

Jerzy WIEJACHA

e-mail: wiejacha@pw.plock.pl

Zakład Aparatury Przemysłowej, Wydział Budownictwa Mechaniki i Petrochemii, Politechnika Warszawska, Płock

Analiza ustalonego zbierania adhezyjnego cieczy za pomocą taśmy

Wstęp

W działalności człowieka pojawia się problem zebrania cieczy, która rozleje się na powierzchni wody i dzięki swojej mniejszej gęstości oraz braku rozpuszczalności tworzy ciągłą lub porwaną warstwę. Najbardziej skuteczną, mechaniczną metodą usuwania tej warstwy jest zbieranie adhezyjne za pomocą taśm, walców, tarcz i innych zespołów roboczych. Wykorzystywane jest w nim zjawisko selektywnego przylegania (adhezji) cieczy zbieranej do zanurzającej się gładkiej powierzchni ciała stałego. Selektynność wynika głównie z geometrii wymuszonego przepływu obu cieczy.

Opis teoretyczny

W pracy przedstawiono zmodyfikowany opis teoretyczny ustalonego zbierania adhezyjnego za pomocą taśmy z nadwodnym odbiorem zbieranej cieczy. Warunki ustalone w tym przypadku oznaczają, że występujący przepływ cieczy zbieranej i wody można potraktować jak przepływ jednofazowy tylko cieczy zbieranej. W praktyce oznacza to konieczność utrzymywania dostatecznie grubej, stałej warstwy cieczy na powierzchni wody w zbiorniku pomiarowym. Dotychczas, przy analizowaniu danych pomiarowych, posługiwano się trzema modelami teoretycznymi dla przepływu laminarnego. Pierwszy model uwzględnia tylko występowanie dwóch sił: lepkości i grawitacji. Z wykorzystaniem odpowiednich liczb kryterialnych, na jego podstawie bezwymiarowa grubość ustalona filmu T_o , tworzącego się na powierzchni taśmy, określona jest wzorem:

$$T_{o1} = 1 \quad (1)$$

Drugi model uwzględnia też tylko dwie siły: lepkości i napięcia powierzchniowego (bez grawitacji). W tym przypadku grubość ustalona filmu na taśmie określona jest wzorem:

$$T_{o2} = A \left(\text{ctg} \frac{\alpha}{2} \right)^{1/2} Ca^{1/6} \quad (2)$$

Trzeci model, najbardziej złożony, uwzględnia trzy siły: lepkości, napięcia powierzchniowego i grawitacji. W tym przypadku grubość ustalona filmu na taśmie określona jest uwikłanym wzorem:

$$\frac{T_{o3}}{(1 - T_{o3}^2)^{2/3}} = A \left(\text{ctg} \frac{\alpha}{2} \right)^{1/2} Ca^{1/6} \quad (3)$$

gdzie $A = 0,944$ i jest stałą całkowania. Bezwymiarową grubość ustaloną filmu T_{oi} i liczbę kapilarną Ca definiują poniższe równania:

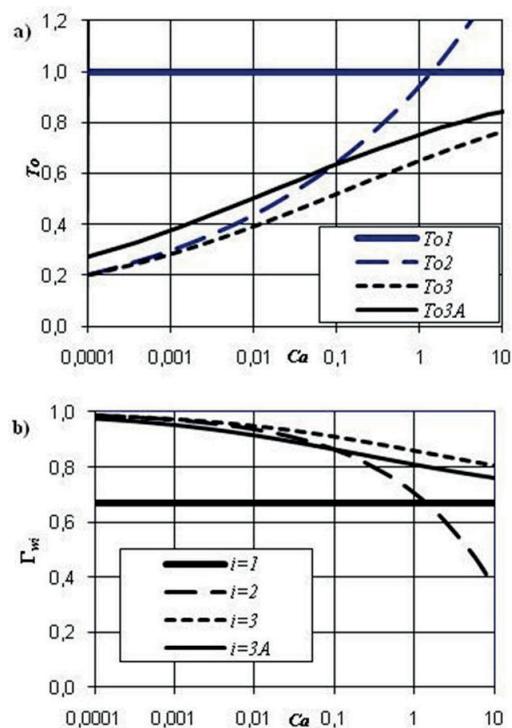
$$T_o \equiv h_o \left(\frac{\rho g \sin \alpha}{\mu u_s} \right)^{1/2}, \quad Ca \equiv \frac{\mu u_s}{\sigma} \quad (4)$$

gdzie: h_o – grubość ustalona filmu na taśmie, ρ – gęstość cieczy (zbieranej), g – przyspieszenie ziemskie, α – kąt pochylenia taśmy do poziomu, μ – współczynnik lepkości dynamicznej cieczy (zbieranej), u_s – prędkość taśmy i σ – napięcie powierzchniowe cieczy.

