

Łukasz MAKOWSKI, Ewelina WYSZOMIERSKA, Piotr GROCHOWIECKI

e-mail: lukasz.makowski.ichip@pw.edu.pl

Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Warszawska, Warszawa

Modelowanie procesu napełniania przy użyciu obliczeniowej mechaniki płynów

Wstęp

W branży dóbr szybko zbywalnych FMCG (*Fast-Moving Consumer Goods*) dozowanie ciekłego produktu do pojemników jest jednym z ostatnich elementów procesu przemysłowego. Z wielu powodów proces ten stanowi wyzwanie dla inżynierów w dobie masowej produkcji oraz standaryzacji.

Najczęściej dozowanie odbywa się szybko, a objętość produktu w każdym pojemniku jest odmierzana z dużą precyzją. Ponadto różne czasy w zależności od właściwości fizykochemicznych w trakcie dozowania mogą powodować niepożądane efekty, takie jak pienienie lub uleganie dekarbonizacji. Należy rozważyć przede wszystkim takie właściwości, jak: gęstość, lepkość, granica płynięcia dla cieczy nienewtonowskich czy napięcie powierzchniowe ciecz-gaz.

Na przebieg procesu napełniania mogą wpłynąć również takie czynniki, jak kształt pojemnika, ich liczba napełniana w jednostce czasu oraz zanurzenie dyszy [Tomé i in., 2014]. W przypadku złego doboru parametrów może dojść do wytworzenia piany w układzie, co jest efektem niepożądanym, ponieważ czas potrzebny na degradację piany wielokrotnie wydłużyłby cały etap dozowania [Hain i in., 2009; Roberts i Rao, 2011]. Zjawiskiem sprzyjającym formowaniu piany jest przede wszystkim złożony i burzliwy ruch cieczy prowadzący do uwiecznienia kieszeni powietrza.

Przedmiotem niniejszej pracy jest modelowanie procesu napełniania pojemników cieczami pieniącymi się o różnych właściwościach fizykochemicznych.

Modelowanie

Obliczeniowa część pracy przedstawia wyniki symulacji mające na celu porównanie procesu napełniania butelki cieczami o różnych właściwościach reologicznych i fizycznych, tj. lepkość, gęstość czy napięcie powierzchniowe oraz określenie wpływu tych parametrów na ilość zatrzymanego powietrza w cieczy.

Rozważana geometria składa się z butelki o objętości cieczy 500 dm³ i dyszy dozującej ciecz o średnicy 12 mm umieszczonej na głębokości 85 mm. Wylot z butelki miał postać pierścieniowego otworu o średnicy zastępczej 8 mm.

Materiały. Do modelowania wybrano trzy cieczy newtonowskie odpowiadające parametrom fizyko-chemicznym następujących cieczy: ciecz 1 – woda, ciecz 2 – piwo, ciecz 3 – mleko, ciecz 4 – szampon. Szampon był płynem nienewtonowskim tiksotropowym, rozrzedzanym ścinaniem, ale w celu uproszczenia zagadnienia pominięto wpływ czasu na lepkość. W tab. 1 podano właściwości modelowanych płynów, a w przypadku cieczy 4 zamiast wartości lepkości został podany model *Ostwalda-de Waele'a* z zakresem szybkości ścinania. W obliczeniach założono, że dozowana ciecz jest układem jednofazowym.

Tab. 1. Właściwości modelowanych cieczy

Ciecz	Gęstość [kg·m ⁻³]	Dynamiczny współczynnik lepkości, [Pa·s]	Napięcie powierzchniowe [N·m ⁻¹]
1	998,2	0,001003	0,072
2	1008	0,001543	0,047
3	1032	0,002500	0,051
4	1030	$\tau = 3,335\dot{\gamma}^{0,7558}$ $\dot{\gamma} = 5 - 35$ [s ⁻¹]	0,032

Parametry operacyjne. W celu uzyskania wydajniejszej produkcji, proces napełniania butelek powinien być szybki. W tab. 2 zostały zebrane wszystkie parametry operacyjne dla rozważanych przypadków. W obliczeniach przy użyciu obliczeniowej mechaniki płynów wykazano, że dla czasu napełniania 2,5 s ciecz 1 wylewa się z butelki w trakcie napełniania, z tego względu obliczenia dla pozostałych cieczy przeprowadzono dla dwóch czasów: 3 i 5 s.

