

Leon TRONIEWSKI
Janusz BILIK

Instytut Inżynierii Chemicznej
i Budowy Aparatury

OPORY PRZEPŁYWU W PRZEWODZIE POZIOMYM DLA CIECZY DWUFAZOWYCH

Streszczenie. Zaproponowano prosty sposób obliczania oporów przepływu cieczy dwufazowych w oparciu o analizę literaturowych danych doświadczalnych.

W chwili obecnej istnieje mało danych literaturowych dla obliczeń oporów przepływu układów dwufazowych ciecz-ciecz. Spowodowane to jest małą ilością prac doświadczalnych i teoretycznych przeprowadzonych nad takim przepływem w porównaniu z innymi przepływami dwufazowymi, jak gaz-ciecz i ciecz-ciało stałe.

W praktyce przepływ cieczy dwufazowych jest dość często stosowany. Można tu wymienić np. reakcje między dwoma cieczami lub procesy ekstrakcji w przemyśle chemicznym, wytwarzanie emulsji stabilnych w przemyśle tłuszczowym, czy produkcję paliw i nośników ciepła.

Zainteresowanie się badaczy tym rodzajem przepływu, spowodowane zostało zjawiskiem zmniejszenia oporów przepływu transportowanej cieczy lepkiej (olejów) przez dodanie odpowiedniej ilości cieczy o małej lepkości (najczęściej wody). Stąd większość prac doświadczalnych odnosi się do układów olej-woda. W pracach tych badacze zazwyczaj określają reżimy przepływów oraz ujmują graficznie zależności oporu przepływu od zmiennych parametrów, którymi najczęściej są: udział fazy lepkiej i prędkość jednej z faz.

Dla przepływu dwóch nie mieszających się cieczy, w stosunku do przepływu jednofazowego, na opór przepływu będą miały również wpływ takie wielkości jak: napięcie powierzchniowe obu cieczy, udział jednej z faz w mieszaninie, rodzaj przepływu oraz zjawiska na granicy faz. Dlatego też, określenie oporu przepływu w tym przypadku przez zastosowanie równań jak dla cieczy jednofazowych z użyciem parametrów zastępczych jest trudne lub wręcz niemożliwe.

Różni badacze w rozmaity sposób próbowali rozwiązać to zagadnienie i tak:

Charles i Lilleleht [1] wychodząc z analogii przepływów dwufazowych, proponują obliczanie oporów przepływu dla układu ciecz-ciecz, podobnie jak dla układu gaz-ciecz z zastosowaniem parametru Lockharta-Martinellego.

W pracy swej zebrali dane eksperymentalne z różnych doświadczeń i skorelowali je wg metody Lockharta i Martinellogo, otrzymując krzywą przesuniętą w dół w stosunku do krzywej Lockharta-Martinellogo dla układu gazu-ciecz, z maksymalnym odchyleniem 24%. W tej samej pracy przytoczone zostały dane doświadczalne z pomiarów spadków ciśnienia dla przepływu mieszaniny olej-woda przewodem prostokątnym o długości 6,1 m i średnicy ekwiwalentnej 0,0454 m. Lepkość użytego oleju wynosiła 5,33 cP, a jego gęstość 820 kg/m^3 . Dane te podano w formie wykresu przedstawiając opór przepływu mieszaniny olej-woda, jako funkcję liczby Reynoldsa wody dla wybranych liczb Reynoldsa oleju.

