A XIV-a Conferinţă internaţională – multidisciplinară,
"Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii româneşti",
SEBEŞ, 2014

VARIAŢIA COEFICIENTULUI DE DEBIT LA ORIFICII MICI CU VÂSCOZITATEA ŞI TENSIUNEA SUPERFICIALĂ

Gabriela OPRINA, Florentina BUNEA, Lucian MÂNDREA,
Corina Alice BĂBUŢANU, Gheorghe BĂRAN†

THE VARIATION OF SMALL ORIFICES DISCHARGE WITH VISCOSITY AND SUPERFICIAL TENSION

This paper presents a synthesis of theoretical and experimental results concerning the discharge coefficient of hydraulic orifices and its dependence on Reynolds number for the case of fluids with known physical properties. The experimental researches performed in laboratory emphasize the influence of superficial tension and viscosity on the discharge through a small orifice of 3 mm diameter. For the investigated range of superficial tensions and viscosities ($\sigma = (23 \div 80) \cdot 10^{-3}$ N/m and $\eta = (1.1 \div 910) \cdot 10^{-3}$ Pa·s), there was found a linear dependence of discharge on lg Re and lg100We.

Keywords: orifice, discharge coefficient, superficial tension, viscosity
Cuvinte cheie: orificii, coeficient de debit, tensiune superficială, vâscozitate

1. Introducere

Conceptul /noţiunea de orificiu hidraulic mic presupune viteză de curgere constantă în secţiunea acestuia şi are aplicaţii importante, ca de exemplu în teoria aparatelor de măsurare a debitelor de fluide (diafragme, tuburi Venturi, rotametre). Debitul Q printr-un orificiu mic de secţiune geometrică A_g are expresia [1], [2], [3]

$$Q = \mu A_g \sqrt{2\Delta p / \rho} \quad (1)$$

cu: Δp diferenţa de presiune între secţiunea de intrare şi de evacuare, respectiv sarcina orificiului, ρ densitatea lichidului de lucru, μ coeficient de debit cu următoarea structură

$$\mu = \varphi_v \cdot \varphi_c \quad (2)$$

Coeficientul de viteză $\varphi_v = 1/\sqrt{\alpha + \zeta} \approx 1/\sqrt{1+\zeta}$ este dat de coeficientul Coriolis α şi coeficientul pierderii locale de sarcină ζ; $\varphi_c = A_c / A_g$ este coeficientul de contracţie al secţiunii de curgere, cu A_c secţiunea contractată a jetului de lichid la ieșirea din orificiu.

Se observă că pentru un orificiu realizat pe fundul unui rezervor cu suprafaţă liberă şi cota lichidului H = ct. care debuşează în atmosferă, debitul Q nu depinde de densitatea lichidului:

$$Q = \mu A_g \sqrt{2gH} \quad (3)$$

Influenţa altor proprietăţi fizice (vâscozitate, tensiune superficială) asupra debitului se poate evalua prin valorile numerelor Reynolds şi Weber definite cu relaţiile:

$$\mathrm{Re} = v_0 L / \upsilon = v_0 \rho L / \eta; \quad We = \sigma / \rho v_0 L^2 \quad (4)$$

cu L lungimea de referinţă (pentru orificii circulare lungimea de referinţă este egală cu diametrul orificiului), η vâscozitatea dinamică, ϑ viscozitatea cinematică, v_0 viteza în secţiunea orificiului şi σ coeficientul tensiunii superficiale.

Pentru orificii au fost publicate în special date privind influenţa numerelor Re şi We asupra debitului [3], [4,], [5]; unele rezultate calitative au fost obţinute de Martino and Rayne [6], care au folosit acelaşi lichid de lucru (apa) şi au variat numerele Re şi We pe seama vitezei fluidului de lucru.

Unele cercetări privind determinarea coeficienţilor de debit pentru diferite emulsii de ulei-apă s-au efectuat în industria petrolieră utilizând alte tipuri de orificii, cum ar fi stavile segment [7], [8].

Alţi cercetători [9] au studiat influenţa temperaturii şi a conţinutului de apă asupra vâscozității uleiurilor.

