	natężenie przepływu cieczy, $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ mass flow rate of liquid, $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
ΔP	spadek ciśnienia, Pa pressure drop, Pa
$Re = wd_p \rho / \mu$	liczba Reynoldsa Reynolds number
$S = t_{ip} / (t_b + t_{ip})$	współczynnik podziału split
S_{Ld}	dynamiczne nasycenie złoża cieczą

	liquid saturation	
t	czas, s time, s	
w_α	prędkość fazy α liczona na przekrój pustego aparatu, $m \cdot s^{-1}$ superficial velocity, $m \cdot s^{-1}$	
ε	porowatość wypełnienia bed porosity	
$\varepsilon_{L,d}$	dynamiczne zawieszenie cieczowe dynamic liquid hold-up	
$\lambda = \left[\left(\frac{\rho_g}{\rho_{pow}} \right) \cdot \left(\frac{\rho_L}{\rho_w} \right) \right]^{1/2}$	parametr przepływu flow parameter	
μ	dynamiczny współczynnik lepkości, Pas dynamic viscosity, Pas	
ρ	gęstość, $kg \cdot m^{-3}$ density, $kg \cdot m^{-3}$	
σ	napięcie powierzchniowe, $N \cdot m^{-1}$ surface tension, $N \cdot m^{-1}$	
$\sigma_{st} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Y_{eks,i} - Y_{obl,i}}{Y_{eks,i}} - e_Y \right)^2}$	odchylenie standardowe, % standard deviation, %	
$\psi = \frac{\sigma_w}{\sigma_L} \left[\frac{\mu_L}{\mu_w} \left(\frac{\rho_w}{\rho_L} \right)^2 \right]^{1/3}$	parametr przepływu flow parameter	

NDEKSY DOLNE I GÓRNE – SUBSCRIPTS AND SUPERSCRIPTS

b	baza base
g	faza gazowa gas phase
ip	impuls impulse
L	faza ciepla liquid phase
pow	powietrze air
śr	wartość średnia average value
w	woda water
α	– L or g

PIŚMIENICTWO CYTOWANE - REFERENCES

- [1] NIGAM K.D.P., LARACHI F., *Process intensification in trickle-bed reactors*, Chem. Eng. Sci., 2005, 60, 5880.
- [2] HAURE P.M., HUDGINS R.R., SILVESTON P.L., *Periodic operation of a trickle-bed reactor*, AIChE J., 1989, 35, 1437.
- [3] CASTELLARI A.T., HAURE P.M., *Experimental study of the periodic operation of a trickle-bed reactor*, AIChE J., 1995, 41, 1593.
- [4] GABARAIN L., CASTELLARI A.T., CECHINI J., TOBOLSKI A. HAURE P., *Analysis of rate enhancement in a periodically operated trickle-bed reactor*, AIChE J., 1997, 43, 166.
- [5] TURCO F., HUDGINS R.R., SILVESTON P.L., SICARDI S., MANNA L., Banchemo M., *Investigation of periodic operation of trickle-bed reactor*, Chem. Eng. Sci., 2001, 56, 1429.
- [6] KHADILKAR M.R., AL-DAHMAN M.H., DUDUKOWIC M.P., *Parametric study of unsteady-state modulation in trickle-bed reactors*, Chem. Eng. Sci., 1999, 54, 2585.
- [7] URSEANU M.I., BOELHOUWER J.G., BOSMAN H.J.M., SCHROIJEN J.C., *Induced pulse operation of high-pressure trickle bed reactors with organic liquids: hydrodynamics and reaction study*, Chem. Eng. and Process., 2004, 43, 1411.
- [8] TUKAČ V., ŠIMÍČKOVÁ M., CHYBA V., LEDERER J., KOLENA J., HANIKA J., JIŘIČNÝ V., STANĚK V., STAVÁREK P., *The behaviour of pilot trickle-bed reactor under periodic operation*, Chem. Eng. Sci., 2007, 62, 4891.
- [9] AYDIN B., FRIES D., LANGE R., LARACHI F., *Slow-mode induced pulsing in trickle-bed reactors at elevated temperature*, AIChE J., 2006, 52, 3891.
- [10] AYDIN B., FRIES D., LANGE R., LARACHI F., *Slow-mode induced pulsing in trickle beds at elevated temperature for (non-) Newtonian liquids*, Chem. Eng. Sci., 2007, 62, 5554.
- [11] AYDIN B., LARACHI F., *Structure of trickle-to-pulse flow regime transition and pulse dynamics at elevated temperature in slow-mode cyclic operation*, Chem. Eng. Sci., 2008, 63, 1510.
- [12] BARTELMUS G., GANCARCZYK A., JAROSLAWSKA E., *The influence of changes in physicochemical properties of liquid on the hydrodynamics of trickle-bed reactor working in the forced pulsing flow*, materiały konferencyjne 7th World Congress of Chemical Engineering, Glasgow, 2005.
- [13] BARTELMUS G., BURGHARDT A., GANCARCZYK A., JAROSLAWSKA E., *Hydrodynamika reaktora trójfazowego pracującego w wymuszonym cieczą przepływie pulsacyjnym*, Inż. Chem. i Proc., 2006, 27, 107.
- [14] BARTELMUS G., GANCARCZYK A., KRÓTKI T., MOKROSZ T., *Solid – liquid mass transfer in a fixed – bed reactor operating in induced pulsing flow regime*, materiały konferencyjne 6th European Congress of Chemical Engineering, Kopenhaga, 2007, T.2, 297.
- [15] BARTELMUS G., KRÓTKI T., GANCARCZYK A., *Experimental analysis of hydrodynamics and liquid/solid mass transfer in a trickle-bed reactor operating at induced pulsing flow regime*, Chem. Process Eng., 2008, 29, 551.
- [16] BARTELMUS G., GANCARCZYK A., KRÓTKI T., *Intensyfikacja procesów prowadzonych w reaktorach trójfazowych ze stałym złożem poprzez zastosowanie operacji periodycznych*, Inż. i Ap. Chem., 2010, 49, 15.
- [17] BOELHOUWER J.G., PIEPERS A.A., DRINKENBURG A.A.H., *Enlargement of the pulsing flow regime by periodic operation of trickle-bed reactor*, Chem. Eng. Sci., 1999, 54, 4661.
- [18] BOELHOUWER J.G., PIEPERS A.A., DRINKENBURG A.A.H., *The induction of pulses in trickle-bed reactors by cycling the liquid feed*, Chem. Eng. Sci., 2001, 56, 2605.
- [19] BOELHOUWER J.G., PIEPERS A.A., DRINKENBURG A.A.H., *Liquid – induced pulsing flow in trickle-bed reactors*, Chem. Eng. Sci., 2002, 57, 3387.
- [20] GANCARCZYK A., BARTELMUS G., KRÓTKI T., *The effect of the liquid phase physicochemical properties on the hydrodynamics of trickle-bed reactor operating at the induced pulsing flow*, Chem. Process Eng., 2007, 28, 815.