Wiele danych doświadczalnych odnośnie oporu przepływu podają Charles, Govier i Hodgson w pracy [2]. Badania ich dotyczyły przepływu mieszanin cieczy o równych gęstościach typu olej-woda w rurze poziomej. Doświadczenia przeprowadzono w rurze z acetyloksolanu celulozy o średnicy wewnętrznej 25,4 mm i długości 8,53 m, używając do doświadczeń trzech olejów o lepkościach 6,29 cP, 16,8 cP i 65 cP. Prędkości oleju i wody liczone na pełny przekrój rury wahały się w granicach $0,015 \div 0,91 \text{ m/s}$ dla oleju i $0,03 \div 1,07 \text{ m/s}$ dla wody. Stężenia oleju, wyrażone jako stosunek objętościowy, mieściły się w zakresie 0,1 do 10. Dla wizualnej obserwacji charakteru przepływów do każdego z olejów dodawano odpowiednią ilość czterochlorku węgla, w celu podwyższenia jego gęstości do wartości odpowiadającej gęstości wody w 25°C i uzyskania w ten sposób mieszanin olej-woda o jednakowych gęstościach składników. Wyniki uzyskane dla trzech rodzajów mieszanin przedstawiono w formie graficznej w układzie podwójnie logarytmicznym, jako zależność oporu przepływu od stosunku objętościowego oleju w mieszaninie dla ustalonych prędkości wody.

W pracy [3] Russell, Hodgson i Govier opisali swe badania dla przepływu mieszaniny olej-woda w rurze poziomej o średnicy 20 mm. Użyty olej posiadał lepkość 18 cP i gęstość 834 kg/m^3 . Korzystając z wartości doświadczalnych oporu przepływu, autorzy ci wyliczyli współczynniki oporu jak dla wody przy prędkości liczonej na pełny przekrój przepływu i skorelowali je graficznie w zależności od stosunku objętościowego oleju w mieszaninie oraz od prędkości wody.

Russell i Charles [4] otrzymali rozwiązania analityczne na minimalny opór przepływu oraz na współczynnik maksymalnego zmniejszenia oporu przepływu dla cieczy dwufazowych w przepływie laminarnym rurą oraz między równoległymi płytami.

Na uwagę zasługuje jeszcze praca Brauera [5], który podaje przegląd wielu pozycji literaturowych odnośnie przepływu dwufazowego ciecz-ciecz. Autor przytacza w niej ciekawy wykres zależności współczynnika spadku oporu przepływu dla układu olej-woda od udziału objętościowego oleju. Zależność ta, otrzymana teoretycznie wykazuje dobrą zgodność z danymi eksperymentalnymi.

Tabela 1

Dane wg pracy [1] - dla przepływu przewodem prostokątnym

Lp.	w_c m/s	Re_o	w_o m/s	w_w m/s	Re_w	r_o m ³ /m ³	$(\frac{\Delta P}{L})_m$ mm H ₂ O/m	Re_{wc}	$(\frac{\Delta P}{L})_{wc}$ mm H ₂ O/m	$\frac{\Delta P_m}{\Delta P_{wc}}$
1	0,2581	1413	0,2029	0,0552	2500	0,7861	1,97	11684	2,27	0,8678
2	0,2581	649	0,0932	0,1649	7465	0,3611	2,10	11684	2,27	0,9251
3	0,2581	282	0,0405	0,2176	9851	0,1569	2,15	11684	2,27	0,9471
4	0,2581	111,5	0,0160	0,2421	10959	0,0620	2,13	11684	2,27	0,9383
5	0,3600	1413	0,2029	0,1571	7112	0,5636	3,35	16297	4,07	0,8230
6	0,3600	649	0,0932	0,2668	12078	0,2589	3,49	16297	4,07	0,8574
7	0,3600	282	0,0405	0,3195	14464	0,1125	3,55	16297	4,07	0,8722
8	0,3600	111,5	0,0160	0,3440	15572	0,0445	3,64	16297	4,07	0,8943
9	0,4000	1413	0,2029	0,1971	8922	0,5072	4,10	18108	4,89	0,8384
10	0,4000	649	0,0932	0,3068	13889	0,2330	4,14	18108	4,89	0,8466
11	0,4000	282	0,0405	0,3595	16275	0,1012	4,12	18108	4,89	0,8425
12	0,4000	111,5	0,0160	0,3840	17383	0,0400	4,42	18108	4,89	0,9038

W pracy niniejszej rozpatrzono opór przepływu dla układu olej-woda przy przepływie przez przewody poziome, bazując na danych doświadczalnych zamieszczonych w pracach [1] i [2]. Odczytując dane eksperymentalne z pracy [1] podane w formie wykresu zależności oporu przepływu mieszaniny olej-woda, od liczby Reynoldsa wody dla kilku ustalonych wartości liczb Reynoldsa oleju, sporządzono tabelę 1.

