

## MODELAREA SISTEMULUI DE EXTRAȚIE CU POMPĂ CU JET

### MODELLING OF THE EXTRACTION SYSTEM WITH JET PUMP

**Conf. univ. dr. ing. mat. Ion PANĂ**

Universitatea de Petrol și Gaze din Ploiești  
Ploiești, b-dul București, nr. 39, Romania  
E-mail: pana.ion@upg-ploiesti.ro

**Rezumat:** În cadrul sistemelor de extracție fără prăjini pompele cu jet ocupă un rol important prin simplitatea metodei folosite. Modelarea sistemului prin programe specializate permite studiul avansat al acestuia și stabilirea condițiilor de utilizare economică. Aceste rezultate pot fi implementate în construcția sistemelor expert utilizate în prezent la conducerea sistemelor de extracție a petrolului.

**Cuvinte cheie:** extracție petrol, simulare numerică, pompa jet

**Abstract:** Inside of the extraction systems without rods, jet pumps have an important role by the simplicity of the method used. The modelling of the system with specialized programs allows an advanced study and the establishment of the terms of economic use. These results can be implemented in the construction of expert systems currently used in the management of the oil extraction systems.

**Keywords:** oil extraction, numerical simulation, jet pump

## 1. INTRODUCERE

O soluție tehnică utilizată în exploatarea sondelor prin pompare este sistemul de extracție cu pompă cu jet. Unul dintre avantajele acestei pompe îl constituie lipsa elementelor în mișcare, fapt ce îi conferă o durabilitate mărită, în special în sondele corozive și cu impurități [1,2]. Alte avantaje sunt: posibilitatea utilizării în sondele înclinate sau orizontale; lipsa prăjinilor de pompare; posibilitatea introducerii și extragerii pe cale hidraulică. Pompele cu jet funcționează în bine în sondele cu rații gaze-petrol ridicate. Schema de principiu a unei astfel de instalații de extracție este prezentată în figura 1, în care sunt folosite două coloane concentrice de țevi de extracție. Generatorul hidraulic de suprafață (o pompă cu plungere triplex sau o pompă cu șurub) aspiră petrol fără impurități din separator și-l introduce în coloana centrală. Fluidul motor la presiune ridicată, la trecerea prin duza pompei (figura 2) își mărește viteza și conform legii lui Bernoulli, în camera de amestec, se produce scăderea presiunii statice. Datorită acestei depresiuni, este aspirat amestecul de fluide (petrol, apă, gaze, impurități) din zăcământ, care este antrenat împreună cu fluidul motor prin difuzor. Datorită creșterii de secțiune a difuzorului, viteza amestecului scade, având astfel loc o creștere corespunzătoare de presiune, necesară trimerii amestecului la suprafață, prin spațiul inelar cu un randament bun. Există o bogată literatură științifică referitoare la studiul pompelor cu jet care folosesc amestecuri bifazice, aspect încă insuficient reprezentat în produsele software de analiză [4-6]. Alegerea pompelor cu jet se face pe baza unor analize teoretice și experimentale [7-8]. Modelarea sistemelor de extracție cu pompe cu jet dispune în prezent de programe de analiză generale [9] sau dedicate [3]. O orientare recentă sprijinită de

mijloace tehnice adecvate se referă la conducerea sistemelor de extracție cu ajutorul unor sisteme expert bazată pe măsurători în sondă, având ca obiectiv reducerea consumurilor energetice [10-13]. Articolul prezintă o posibilitate de analiză a sistemului de extracție utilă în conceperea sistemelor expert de conducere a acestora.