Równanie (1) jest bardzo zgrubne. Równanie (2) pozwala obliczać wydajności zbierania, które w zakresie najbardziej użytecznym są nieco większe od rzeczywistych. Natomiast równanie (3) daje wartości obliczeniowe nieco mniejsze od rzeczywistych. Wszystkie trzy równania są przedstawione na rys. 1a.

Zakładając laminarny, bezfałowy spływ zbieranej cieczy [1] na wznoszącej się taśmie, względną wydajność jednostkową Γ_w określa następująca ogólna zależność:

$$\Gamma_w = 1 - \frac{T_{oi}^2}{3}, \quad \Gamma_w = \frac{\Gamma_i}{\Gamma_{si}} \quad (5)$$



Rys. 1. Bezwymiarowe: a) grubości ustalone filmu na taśmie T_o i b) względną wydajność jednostkową Γ_w zbieranej cieczy w funkcji liczby kapilarnej Ca , wynikające z czterech modeli teoretycznych nr: 1, 2, 3 i 3A, gdzie $A = 1,26$, na podstawie równań (1-3) i (5), dla kąta pochylenia taśmy $\alpha = 90^\circ$

Gdzie: Γ – wydajność jednostkowa na jednostkę długości linii wynurzania taśmy (np. w $l/(m \cdot s)$), $\Gamma_{si} \equiv h_{oi} u_s$, a indeks i – numer modelu teoretycznego (1, 2 lub 3). Jednostkowe wydajności bezwymiarowe zbierania taśmą pochyloną pod kątem $\alpha = 90^\circ$ (ustawioną pionowo), przedstawiono na rys. 1b.

Równania (3) i (5), wynikające z najbardziej zaawansowanego trzeciego modelu, pozwalają obliczyć teoretyczne wydajności jednostkowego zbierania adhezyjnego, które stanowią z reguły dolną granicę danych pomiarowych. Aby polepszyć dokładność zależności teoretycznych wg modelu (3), postanowiono zwiększać wartość stałej A (występującej w równaniach (2) i (3)) wraz ze zmniejszaniem się lepkości zbieranej cieczy.

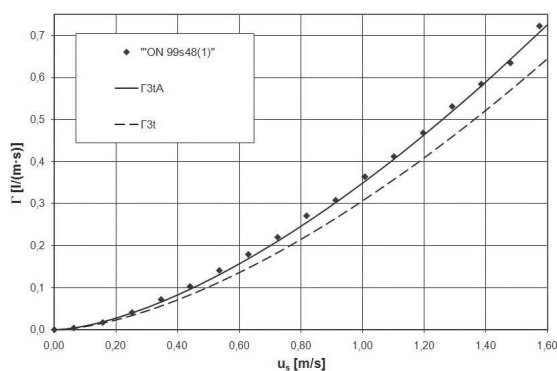
Stała A wynosi dokładnie 0,944 w wyniku rozwiązań równań pędu modelu (2) i (3), ale przy szeregu założeń upraszczających, dotyczących krzywizny menisku dynamicznego, tworzącego się przy wynurzającej powierzchni zbierającej. Przede wszystkim, jeżeli prędkość zbierania u_s jest bardzo mała, to przyjmuje się, że promień krzywizny menisku dynamicznego w tzw. punkcie stagnacji jest równy promieniowi krzywizny w wierzchołku menisku statycznego zbieranej cieczy. Jednak już przy małych prędkościach to założenie odbiega daleko od rzeczywistości (promień krzywizny staje się dużo większy), co jednak nie powoduje narastających dużych błędów. Podobny wniosek podał Tallmadge [2] w opisie teoretycznym wyciągania filmu ze zbiornika z jedną cieczą. W przypadku zbierania adhezyjnego widać jeszcze wyraźniej, że stała A powinna mieć wartość większą od 0,944 w zakresie średnich i dużych prędkości u_s . Na rys. 1 przedstawiono bezwymiarową grubość ustaloną filmu i wydajność zbierania na taśmie, gdy w trzecim zmodyfikowanym modelu (3A) wartość A podwyższono aż do 1,26. W tym przypadku krzywe teoretyczne przesunęły się w stronę krzywych wynikających