Wielkości ujęte w tabeli 1 określano każdorazowo dla założonej prędkości mieszaniny w_c i danych wg [1] liczb Reynoldsa oleju Re_o , wyliczając je następująco:

prędkość oleju w_o (liczona na pełny przekrój przepływu),

$$w_o = \frac{Re_o \cdot \eta_o}{d_e \cdot \rho_o}$$

prędkość wody w_w (liczona na pełny przekrój przepływu),

$$w_w = w_c - w_o$$

liczba Reynoldsa dla wody,

$$Re_w = \frac{w_w \cdot d_e \cdot \rho_w}{\eta_w}$$

udział objętościowy oleju, przy jakkolwiek upraszczającym ale koniecznym ze względu na nieznaną rzeczywistych prędkości założeniu braku poślizgu faz,

$$r_o = \frac{w_o}{w_c}$$

Dla określonych w ten sposób wartości Re_o i Re_w z wspomnianego wykresu, odczytywano wartości jednostkowego spadku ciśnienia mieszaniny $(\Delta P / \Delta L)_m$.

Następnie obliczano opór przepływu jaki wykazałaby woda płynąca z prędkością w_c równą całkowitej prędkości mieszaniny dwufazowej, z zależności:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_{wc} = \lambda \frac{w_c^2}{2g_e \cdot d_e}$$

Tabela 2

Dane wg pracy [2] dla przepływu turbulencyjnego

I.p.	w_0 m/s	w_w m/s	w_0 m/s	R_0 m^2/m^3	Z_0 m^3/m^3	$(\Delta P/\Delta L)_m$ mm H ₂ O/m		Re_{wc}	$(\Delta P/\Delta L)_{wc}$ mm H ₂ O/m	$\Delta P_m/\Delta P_{wc}$	
						6,29 cP	16,8 cP			6,29 cP	16,8 cP
1	0,1524	0,0914	0,0610	0,6666	0,4000	1,31	1,24	4494	1,73	0,7687	0,7167
2	0,1524	0,0304	0,1219	4,0000	0,8000	2,56	3,00	4494	1,73	1,4797	1,7341
3	0,2438	0,2438	0,0000	0,0000	0,0000	3,69	3,61	7190	3,93	0,9389	0,9185
4	0,2438	0,0914	0,1524	1,8666	0,6250	3,45	2,08	7190	3,93	0,8718	0,5292
5	0,2438	0,0304	0,2133	7,0000	0,8750	4,50	5,80	7190	3,93	1,4249	1,4450
6	0,3048	0,2438	0,0610	0,2500	0,2000	4,12	3,74	9889	5,81	0,7091	0,6437
7	0,3048	0,0914	0,2134	2,3333	0,7000	4,18	3,23	9889	5,81	0,5759	0,5715
8	0,3048	0,0304	0,2743	9,0000	0,9000	6,20	7,79	9889	5,81	1,4113	1,3407
9	0,5486	0,5486	0,0000	0,0000	0,0000	14,96	14,43	16180	16,25	0,8206	0,8980
10	0,5486	0,2438	0,3048	1,2000	0,5535	12,41	12,42	16180	16,25	0,8282	0,7567
11	0,5486	0,0914	0,4572	5,0000	0,8333	22,40	15,22	16180	16,25	1,3764	0,8135
12	0,7620	0,5486	0,2134	0,3888	0,2800	24,15	25,94	22474	28,89	0,8359	0,8978
13	0,7620	0,2438	0,5182	2,1250	0,6800	24,46	24,11	22474	28,89	0,8466	0,8345
14	0,7620	0,0914	0,6706	7,3330	0,8800	62,53	31,39	22474	28,89	2,1644	1,0865
15	0,9144	0,5486	0,3558	0,6666	0,4000	34,79	36,88	26968	39,74	0,8754	0,9280
16	0,9144	0,2438	0,6706	2,7500	0,7333	38,83	34,79	26968	39,74	0,9768	0,8754
17	0,9144	0,0914	0,8230	9,0000	0,9000	77,36	43,34	26968	39,74	1,9466	1,0905
18	1,0668	1,0668	0,0000	0,0000	0,0000	47,33	47,33	31463	52,05	0,9093	0,9093
19	1,0668	0,5486	0,5182	0,9444	0,4857	44,86	45,00	31463	52,05	0,8637	0,8645
20	1,0668	0,2438	0,8230	3,3750	0,7714	56,03	47,30	31463	52,05	1,0764	0,9087
21	1,0668	0,0914	0,9754	10,6666	0,9142	103,7	75,11	31463	52,05	1,9884	1,4430
22	1,2192	1,0668	0,1524	0,1428	0,1250	62,53	58,12	35958	65,75	0,9510	0,8839
23	1,2192	0,5486	0,6706	1,2222	0,5500	60,29	61,63	35958	65,75	0,9169	0,9373
24	1,2192	0,2438	0,9754	4,0000	0,8000	83,85	60,73	35958	65,75	1,2752	0,9236
25	1,2192	0,0914	1,1278	12,334	0,9250	129,2	115,0	35958	65,75	1,9650	1,7490
26	1,3716	1,0668	0,3048	0,2857	0,2222	64,55	72,41	40452	80,80	0,8029	0,9561
27	1,3716	0,5486	0,6706	1,5000	0,6000	65,88	75,66	40452	80,80	0,8087	0,9363
28	1,3716	0,2438	1,1278	4,6250	0,8222	115,6	72,41	40452	80,80	1,4331	0,8961
29	1,5240	1,0668	0,4572	0,4285	0,3000	87,62	83,85	44947	97,16	0,9018	0,8630
30	1,5240	0,5486	0,9754	1,7777	0,6400	86,98	90,24	44947	97,16	0,8952	0,9287
31	1,5240	0,2438	1,2802	5,2500	0,8400	154,1	85,73	44947	97,16	1,5860	0,8623
32	1,8288	1,0668	0,7620	0,7142	0,4166	124,0	115,8	53937	133,67	0,9276	0,8663
33	1,8288	0,5486	1,2802	2,3333	0,7000	124,0	114,1	53937	133,67	0,9321	1,0780

