

Marek DZIUBIŃSKI

Instytut Inżynierii Chemicznej
Politechniki Łódzka

PRZEPIY W DWUFAZOWY PLYN NIENEWTONOWSKI - GAZ
W POZIOMEJ RURZE - OPTYMALNA PRĘDKOŚĆ PRZEPIY WU,
ZAPEWNIAJĄCĄ MAKSYMALNE OSZCZĘDNOŚCI ENERGETYCZNE

Streszczenie: W pracy zaproponowano prostą metodę obliczania optymalnej prędkości przepływu gazu w przepływie dwufazowym płyn nienewtonowski - gaz w poziomej rurze, zapewniającą uzyskanie maksymalnych oszczędności energetycznych.

1. Wstęp

W ostatnich latach wzrasta zainteresowanie transportem rurociągami układów nienewtonowskich z dodatkiem powietrza ze względu na możliwość zmniejszenia w ten sposób oporów przepływu w stosunku do oporów przepływu samego płynu nienewtonowskiego [1 + 10].

Uzyskanie obniżenia oporów przepływu układu ciecz nienewtonowska-gaz wymaga jednak poniesienia dodatkowych nakładów energetycznych związanych z pracą kompresora tłoczącego gaz. Istnieje więc pewna optymalna ilość doprowadzonego gazu do układu, dla której całkowite oszczędności energetyczne są maksymalne.

2. Współczynnik oszczędności energetycznych przy przetłaczaniu układu płyn nienewtonowski - gaz

Moc silnika napędzającego pompę przetłaczającą ciecz przez przewód N_{SL} wynosi:

$$N_{SL} = \frac{1}{\eta_p} Q_{SL} \Delta P_{SL} \quad (1)$$

a w przypadku przepływu dwufazowego ciecz - gaz (przy założeniu niezmiennej sprawności pompy) N_{TP} :

$$N_{TP} = \frac{1}{\eta_p} Q_{SL} \Delta P_{TP} \quad (2)$$

gdzie: η_p - sprawność pompy, Q_{SL} - objętościowe natężenie przepływu cieczy, ΔP_{CL} - opory przepływu cieczy, ΔP_{TP} - opory przepływu układu dwufazowego.

Oszczędności energetyczne wynoszą więc:

$$\Delta N_1 = N_{SL} - N_{TP} = \frac{1}{\eta_p} Q_{SL} \Delta P_{SL} (1 - \phi_L^2) = N_{SL} (1 - \phi_L^2), \quad (3)$$

gdzie: ϕ_L^2 - parametr Lockherta - Martinellogo [11].

Z równania (3) wynika, że oszczędności energetyczne w przypadku przepływu dwufazowego są możliwe, gdy:

$$\phi_L^2 < 1$$

Na to miejsce podczas przepływu układu płyn nienewtonowski rozrzedzany ściśnięciem - gaz.

Doprowadzenie gazu do rurociągu wymaga jednak dodatkowych nakładów energetycznych. Związane są one z koniecznością sprężenia gazu (najczęściej powietrza) od ciśnienia atmosferycznego p_{atm} do ciśnienia panującego w rurociągu w punkcie doprowadzenia gazu p_{wlot} .

Pobór mocy przez kompresor wynosi więc:

$$N_{SG} = \frac{1}{\eta_c} p_{atm} (Q_{SG})_{atm} \ln \frac{p_{wlot}}{p_{wywlot}} = \frac{1}{\eta_c} A p_{wlot} (V_{SG})_{wlot} \ln \frac{p_{wlot}}{p_{atm}}, \quad (4)$$

gdzie: η_c - sprawność kompresora, Q_{SG} - objętościowe natężenie przepływu gazu w warunkach ciśnienia atmosferycznego, A - powierzchnia przekroju rury, V_{SG} - fikcyjna prędkość przepływu gazu liczona na cały przekrój rury.

Całkowite oszczędności energetyczne uzyskane przy zastosowaniu transportu dwufazowego wynoszą:

$$\Delta N = \Delta N_1 - N_{SG} \quad (5)$$

lub po niewielkich przekształceniach:

$$\Delta N = N_{SL} (1 - \phi_L^2) - \frac{1}{\eta_c} A V_{SG} \left(p_{atm} + \frac{\Delta P_{TP}}{2} \right) \ln \left(1 + \frac{\Delta P_{TP}}{p_{atm}} \right) \quad (6)$$

Wprowadźmy współczynnik oszczędności energetycznych Ψ zdefiniowany równaniem

$$\Psi = \frac{\Delta K}{N_1} \quad (7)$$

Łącząc równanie (7) i (6) po prostych przekształceniach i uproszczeniach otrzymamy;

$$\Psi = 1 - \phi_L^2 - \frac{\rho_D}{\rho_C} \frac{V_{SG}}{V_{SL}} \phi_L^2 \quad (8)$$

Wykorzystując dane doświadczalne dotyczące przepływu dwufazowego płynu nienewtonowski - gaz [4, 5, 6, 7] obliczono współczynnik oszczędności energetycznych Ψ z równania (8) przy założeniu typowej dla praktyki przemysłowej wielkości $\rho_D/\rho_C = 0,5$. Przykład takich obliczeń jest przedstawiony na rys. 1. Dla wszystkich danych doświadczalnych maksymalna wartość współczynnika oszczędności energetycznych Ψ występowała w zakresie przepływu tłokowego, tzn.:

$$V_{SG} < 1 \text{ m/s} \quad \text{i} \quad Re'_{HR} = \frac{V_M^{2-n'} d^{n'}}{k' \delta^{n'-1}} < 500, \quad (9)$$

gdzie $V_M = V_{SG} + V_{SL}$ - prędkość mieszanki dwufazowej

oraz dla mniejszych fikcyjnych prędkości przepływu gazu niż prędkość odpowiadająca minimum oporów przepływu.