modelu drugiego. W zakresie bardzo małych wartości liczby kapilarnej Ca (prędkości taśmy u_s) krzywe dla modelu zmodyfikowanego (3A) nie są zgodne z krzywymi dla modelu drugiego i modelu trzeciego, ale ten zakres nie ma znaczenia praktycznego.

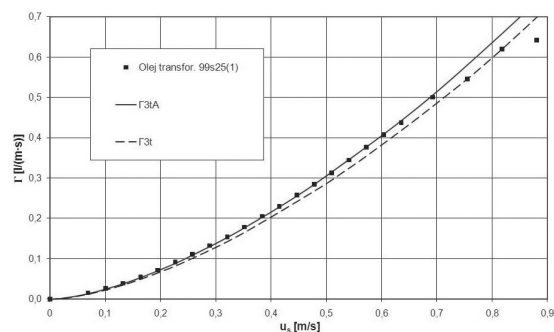
Weryfikacja doświadczalna

Zmodyfikowany opis teoretyczny porównano z danymi eksperymentalnymi, w oparciu o bogatą własną bazę danych pomiarowych, uzyskanymi dla laboratoryjnego ustawionego pionowo ($\alpha = 90^\circ$) zbieraka taśmowego przy zanurzeniu, przy którym kąt wynurzania taśmy nie zależy od jej prędkości. Zbierak taśmowy jest najdogodniejszy do tej weryfikacji doświadczalnej.

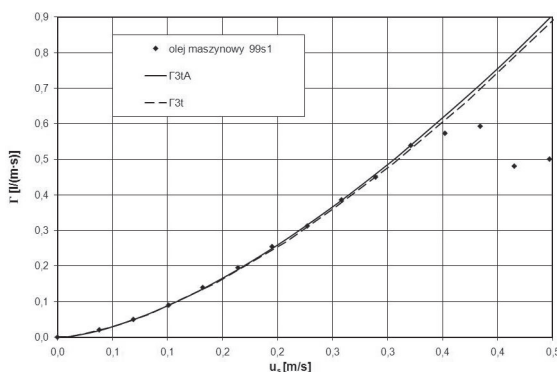
Na rys. 2–4 przedstawiono przykładowe zestawienia krzywych teoretycznych wynikających ze zmodyfikowanego i niezmodyfikowanego modelu trzeciego z danymi pomiarowymi wydajności zbierania trzech cieczy, olejów: napędowego, transformatorowego i maszynowego w funkcji prędkości taśmy.



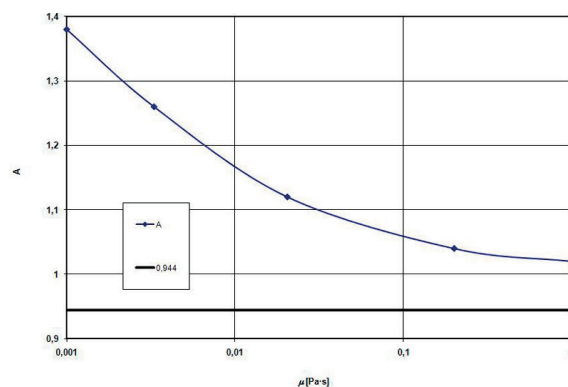
Rys. 2. Wykresy teoretycznych wydajności jednostkowych zbierania oleju napędowego (ON) Γ_{3tA} i Γ_{3t} wg równań (3 i 5) taśmą w funkcji prędkości u_s , gdy $A = 1,26$ w równaniu (3) i kąt pochylenia taśmy $\alpha = 90^\circ$ oraz punkty pomiarowe



Rys. 3. Wykresy teoretycznych wydajności jednostkowych zbierania oleju transformatorowego Γ_{3tA} i Γ_{3t} wg równań (3 i 5) taśmą w funkcji prędkości u_s , gdy $A = 1,12$ w równaniu (3) i kąt pochylenia taśmy $\alpha = 90^\circ$ oraz punkty pomiarowe