gdzie: współczynnik oporu przepływu λ obliczano wg równania Blasiusa dla przepływu burzliwego

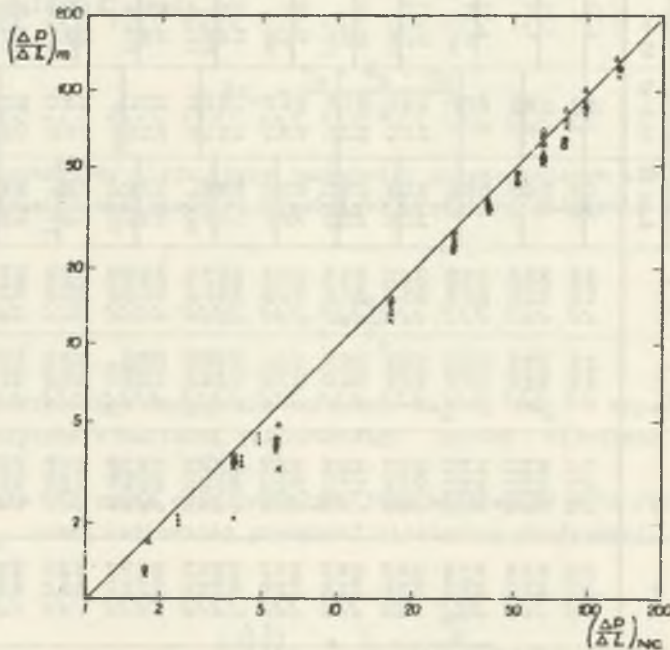
$$\lambda = \frac{0,3164}{Re_{wc}^{0,25}}$$

a liczbę Reynoldsa Re_{wc} jako

$$Re_{wc} = \frac{w_c \cdot d_e \cdot \rho_w}{\eta_w}$$

W podobny sposób wykorzystano dane doświadczalne z pracy [2] dla mieszanin wodnych trzech olejów o lepkościach 6,29, 16,8 i 65 cP. Z wykresów ujmujących zależność oporu przepływu, od stosunku objętościowego oleju w mieszaninie (R_o) dla danych prędkości wody, odczytano wartości $(\Delta P/\Delta L)_m$ przy założonej prędkości mieszaniny w_c . Wielkości te, wraz z wielkościami obliczonymi wg wyżej podanych zależności, zebrano w tabeli 2.