Ulterior [10], curgerea prin orificii a metalelor (de ex. aluminiu) s-a utilizat pentru a stabili o bază teoretică pentru determinarea unor proprietăţi fizice ale acestora.

Există, de asemenea, cercetări efectuate cu diferite fluide, însă acestea sunt dedicate unor aplicaţii specifice, cum ar fi curgerea prin orificiile lagărelor hidrostatice [11].

În lucrare se prezintă rezultatele cercetărilor de laborator efectuate la temperaturi t = 18÷20°C privind influenţa vâscozității η şi a

tensiunii superficiale σ asupra debitului printr-un orificiu circular de diametru d = 3mm, utilizând 12 lichide de lucru cu vâscozități dinamice $\eta = (1{,}1 \div 910)\cdot 10^{-3}$ Pa·s şi tensiuni superficiale $\sigma = (23 \div 80)\cdot 10^{-3}$ N/m.

2. Cercetări teoretice privind coeficientul de debit

Cercetările din literatură sunt diferenţiate prin ipotezele privind natura lichidului (perfect sau vâscos) şi metodele matematice aplicate.

Astfel:

a) pentru orificii circulare cu axa perpendiculară pe fundul rezervorului, în ipoteza mişcării potenţiale a unui lichid perfect şi incompresibil (φ_v = 1) se obţine (Carafoli și Constantinescu 1981)

$$\varphi_c = \pi/(\pi+2) = 0{,}611 . \qquad (5)$$

Valoarea determinată experimental φ_c = 0,632 de Mateescu [1, p. 44] este discutabilă şi se referă la sarcini H mici şi diametre relativ mari (d = 2 cm).

b) dacă se aplică teorema impulsului, conform [1, p. 475] se obţine

$$\frac{4}{\pi}\varphi_c^2 - 2\varphi_c + \frac{1}{\varphi_v^2} = 0 , \qquad (6)$$

ecuaţie care exprimă dependenţa între cei doi coeficienţi; pentru φ_v = 0,97 se obţine φ_c = 0,607 şi pentru φ_v = 1 (lichid perfect) rezultă φ_c = 0,652.

c) prin integrarea numerică a ecuaţiilor Euler pentru lichid greu, incompresibil, s-a obţinut viteza medie în planul orificiului

$$v_m = k_0\sqrt{2gH} \text{ , cu } k_0 = 0{,}6 + 0{,}7(r_0/H) , \qquad (7)$$

cu raza orificiului $r_0 = d/2$ şi H înălţimea apei în rezervorul cu suprafaţă liberă [13, p.104]; coeficientul k_0 asimilat cu coeficientul de debit

$$Q = k_0 A_g \sqrt{2gH} \qquad (3)'$$

depinde de sarcina orificiului la r_0 = const. iar prin extrapolarea lichid perfect – lichid vâscos, depinde de numărul Reynolds.

3. Cercetări experimentale privind coeficientul de debit

Majoritatea cercetărilor existente în literatură [4, pag. 63], [3, pag. 580] se referă la curgerea apei prin orificii mici cu diametrul de ordinul centimetrilor şi sunt publicate sub formă de diagrame (figura 1).

Numărul Re s-a calculat cu relaţia $\mathrm{Re} = d\sqrt{2gH}/\upsilon$.

În cazul aceluiaşi lichid de lucru (ϑ = const.) şi *d* = const., Re exprimă de fapt influenţa sarcinii *H* asupra coeficienţilor din figura 1.

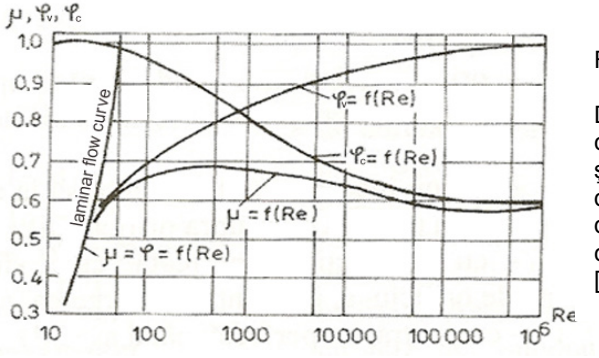


Fig. 1

Dependenţa coeficienţilor φ_v, φ_c şi μ (coeficient de debit) de numărul Re al curgerii prin orificiu [3, pag. 580]

În cazul orificiilor de tip fantă cu lăţimea *b*, în rezervoare paralelipipedice cu lăţimea *B* sunt publicate rezultate [6] privind dependenţa coeficientului de debit de înălţimea apei în fantă, respectiv de viteza la diferite rapoarte *b/B*.