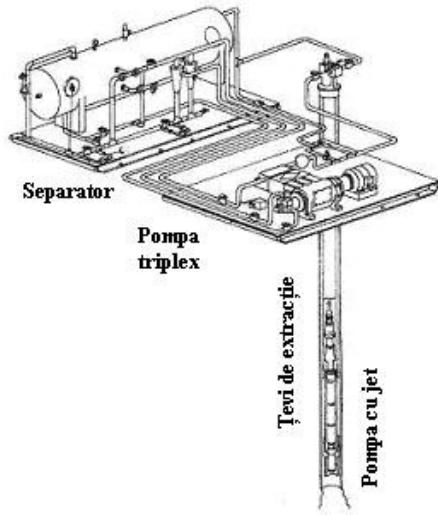


Fig. 1. Schema sistemului de extracție cu pompe cu jet.

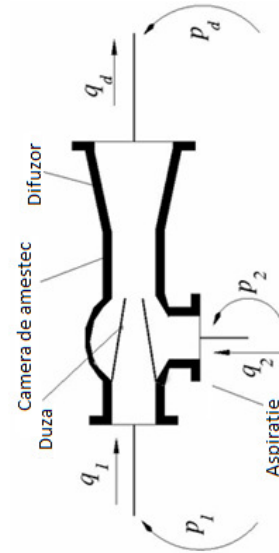


Fig. 2. Elemente principalele ale pompei cu jet.

## 2. PRINCIPALELE ELEMENTE TEORETICE FOLOSITE LA MODELAREA POMPEI CU JET

Cele mai importante relații utilizate la stabilirea modelul pompei cu jet, în acord cu ecuațiile teoretice deduse în cadrul mecanicii fluidelor [3], sunt date în continuare:

$$N = \frac{2R + \frac{2R^2 M^2}{1-R} - (1+M^2)R^2(1+K_t+K_d) - (1+K_s)\frac{2R^2 M^2}{(1-R)^2}}{1+K_p - 2R - \frac{2R^2 M^2}{1-R} + (1+M^2)R^2(1+K_t+K_d)} \quad (1)$$

$$N = \frac{p_d - p_2}{p_1 - p_d} \quad (2)$$

$$M = \frac{q_2}{q_1} \quad (3)$$

$$R = \frac{A_n}{A_t} \quad (4)$$

$$\eta = MN \quad (5)$$

$$A_n = \frac{q_1}{\alpha \rho_1} \sqrt{\frac{1+K_p - (1+K_s)\frac{R^2 M^2}{(1-R)^2}}{2(p_1 - p_2)}} \rho \quad (6)$$

$$p_{2n} = \frac{\sigma_L}{2} \left( \frac{q_2 R}{\rho_2 \alpha A_n (1-R)} \right)^2 + p_v \quad (7)$$

Aceste relații sunt implementate în programul Simulink [9] astfel încât modelul sistemului de pompare se face asemănător unei schițe folosind alături de modelul pompei și celelalte elemente necesare, toate importate din biblioteca Simulink.