Również i tutaj, wielkości obliczone Re_{wc} i $(\Delta P/\Delta L)_{wc}$ odnoszą się do przepływu wody z prędkością równą prędkości mieszaniny.



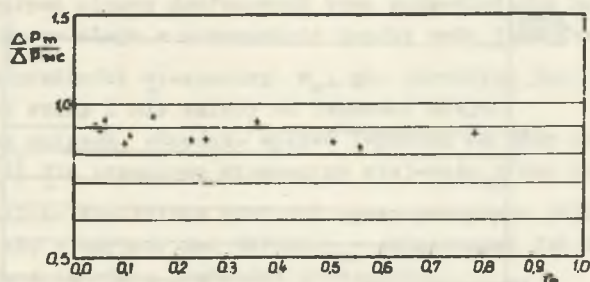
Rys. 1. Zależność $(\frac{\Delta P}{\Delta L})_m = f(\frac{\Delta P}{\Delta L})_{wc}$

- | | |
|---------------------------------|--------------------------------------|
| + - $\eta_o = 5,33$ cP (wg [1]) | • - $\eta_o = 6,29$ cP (wg [2]) |
| x - $\eta_o = 16,8$ cP (wg [2]) | Δ - $\eta_o = 65$ cP (wg [2]) |

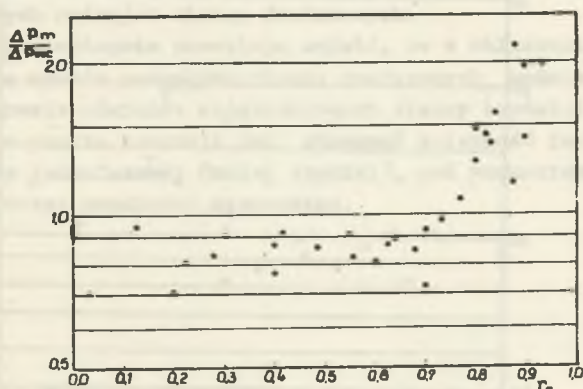
Z tabel 1 i 2 widać wyraźnie, że w pewnym zakresie zmienności udziałów r_o wartości $(\Delta P/\Delta L)_m$ są stałe i zależą tylko od prędkości mieszanki w_c , widać również, że mało różnią się one od wartości $(\Delta P/\Delta L)_{wc}$ policzonych jak dla wody. Po przekroczeniu jednak pewnej wartości udziału r_o następuje szybki wzrost jednostkowego oporu $(\Delta P/\Delta L)_m$.

Wykorzystując dane zawarte w tabelach 1 i 2, sporządzono wykres (rys.1) zależności zmierzonego jednostkowego oporu przepływu mieszanki dwufazowej $(\Delta P/\Delta L)_m$ od obliczonej jak dla wody wartości $(\Delta P/\Delta L)_{wc}$. Z wykresu widać, że wszystkie punkty ułożyły się w bezpośrednim sąsiedztwie przekątnej.

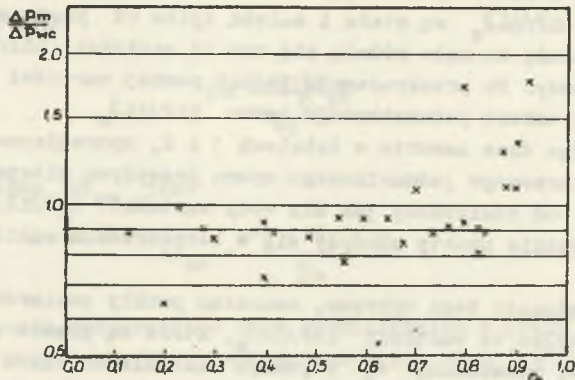
Przy sporządzaniu tego wykresu, nanosząc punkty pomiarowe wg tabeli 2, uwzględniono tylko te wartości $(\Delta P/\Delta L)_m$, które są prawie stałe dla ustalonej prędkości mieszanki w_c w pewnym zakresie udziałów objętościowych r_o (w tabeli 2 wielkości te oddzielono linią). Wartości te odpowiadają takiemu przepływowi mieszanki, gdy woda jest fazą ciągłą, co w większości przypadków zostało stwierdzone przez autorów pracy [2].