Cercetările au evidenţiat o descreştere semnificativă a coeficientului de debit la fante cu lăţime mai mare, probabil datorită creşterii coeficientului φ_c.

În unele aplicaţii interesează căderea de presiune pe un orificiu sau un set de orificii; din relaţia (1) se obţine coeficientul pierderii locale de presiune ζ considerând coeficientul de contracție unitar:

$$2\Delta p/(\rho v^2) = 1/\mu^2 = 1 + \zeta \qquad (8)$$

Dependenţa ζ(Re) pentru un set de (1 ÷ 9) orificii rotunde, pătrate ş.a. într-o conductă circulară verticală Ø100, obţinută experimental cu lichidul de lucru apă, pentru Re = (2 ÷ 350)·10^3 [14] arată că pentru Re > 5·10^4, ζ, respectiv μ nu depind de Re, iar în zona Re < 2000, ζ creşte de la valoarea ζ = 4 la ζ = 10 ÷ 12.

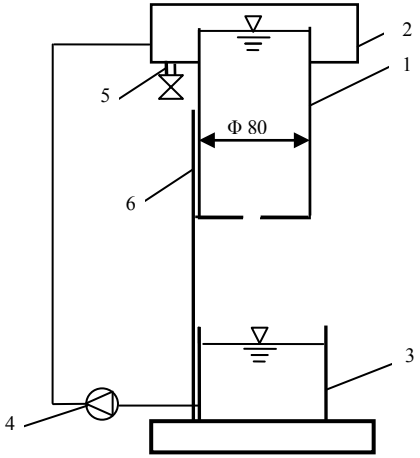
Relaţiile de calcul propuse pentru acest tip de orificii au forma [5, p. 33]

$$\mu = 0{,}59 + 8{,}9/\sqrt{\mathrm{Re}}\,, \qquad (9)$$

cu numărul Re calculat cu diametrul echivalent - relaţia (8).

4. Rezultate de laborator obţinute

Instalaţia experimentală utilizată este prezentată în figura 2. Pompa 4 este antrenată de un motor de c.c. şi debitul este reglat astfel încât cota suprafeţei libere din rezervorul 1 să fie constantă. Debitul prin orificiul circular s-a măsurat volumetric.



1-rezervor cilindric H=100mm
2-preaplin
3-rezervor de colectare
4-pompă
5-conductă de evacuare
6-suport

Fig. 2 Schiţa instalaţiei experimentale

S-au utilizat 12 lichide de lucru cu proprietăţile fizice prezentate în tabelul 1.

Tabelul 1

Densitate [kg/m^3]	Tensiune superficială [10^{3}N/m]	Vâscozitate dinamică [10^3 Pas]
880 ÷ 1260	28 ÷ 80	1,124 ÷ 909,8

Influenţa vâscozității asupra debitelor prin orificiu se poate observa din tabelul 2. S-au selectat 7 fluide de lucru pentru care coeficientul σ este relativ constant – un set de măsurători cu σ aproximativ $30\cdot10^{-3}$ N/m şi un set cu σ = $40\div45\cdot10^{-3}$ N/m . S-au calculat numerele Reynolds ale curgerii în orificiu, lgRe, precum şi numerele We.

Tabelul 2

Nr. crt.	ρ [kg/m^3]	σ·10^3 [N/m]	η·10^3 [Pas]	Q·10^6 [m^3/s]	Re [-]
1	878,7	30,1	289,17	0,307	0,40
2	1015	30,2	14,86	3,637	105,49
3	886,41	30,2	2,48	4,28	649,58
4	870,89	30	2,39	4,65	719,49
5	1260	45	909,8	0,175	0,10
6	924,6	40,3	67,55	1,75	10,17
7	1009	43,2	1,124	4,86	1852,55

Influenţa vâscozității asupra debitului, la diferite tensiuni superficiale este diferenţiată prin intervalul de variaţie al acesteia, aşa cum rezultă din tabelul 3.