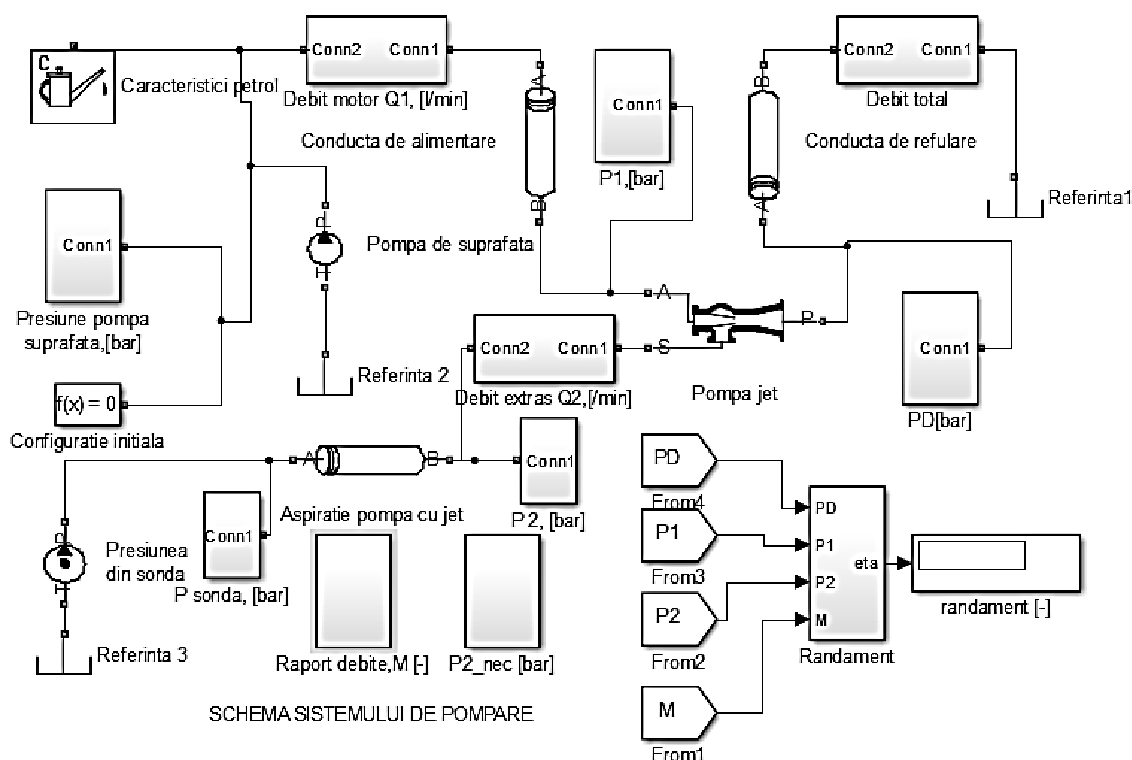
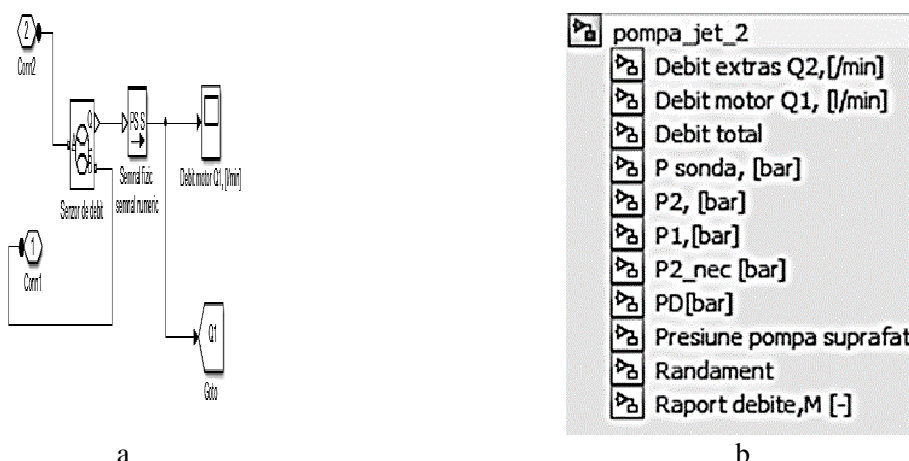


Fig. 3. Schema modelului sistemului de extracție cu pompă cu jet realizată în Simulink.