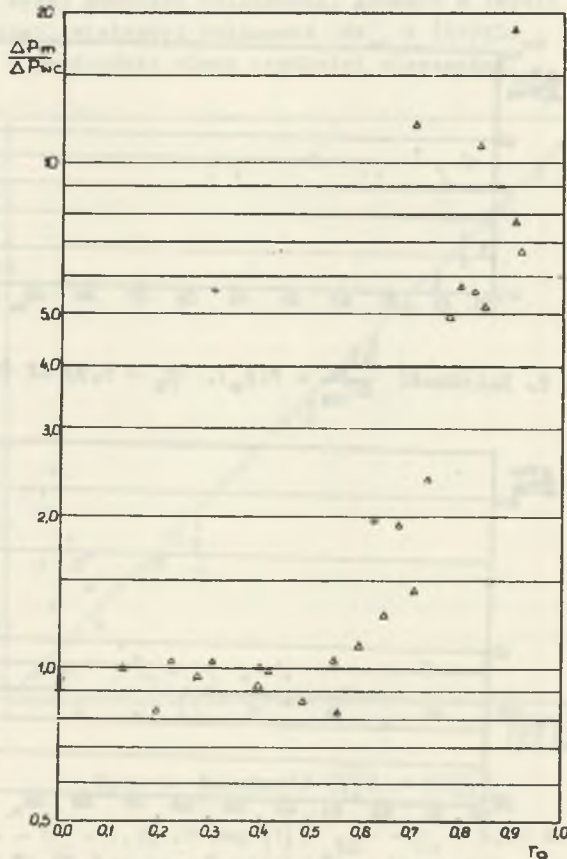
Rys. 2. Zależność $\frac{\Delta P_m}{\Delta P_{wc}} = f(r_o)$, $\eta_0 = 5,33$ cP (wg [1])



Rys. 3. Zależność $\frac{\Delta P_m}{\Delta P_{wc}} = f(r_o)$, $\eta_0 = 6,29$ cP (wg [2])



Rys. 4. Zależność $\frac{\Delta P_m}{\Delta P_{wc}} = f(r_0)$, $\eta_0 = 16,8$ cP (wg [2])



Rys. 5. Zależność $\frac{\Delta P_m}{\Delta P_{wc}} = f(r_0)$, $\eta_0 = 65$ cP (wg [2])

Na wykresach podanych na rysunkach (rys. 2, rys. 3, rys. 4 i rys. 5) naniesiono wszystkie punkty zamieszczone w tabelach (tab. 1 i tab. 2) w układzie $\Delta P_m / \Delta P_{wc} = f(r_0)$. Widać z nich, że dla przebadanych układów i to zarówno dla przewodu kołowego jak i prostokątnego, punkty układają się w podobny sposób, a mianowicie do pewnego udziału objętościowego oleju wartość oporu przepływu jest stała i bliska wartości oporu policzonego jak dla wody, a następnie występuje gwałtowny wzrost oporu.

(W przypadku wyników pokazanych na rys. 2 nie zaobserwowano wzrostu $\Delta P_m / \Delta P_{wc}$, ale badania te były prowadzone dla niższych udziałów oleju w wodzie niż pozostałe).

Porównując otrzymane wyniki z danymi autorów pracy [2] odnośnie obserwacji wizualnych rodzajów przepływów stwierdzono, że wzrost oporów następuje po przekroczeniu udziału objętościowego oleju, począwszy od którego fazą ciągłą przestaje być woda a zaczyna być olej, a więc od punktu inwersji faz.