Rys. 4. Wykresy teoretycznych wydajności jednostkowych zbierania oleju maszynowego Γ_{3tA} i Γ_{3t} wg równań (3 i 5) taśmą w funkcji prędkości u_s , gdy $A = 1,04$ w równaniu (3) i kąt pochylenia taśmy $\alpha = 90^\circ$ oraz punkty pomiarowe



Rys. 5. Zależność wartości A w równaniu (3) w zależności od lepkości dynamicznych μ badanych cieczy zbieranych za pomocą taśmy, przy kącie pochylenia taśmy $\alpha = 90^\circ$ wraz z linią interpolacyjną

W pomiarach głębokość zanurzenia taśmy wynosiła 52 mm, która jest optymalna dla laboratoryjnego zbieraka taśmowego, a stała grubość warstwy oleju na wodzie w zbiorniku miała 20 mm. Z wykresów wynika, że dla poprawienia zgodności wyników doświadczalnych ze zmodyfikowaną krzywą teoretyczną (z indeksem $3tA$) należy zwiększać wartość A powyżej wartości czysto teoretycznej wynoszącej 0,944, czyli wprowadzić wartości doświadczalne. Uzyskano w ten sposób bardzo znaczną poprawę zgodności doświadczalnych wydajności jednostkowych zbierania z krzywymi wynikającymi ze zmodyfikowanego modelu teoretycznego. W przypadku oleju transformatorowego, a szczególnie oleju maszynowego, dopiero przy najwyższych prędkościach stosowanych w pomiarach punkty pomiarowe układają się poniżej zmodyfikowanych krzywych, ponieważ pojawia się wtedy przede wszystkim zjawisko porywania powietrza i, o mniejszym znaczeniu, zmniejszenie grubości warstwy oleju na wodzie w miejscu zanurzenia taśmy, co ogranicza wzrost wydajności zbierania, a nawet go zatrzymuje (Rys. 4).

Badane ciecz z rys. 2–4 różnią się znacząco tylko lepkościami dynamicznymi (od 0,0033 Pa·s, poprzez 0,0204, aż do 0,1996 Pa·s w temperaturze 20°C). Na rys. 5. przedstawiono zmianę dobranej wartości wielkości A w zależności od lepkości dynamicznych μ badanych cieczy z rys. 2–4 oraz dodatkowo oleju o dużej lepkości ($\mu \approx 1$ Pa·s) i wody, którą również można zbierać, jeżeli dobrze oczyści się powierzchnię taśmy.

Z rys. 5 wynika, że zmniejszanie się lepkości cieczy zbieranej powoduje silny wzrost wartości A . W przebadanym zakresie lepkości jest ona zawsze większa od wartości 1,01, więc wyraźnie odbiega od teoretycznej wartości 0,944.

Wnioski

Zmodyfikowany opis teoretyczny ustalonego zbierania adhezyjnego za pomocą taśmy z nadwodnym odbiorem zbieranej cieczy, uwzględniający występowanie trzech sił, w którym zastąpiono stałą całkowania wielkością empiryczną A , zależną od lepkości tej cieczy, został pozytywnie zweryfikowany doświadczalnie w zakresie użytecznych prędkości taśmy (średnich i częściowo dużych, występujących w pomiarach). Jeżeli oblicza się zgodnie ze zmodyfikowaną teorią wydajność jednostkową zbierania taśmą, to średni błąd w wymienionym wyżej zakresie nie przekracza 3% w stosunku do danych pomiarowych, co jest około trzy razy lepszym wynikiem w porównaniu z modelem nr 3. Dla uzyskania tak dobrego wyniku wystarczyła tylko modyfikacja równania określającego grubość ustaloną tworzącego się na taśmie filmu nadwodnego. Natomiast równanie określające jednostkową wydajność zbierania, zakładające laminarny spływ filmu na ruchomej taśmie, pozostało bez zmian. Tak więc założenie to wydaje się wystarczająco słuszne dla celów praktycznych obliczeń.

LITERATURA

- [1] J. Wiejacha: Inż. Ap. Chem. 47, nr 6, 49 (2008).
- [2] J. A. Tallmadge: AIChE J. 17, nr 7, 243 (1971).