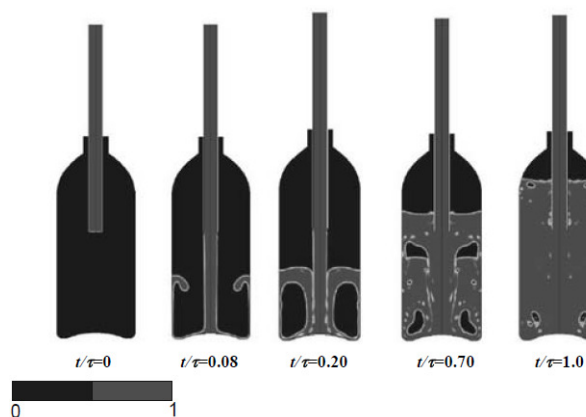
Tab. 2. Parametry operacyjne rozważanych symulacji

Czas napełniania τ [s]	Strumień objętościowy Q , [dm ³ ·s ⁻¹]	Prędkość na wylocie z dyszy, [m·s ⁻¹]
2,5	200	1,77
3,0	167	1,47
5,0	100	0,88

Oprogramowanie. Do przeprowadzenia symulacji wykorzystano oprogramowanie *ANSYS 18.2*. Rozważano przepływ nieustalony w układzie osiowo-symetrycznym. W obliczeniach wykorzystano model VOF (*Volume of Fluid*) do modelowania układu dwufazowego gaz-ciecz, uwzględniający efekty napięcia powierzchniowego i adhezji na granicy międzyfazowej.

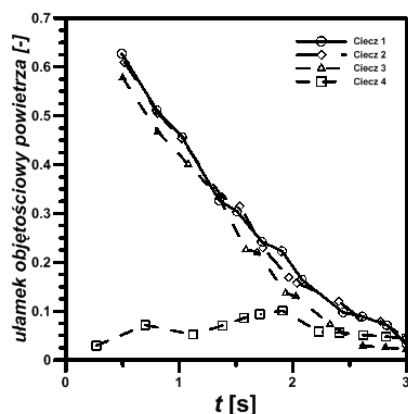
Wyniki i dyskusja

Wyniki obliczeń przedstawiono na wykresach konturowych ułamka objętościowego cieczy (0 – oznacza czyste powietrze, a 1 – czystą ciecz). Czas podano w postaci bezwymiarowej, jako stosunek czasu chwilowego t do czasu końcowego procesu τ . Ponadto dla czasów napełniania 3 i 5 s wykonano wykresy zależności ułamka objętościowego powietrza zatrzymanego w cieczy od czasu trwania dozowania. Zostały one wykonane tylko dla momentów czasu, dla których lustro cieczy było płaskie i równoległe do dna butelki. Dla każdego z etapów wyodrębniano obszar komórek numerycznych, który reprezentował objętość cieczy znajdującej się w butelce. Następnie wyznaczano objętość mieszaniny powietrze-ciecz oraz objętość powietrza znajdującego się w tej cieczy. Kolejno określano wartość ułamka objętościowego powietrza, którym jest stosunek objętości powietrza do objętości mieszaniny.

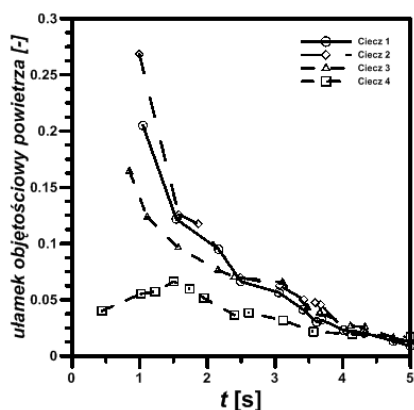


Rys. 1. Wykresy konturowe ułamka objętościowego cieczy 1 w butelce w trakcie napełniania, $Q = 167$ dm³·s⁻¹, $\tau = 3$ s (0 – oznacza czyste powietrze, a 1 – czystą ciecz)

Na rys. 2 przedstawiono przebiegi zmiany ilości zatrzymanego powietrza w cieczy w kolejnych momentach procesu dla czasu napełniania $\tau = 3$ s. Przebieg krzywych dla cieczy newtonowskich jest podobny, tzn. największa zmiana następuje na początku procesu, a najmniej pęcherzyków powietrza jest uwalniana na końcu. W przypadku cieczy 1 i 2 linie prawie się pokrywają; dla cieczy 3 – zawartość powietrza w cieczy w każdym etapie jest mniejsza. Może to wynikać z dokładności metody wyznaczania ułamka objętościowego powietrza – części płynu w butelce są wycinane i w zależności od kształtu powierzchni swobodnej może powodować błąd w otrzymanych obliczeniach. To samo dotyczy ułamka objętościowego powietrza w cieczy 4 – lustro cieczy bardzo rzadko jest idealnie równoległe do dna butelki. Jednakże widać, że przebieg krzywej dla cieczy nienewtonowskiej jest inny niż dla cieczy newtonowskich. Ilość zatrzymanego powietrza w cieczy zmienia się minimalnie. Wynika to z dużej różnicy lepkości obu cieczy: ciecz 4 jest ok. 2000 bardziej lepka od wody (ciecz 1). Stąd też powstaje niewielka liczba pęcherzyków i tylko nieliczne pękają przed zakończeniem procesu. Jest to oczywiście związane z kształtem strumienia cieczy rozprzyskającego się w butelce w pierwszym etapie dozowania.