Analizując wykresy i dane w tabelach można podać następujące stwierdzenia:

1. Opór przepływu cieczy dwufazowych typu woda-olej nie zależy od udziału objętościowego oleju w mieszaninie dopóki woda jest fazą ciągłą.
2. Dla danej prędkości mieszaniny w_c , gdy ośrodkiem jest woda, opór przepływu jest stały i nie zależy od lepkości oleju.
Identyczny wniosek, odnośnie wpływu lepkości na opór przepływu podano w pracy [6] dla przepływu mieszaniny olej-woda przez rurę pionową.
3. Doświadczalnie znalezione wartości oporu przepływu $(\Delta P / \Delta L)_m$ dobrze pokrywają się z wartościami $(\Delta P / \Delta L)_{wc}$ obliczonymi jak dla przepływu wody z prędkością równą prędkości mieszaniny.

Wprawdzie wnioski te dotyczą przepływów mieszanin typu woda-olej, to jednak w oparciu o uwagi Hoblera i Palugnioka [7], dotyczące wnikania ciepła przy przepływie podobnych mieszanin należy sądzić, że również będą się odnosić do innych rodzajów cieczy dwufazowych.

Powyższe stwierdzenia pozwalają sądzić, że w obliczeniach praktycznych przy rachunku oporów przepływu cieczy dwufazowych będzie można w dość znacznym zakresie udziałów objętościowych cieczy bardziej lepkiej, a mianowicie aż do punktu inwersji faz, stosować zależność jak dla obliczania oporów cieczy jednofazowej (mniej lepkiej), pod warunkiem użycia prędkości równej całkowitej prędkości mieszaniny.

Oznaczenia:

d_e	- średnica ekwiwalentna	m
ξ_z	- zamiennik	9,81 $\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$
$\frac{\Delta P}{\Delta L}$	- jednostkowy opór przepływu	$\frac{\text{mm H}_2\text{O}}{\text{m}}$
r_o	- udział objętościowy oleju	$\frac{\text{m}^3 \text{ oleju}}{\text{m}^3 \text{ całości}}$
R_o	- stosunek objętościowy oleju	$\frac{\text{m}^3 \text{ oleju}}{\text{m}^3 \text{ wody}}$
w	- prędkość odniesiona do całkowitego przekroju	m/s
ρ	- gęstość	kg/m ³
η	- dynamiczny współczynnik lepkości	cP, kg/m . s
λ	- współczynnik oporu przepływu	-

Indeksy:

- c - odnosi się do prędkości mieszanej,
- m - odnosi się do mieszanki dwufazowej,
- o - odnosi się do oleju,
- w - odnosi się do wody.

LITERATURA

- [1] Charles M.E., Lilleleht L.U.: Can. J. Chem. Eng. 44 nr 1, 47 (1966),
- [2] Charles M.E., Govier G.W., Hodgson G.W.: Can. J. Chem. Eng. 39, nr 1, 27 (1961).
- [3] Russell T.W.F., Hodgson G.W., Govier G.W.: Can. J. Chem. Eng. 37, nr 1, 9 (1959).
- [4] Russell T.W.F., Charles M.E.: Can. J. Chem. Eng. 37, nr 1, 18 (1959).
- [5] Brauer H.: Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen, Sauerländer AG, Aarau (1971).
- [6] Govier G.W., Sullivan G.A., Wodd R.K.: Can. J. Chem. Eng. 39, nr 2, 67 (1961).
- [7] Hobler T., Palugniok H.: Inż. Chem. 2, 285 (1972).

ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ТЕЧЕНИИ ДВУХФАЗНЫХ
ЖИДКОСТЕЙ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ПРОВОДОМ

Р е з ю м е

На основе анализа литературных экспериментальных данных приведен простой метод расчёта гидравлического сопротивления при течении двухфазных жидкостей.

PRESSURE DROP IN A TWO-PHASE LIQUID MIXTURE FLOWING
THROUGH A HORIZONTAL CONDUIT

S u m m a r y

A simple method for the calculation of pressure drop in two-phase liquids, based on evaluation of experimental literature data has been proposed.