Tabelul 3

η_1	η_2	η_1/η_2	Q_1	Q_2	Q_2/Q_1	Observaţii
289,17	2,32	124,64	0,307	4,65	15,15	$\sigma \approx 30 \cdot 10^{-3}$ N/m
289,17	14,86	19,46	0,307	3,637	11,85	
14,86	2,39	6,22	3,637	4,65	1,28	
2,67	1,267	2,11	4,49	4,06	0,90	$\sigma \approx 47\text{-}48 \cdot 10^{-3}$ N/m

Efectul vâscozității asupra debitului Q pentru un orificiu la σ = ct. este prezentată în figura 4 iar efectul tensiunii superficiale asupra debitului la $\eta \approx$ ct. este prezentată în figura 5.

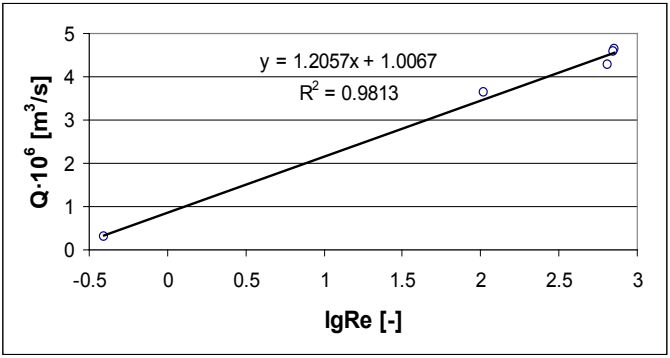


Fig. 4 Influenţa vâscozității asupra debitului pentru σ = 0,03 N/m

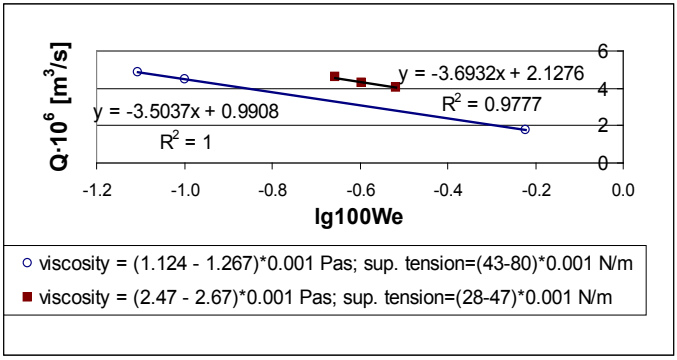


Fig. 5 Influenţa σ asupra debitului pentru două seturi de lichide cu $\eta \cong$ ct.

Reprezentând grafic (figura 5) debitul în funcţie de lg100We cu parametrii η = ct. şi σ = ct. se constată că tensiunea superficială are o

influenţă mai puternică decât vâscozitatea asupra debitului în domeniul de valori analizat.

6. Concluzii

■ S-a determinat influenţa vâscozității şi tensiunii superficiale asupra debitelor de lichide printr-un orificiu circular cu diametrul de 3 mm utilizând 12 lichide de lucru.

■ Numerele Re şi We s-au calculat pentru lichide cu proprietăţi fizice diferite utilizând relaţia (4). În intervalul Re = 0,4 ÷ 1850 şi We = 0,025 ÷ 0,425 dependenţa debitului de aceste numere este liniară (figura 4 şi figura 5).

■ La vâscozități mici, apropiate de vâscozitatea apei, tensiunea superficială are o influenţă mai puternică asupra debitului decât vâscozitatea (figura 5).

■ În cazul exploatărilor hidrotehnice și hidroenergetice se manifestă influența acestor proprietăți fizice ale apei în special în cazul infiltrațiilor dar și influența proprietăților lichidelor folosite în dispozitivele de acționare hidraulică utilizate în hidrocentrale.