3. Optymalna fikcyjna prędkość przepływu gazu (V_{SG}^{opt}) zapewniająca maksymalne oszczędności energetyczne

Maksymalna wartość współczynnika Ψ występowała w zakresie przepływu tłokowego. Przy spełnionych warunkach (9) opory przepływu układu dwufazowego płynu nienewtonowski - gaz mogą być określone z dokładnością około 10 %, stosując prosty model przepływu tłokowego [4 + 9]

$$\phi_L^2 = \xi^{1-n'} = \left(\frac{V_{SL}}{V_{SL} + V_{SG}} \right)^{1-n'}, \quad (10)$$

gdzie ξ - wlotowy udział cieczy w mieszaninie dwufazowej, n' - współczynnik charakterystyczny płynu.

Podstawiając równanie (10) do (8) i różniczkując względem prędkości przepływu gazu V_{SG} otrzymamy prędkość przepływu V_{SG}

$$V_{SG} = \frac{1 - n' - \frac{\rho_p}{\rho_c}}{n' \frac{\rho_p}{\rho_c} / \rho_c} V_{SL} \quad (11)$$

dla której występuje optimum funkcji (8).

Stąd

$$1 - n' > \frac{\rho_p}{\rho_c} \quad (12)$$

Z równania (12) wynika, że:

- oszczędności energetyczne występują jedynie w przypadku, gdy sprawność kompresora jest większa od sprawności pompy;
- zakładając typowe wielkości sprawności pompy i kompresora oszczędności energetyczne w przepływie dwufazowym płyn nienewtonowski - gaz są możliwe dla płynów o wskaźniku charakterystycznym płynięcia $n' < 0,5$.

Porównanie teoretycznych wartości optymalnej fikcyjnej prędkości przepływu gazu obliczonej z równania (11) z otrzymanymi eksperymentalnie przedstawiono na wykresie rys. 2. Maksymalne różnice między tymi wielkościami wynoszą 30 %. Biorąc pod uwagę zastosowanie bardzo prostego modelu przepływu tłokowego należy uznać uzyskaną zgodność za bardzo dobrą.

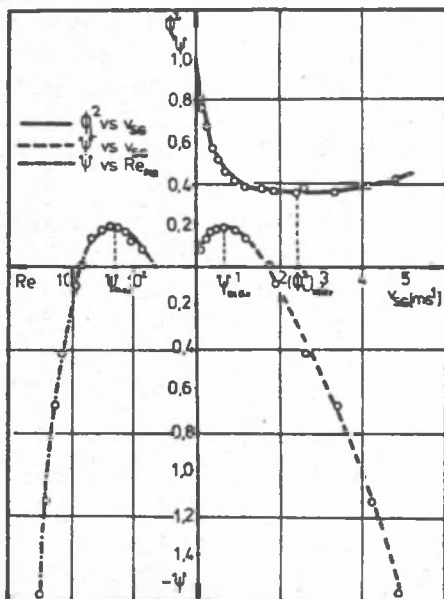
Podstawiając równanie (11) do równania (8) otrzymujemy maksymalną wartość współczynnika oszczędności energetycznych Ψ_{max} . Na wykresie rys. 3 przedstawiono zależność współczynnika Ψ_{max} od charakterystycznego wskaźnika płynięcia n' .

4. Uwagi końcowe

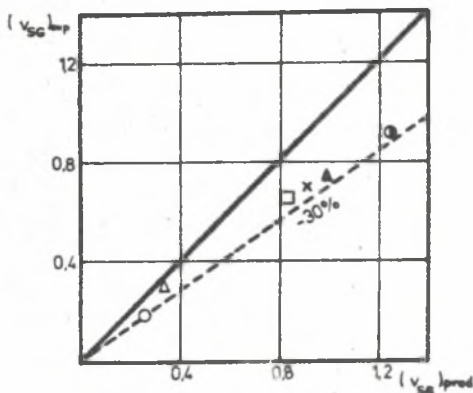
Dla większości płynów nienewtonowskich rozrzedzanych ścinaniem maksymalne wartości współczynnika oszczędności energetycznych Ψ - przy stosowaniu przepływu dwufazowego ciecz-gaz - wynoszą około 0,1 + 0,2. Jednak nawet tak nieznaczne obniżenie zużycia energii może mieć duże znaczenie przy przesyłaniu dużych ilości płynów nienewtonowskich.