- [21] BANCHERO M., MANNA L., SICARDI S., FERRI A., *Experimental investigation of fast-mode liquid modulation in a trickle-bed reactor*, Chem. Eng. Sci., 2004, 59, 4149.
- [22] AYUDE M.A., MARTINEZ O.M., CASSANELLO M.C., *Modulation of liquid holdup along a trickle bed reactor with periodic operation*, Chem. Eng. Sci., 2007, 62, 6002.
- [23] BOELHOUWER J.G., PIEPERS A.A., DRINKENBURG A.A.H., *Advantages of forced non-steady operated trickle-bed reactors*, Chem. Eng. Technol., 2002, 25, 647.
- [24] TRIVIZADAKIS M.E., GIAKOUMAKIS D., KARABELAS A.J., *Induced pulsing in trickle beds – Particle shape and size effects on pulse characteristics*, Chem. Eng. Sci., 2006, 61, 7448
- [25] SZLEMP A., JANECKI D., BARTELMUS G., *Hydrodynamics of a co-current three-phase solid-bed reactor for foaming systems*, Chem. Eng. Sci., 2001, 56, 1111.
- [26] BARTELMUS G., JANECKI D., *Hydrodynamics of a cocurrent downflow of gas and foaming liquid through the packed bed. Part II. Liquid holdup and gas pressure drop*, Chem. Eng. Process., 2003, 42, 993.
- [27] GIAKOUMAKIS D., KOSTOGLU M., KARABELAS A.J., *Induced pulsing in trickle beds – characteristics and attenuation of pulses*, Chem. Eng. Sci., 2005, 60, 5183.
- [28] LARACHI F., LAURENT A., MIDOUX N., WILD G., *Experimental study of a trickle-bed reactor operating at high pressure: two-phase pressure drop and liquid saturation*, Chem. Eng. Sci., 1991, 46, 1233.
- [29] SPECCHIA V., BALDI G., *Pressure drop and liquid hold-up for two phase cocurrent flow in packed beds*, Chem. Eng. Sci., 1977, 32, 515.
- [30] SAI P.S.T., VARMA Y.B.G., *Flow pattern of the phases and liquid saturation in gas-liquid cocurrent downflow trough packed beds*, Can. J. Chem. Eng., 1988, 66, 353.

ANNA GANCARCZYK, GRAŻYNA BARTELMUS, ANDRZEJ BURGHARDT

INDUCED PULSING FLOW AS INTENSIFICATION METHOD OF PROCESSES CARRIED OUT TRICKLE-BED REACTORS

The values of hydrodynamic parameters were determined experimentally in a trickle-bed reactor. The measurements were performed for liquid induced pulsing flow (LIPF) regime at periodic liquid feed by means of the BASE – IMPULSE method and at slow changing cycles (SLOW MODE). During experiments, several parameters were changed like the gas velocity, liquid velocity in the base and impulse as well as liquid physicochemical properties (water, water solutions of glycerol and methanol). In the first step, it was necessary to determine the range of changes in operational parameters for which the LIPF regime takes place. The effect of the individual parameters describing periodic liquid flow (w_{Lip} , w_{Lb} , t_{ip} , t_b) on the gas velocity necessary for the CSW/LIPF regime change was determined. Based on experimental data, two universal flow maps were designed. The choice of the proper map depends on the SPLIT value. These maps allow to select correct parameters, at which LIPF regime occurs inside the reactor. Next, liquid holdup and gas pressure drop in the LIPF regime were determined. The values of these parameters obtained experimentally for the natural pulsing flow (PF) and gas continuous flow (GCF) regimes were the basis for comparison with the LIPF regime results. The measurements of the liquid holdup using 5 separate electrodes carried out in LIPF regime have shown almost homogeneous distribution of the liquid along the bed. The values of the liquid holdup along the bed obtained for the LIPF regime in the base and impulse were compared with those obtained in GCF and PF regimes respectively. These showed that liquid holdup in the base is similar to the values obtained in GCF regime and in impulse slightly lower than obtained in PF regime. Pressure drop for LIPF, GCF and PF regimes were compared too. Their values found for LIPF regime were only a slightly higher than those for GCF regime. The equations correlating the measured values of dynamic liquid holdup and gas pressure drop were derived. These equations are correct for liquids of different physicochemical properties.