Rys. 2. Zależność ułamka objętościowego powietrza zatrzymanego w cieczy od czasu napełniania, $Q = 167 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$, $\tau = 3$ s

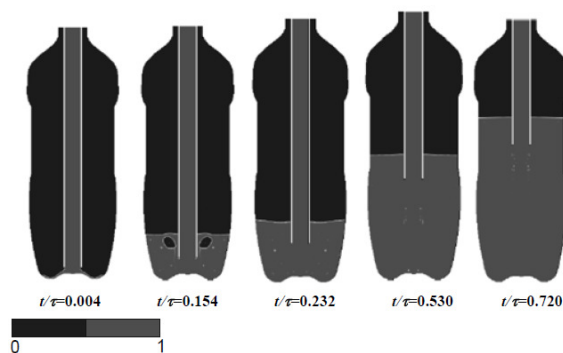


Rys. 3. Zależność ułamka objętościowego powietrza zatrzymanego w cieczy od czasu napełniania, $Q = 100 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$, $\tau = 5$ s

W przypadku dłuższego czasu napełniania (Rys. 3) przebieg krzywych jest podobny, choć wartości ułamka objętościowego powietrza zatrzymanego w cieczy są ponad dwukrotnie mniejsze. Dla cieczy newtonowskich największy spadek w ułamku objętościowym powietrza jest zauważalny na początku procesu, a pod koniec zmiana jest nieznaczna; dla cieczy 4 krzywa jest nieregularna i większość powietrza, która została zatrzymana w cieczy nie wypływa. Na początku najwięcej powietrza jest zatrzymane dla cieczy 2, ponieważ charakteryzuje się najmniejszą wartością napięcia powierzchniowego, które wpływa na liczbę powstałych pęcherzyków powietrza. Ciecz 3, choć ma napięcie powierzchniowe zbliżone do pozostałych cieczy, charakteryzuje się mniejszym ułamkiem

objętościowym powietrza w cieczy w porównaniu z innymi cieczami newtonowskimi, a wynika to z faktu, że ma większą od nich lepkość. Jak widać po przebiegu krzywej dla cieczy 4 lepkość ma większy wpływ na ilość zatrzymanego powietrza oraz na przebieg samego procesu niż napięcie powierzchniowe. W rozważanym układzie zastosowano dyszę prostą zanurzoną prawie do połowy wysokości butelki. Przy rozlewaniu bardziej złożonych cieczy, np. o dużej lepkości może wynikać problem podczas nalewania cieczy do następnych butelek, ponieważ ciecz może brudzić linię produkcyjną lub opakowania.

Dodatkowo najmniejsze zatrzymanie powietrza następowało, gdy ciecz przekroczyła wlot dyszy (wypływ zanurzony). Dlatego też lepszym rozwiązaniem powinna być ruchoma dysza, która wraz z procesem unosi się, będąc jednocześnie minimalnie zanurzona w cieczy. Z tego względu kolejnym rozpatrywanym przypadkiem było dozowanie cieczy 1 do początkowo wypełnionej powietrzem butelki za pomocą ruchomej dyszy dozującej o przekroju kołowym. Dysza początkowo znajduje się 5 mm ponad dnem butelki. Aby znacząco ograniczyć powstawanie piany w układzie należy znaleźć odpowiednią szybkość wysuwania tak, aby przez większość procesu dozowanie odbywało się w zanurzeniu, pamiętając, że w początkowym etapie lustro cieczy nie jest płaskie. Ustalono, że dysza pozostaje nieruchoma aż do czasu $t/\tau = 0,1$, zaś później porusza się ze stałą prędkością. Zauważono, że od czasu $t/\tau = 0,186$ (Rys. 4) powierzchnia cieczy jest gładka i możliwość powstawania piany jest znacząco ograniczona.



Rys. 4. Wykresy konturowe ułamka objętościowego cieczy 1 w butelce w trakcie napełniania z ruchomą dyszą, $Q = 100 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$, $\tau = 5$ s (0 – oznacza czyste powietrze, 1 – czystą ciecz)

Wnioski

W pracy zauważono wyraźny wpływ lepkości na ilość zatrzymanego powietrza w cieczy.

W przypadku cieczy o zbliżonej lepkości znaczący wpływ miała wartość napięcia powierzchniowego.

Wprowadzenie do układu dyszy o zmiennym położeniu znacząco zmniejszyło ilość powietrza zatrzymanego w cieczy. Możliwe są dalsze modyfikacje procesu, ale wpływ zatopiony nie może być zastosowany w przypadku każdego medium.

Odpowiednia zmiana natężenia objętościowego w trakcie dozowania również mogłaby przyczynić się do ograniczenia chlapania.

LITERATURA

- Hain K., Wels H., Muhr M., (2009). Simulation of the filling of polyethylene – terephthalate – bottles (PET) with a volumetric swirl chamber valve (VODM 40355) on the basis of calculation models and experiments. In Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne
- Tomé M.F., Castelo A., Nóbrega J.M., Carneiro O.S., Paulo G.S., Pereira F.T., (2014). Numerical and experimental investigations of three-dimensional container filling with Newtonian viscous fluids. *Comp. Fluids*, 90, 172-185. DOI: 10.1016/j.compfluid.2013.11.015
- Roberts S., Rao R.R., (2011). Numerical simulations of mounding and submerging flows of shear-thinning jets impinging in a container. *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, 166, 1100-1115. DOI: 10.1016/j.jnnfm.2011.06.006

Praca została sfinansowana ze środków statutowych Zakładu.