Stosowanie przepływu dwufazowego płyn nienewtonowski - gaz daje wiele innych korzyści:

- umożliwia obniżenie oporów przepływu, co jest szczególnie ważne w początkowym momencie przetłaczania;
- pozwała na zwiększenie odległości, na jaką może być transportowany płyn nienewtonowski;

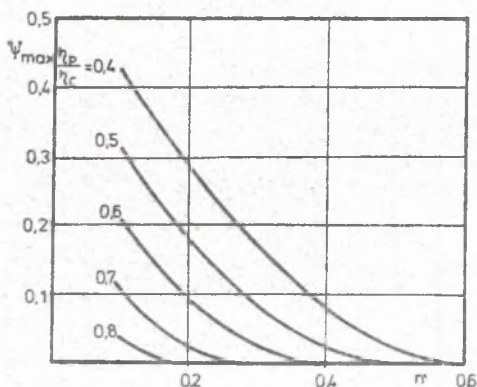


Rys. 1. Zależność współczynnika oszczędności energetycznych od fikcyjnej prędkości przepływu gazu i liczby Reynolda dla 24,4% wodnego roztworu kaolinu



Rys. 2. Porównanie teoretycznych wartości optymalnej fikcyjnej prędkości przepływu gazu obliczonej z równ. (11) i otrzymanej eksperymentalnie

- 28,3% roztwór kaolinu w 65% glicerolu $n=0,4$
- 36,9% roztwór kaolinu w 45% glicerolu $n=0,3$
- 51,7% roztwór kaolinu w 45% glicerolu $n=0,27$
- 62,6% roztwór kaolinu w 45% glicerolu $n=0,257$
- 19,5% wodny roztwór kaolinu $n=0,16$
- 24,4% wodny roztwór kaolinu $n=0,14$



Rys. 3. Maksymalne wartości współczynnika oszczędności energetycznych dla różnych wartości wskaźnika charakterystycznego płynu n

c) dla danej odległości przesyłania płynu nienewtonowskiego zmniejszenie oporów przepływu umożliwia zmniejszenie kosztów instalacji (zmniejszenie średnicy rurociągu, wielkości podpór itp.).

Zastosowanie transportu dwufazowego ciecz - gaz może więc rozwiązać wiele problemów związanych z przesyłaniem płynów nienewtonowskich o złożonych własnościach reologicznych.

Literatura

- [1] D.R. OLIVER, A. YOUNG-HOON; *Trans.J.Chem.Eng.*, **46**, T106 (1968)
- [2] R. MAHALINGAM, M.A. VALLE; *Ind.Chem.Engng.Chem.Fundls.*, **11**, 470 (1972)
- [3] R.P.S. SRIVASTAVA, G.S.R. NARASINHAMURTY; *Chem.Eng.Sci.*, **28**, 553 (1973)
- [4] N.I. HEYWOOD; PhD Thesis, University of Wales (1976)
- [5] S.I. FAROOQI, N.I. HEYWOOD, J.F. RICHARDSON; *Trans.J.Chem.Eng.*, **58**, 16 (1980)
- [6] S.I. FAROOQI; PhD Thesis, University of Wales (1981)
- [7] S.I. FAROOQI, J.F. RICHARDSON; *Trans.J.Chem.Eng.*, **60**, 323 (1982)
- [8] R.I. CHHABRA, S.I. FAROOQI, Z. KHATIB, J.F. RICHARDSON; *Journal of Pipelines*, **2**, 169 (1982)
- [9] R.F. CHHABRA, S.I. FAROOQI, J.F. RICHARDSON, A.P. WARDLE; *Trans.J.Chem.Eng.*, **61**, 56 (1983)
- [10] M. DZIUBIŃSKI; *Gaz.Cukr.*, **4**, 79 (1983)
- [11] R.W. LOCKHART, R.C. MARTINELLI; *Chem.Eng.Progr.*, **45**, 39 (1949)

ДВУХФАЗНОЕ ТЕЧЕНИЕ НЕНЬЮТОНОВСКАЯ ЖИДКОСТЬ - ГАЗ
В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ТРУБОПРОВОДЕ.
ОПТИМАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
МАКСИМАЛЬНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Р е з ю м е

В работе предложен простой метод вычисления оптимальной фиктивной скорости течения газа, для двухфазного течения неньютоновская жидкость - газ в горизонтальном трубопроводе, обеспечивающий максимальную экономичность электроэнергии. Максимальная разность между вычисленным теоретическим и полученным экспериментальным значением оптимальной фиктивной скорости течения газа равнялась 30%.

TWO-PHASE FLOW OF GAS AND NON-NEWTONIAN LIQUIDS IN HORIZONTAL PIPE.
SUPERFICIAL GAS VELOCITY FOR MAXIMUM POWER SAVING

S u m m a r y

A simple method for calculation of the optimum superficial gas velocity in horizontal two-phase flow of gas and non-Newtonian liquid corresponding to the maximum power saving has been presented. The comparison between the theoretical value and that of the optimum superficial gas velocity obtained experimentally shows a maximum difference of 30%.