Acknowledgements

Cercetările au fost efectuate cu sprijinul MCT, contract NUCLEU, nr. 0935/2009.

BIBLIOGRAFIE

[1] Mateescu, C., 1963. *Hidraulica,* Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1963.
[2] Cioc, D., *Hidraulică*, Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1983.
[3] Hâncu, S., Marin, G., *Hidraulică teoretică şi aplicată,* vol. I, Editura Cartea Universitară, Bucureşti, 2007.
[4] Kiselev, P.G., *Îndreptar pentru calcule hidraulice,* Editura Tehnică, Bucureşti, 1988.
[5] Idelcik, I.E., *Handbook of Hydraulic Resistance*, 3rd ed., CRC Press, Boca Raton, 3rd edition, 1994.
[6] Martino, G., Rayne, A., *Effects of viscosity and surface tension on slot weirs flow*. În: J. Hydraulic Res., 22(5), 1984, pag. 327-342.
[7] Pal, R., *Flow of oil-in-water emulsions through orifice and venture meters*. În: Ind. Eng. Chem. Res., 32(6), 1993, p. 1212-1217.
[8] Buhidma, A., Pal, R., *Flow measurement of two-phase oil-in-water emulsions using wedge meters and segmental orifice meters*. În: Chem. Eng. J. and Biochem. Eng. J., 63(1), pag. 59-64(6), 1996.
[9] Stoicescu, M., Cristescu, T., *Influence of temperature and water content on the viscosity of some oil types*. În: Rev. Chim., 59, nr. 8/2008, pag. 906-910.

[10] Roach, S.J., Henein, H., *A new method to dynamically measure the surface tension, viscosity and density of melts*. În: Metallurgical and materials transactions B, 36B, 2005, pag. 667-676.
[11] San Andrés, L., *Annular Pressure Seals and Hydrostatic Bearings*. În Design and Analysis of High Speed Pumps, 11-1 – 11-36, Educational Notes RTO-EN-AVT-143, Paper 11, 2006, Neuilly-sur-Seine, France: RTO.
[12] Carafoli, E., Constantinescu V.N., *Dinamica fluidelor incompresibile*, Editura Academiei, Bucureşti, 1981.
[13] Iancu, C., 1970. *Ecoulement d'un fluide d'un reservoir plan infini par un conduite de fond*. În: UPB Sci. Bull., XXXII, nr. 5/1970, pag. 93-104.
[14] Ho-Yun, N., Jong-Man, K., Kyung-Won, S., Seok-Ki, C., *Development of an experimental correlation for a pressure loss at a side orifice* În: Transactions of the ASME, 127/2005, pag. 388-392.

Dr.Ing. Gabriela OPRINA
cercetător ştiinţific gr. III, Departamentul de Eficienţă în Consumul şi Conversia de Energie, Institutul Naţional de Cercetare Dezvoltare pentru Inginerie Electrică ICPE-CA, membru AGIR,
e-mail: gabriela.oprina@icpe-ca.ro
Dr.Ing. Florentina BUNEA
cercetător ştiinţific gr. III, Departamentul de Eficienţă în Consumul şi Conversia de Energie, Institutul Naţional de Cercetare Dezvoltare pentru Inginerie Electrică ICPE-CA, membru AGIR,
e-mail: florentina.bunea@icpe-ca.ro
Conf.Dr.Ing. Lucian MÂNDREA
Departamentul de Hidraulică, Maşini Hidraulice şi Ingineria Mediului, Universitatea Politehnica Bucureşti, membru AGIR, e-mail: mandrea_lucian@hotmail.com
Dr.Ing. Corina Alice BĂBUŢANU
cercetător ştiinţific, Departamentul de Eficienţă în Consumul şi Conversia de Energie, Institutul Naţional de Cercetare Dezvoltare pentru Inginerie Electrică ICPE-CA,
e-mail: corina.babutanu@icpe-ca.ro
Prof.Dr.Ing. Gheorghe BĂRAN
Departamentul de Hidraulică, Maşini Hidraulice şi Ingineria Mediului, Universitatea Politehnica Bucureşti