### 3. MODELUL SISTEMULUI DE EXTRACȚIE

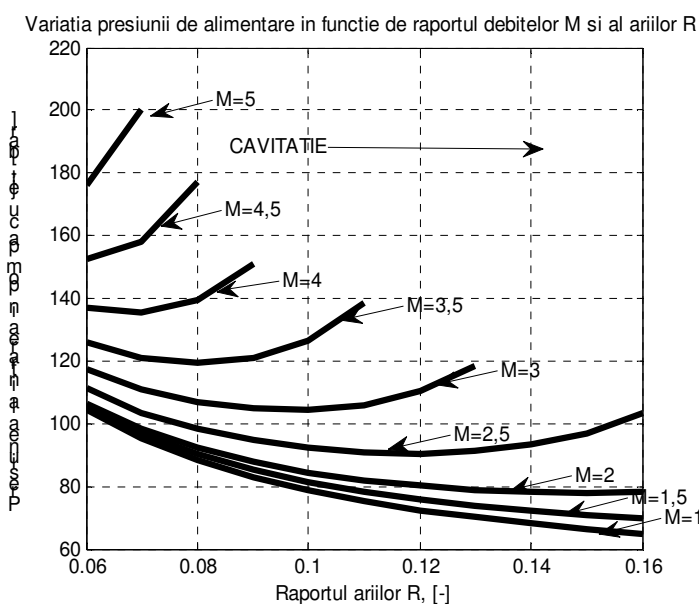
Analiza sistemului de extracție cu pompă cu jet făcută în prezenta lucrare se realizează în programul Simulink [9]. Acest program permite construcția modelului cu ajutorul elementelor din biblioteca acestuia. În continuare se descrie modul de realizare a modelului sistemului de extracție în acest program. Sistemul de extracție utilizează ca element activ o pompă volumică de suprafață (cu plingere sau cu șurub). Pompa volumică având un debit constant (scăderea debitului prin creșterea presiunii datorată pierderilor prin interstiții fiind neglijabilă) este modelată ca o sursă de debit constant numită *Pompa de suprafață*. Se introduce în caseta de dialog ce caracterizează blocul valoarea debitului de la pompa de suprafață. Presiunea pompei de suprafață este măsurată printr-un senzor de presiune introdus într-un subsistem notat cu *Presiune pompa de suprafață [bar]* iar debitul prin subsistemul *Debit motor Q<sub>1</sub>, [l/min]*. Utilizarea unui subsistem care grupează senzorul și instrumentul care afișează valoarea măsurată constituie o posibilitate de simplificare a structurii schemei, figura 4 (exemplificare pentru debitul volumic). Sensorii sunt realizați astfel încât putem selecta unitatea de măsură a semnalului fizic detectat de senzor. Semnalele fizice sunt separate de valorile numerice și în model există blocurile de transfer corespunzătoare de la valoare numerică la o mărime cu o anumită semnificație fizică (*Semnal fizic semnal numeric*) și

invers la ieșirea din zona modelului ce utilizează semnale fizice. Valoarea detectată de senzor este transmisă prin intermediul unui element de tipul *Goto* la elementul de forma *From* (câteva blocuri *From* sunt în partea din dreapta jos a figurii 3) evitând astfel legăturile directe care complică schema sistemului. Caracteristicile produsului utilizat petrol (densitate, vâscozitate, cantitatea de gaze dizolvate, modulul de elasticitate) sunt introduse prin intermediul blocului *Caracteristici petrol*. În model sunt trei conducte: *Conducta de alimentare*, prin care se face alimentarea pompei cu jet de la suprafață cu fluidul trimis de pompa volumică de suprafață; *Aspirație pompă cu jet* care asigură trecerea de la stratul productiv prin filtru la pompa cu jet; *Conducta de refulare* care trimite amestecul de produs motor și fluid extras la suprafață.



**Fig. 4. Reprezentarea unui subsistem de măsură, afișare și transmisie date (a) și structura modelului (b)**

Toate conductele au elementele geometrice: lungimea, diametrul interior, cotele de poziție ale capetelor și rugozitatea introduse prin intermediul casetei de dialog corespunzătoare. Tot în această casetă sunt introduse pierderile locale de presiune sub forma unor lungimi echivalente și limitele ce diferențiază regimul de curgere laminar, intermediar și turbulent. Presiunea sondei este introdusă printr-o sursă de presiune constantă notată *Presiunea din sondă*. Valoarea referitoare la debitul de produs extras este măsurată cu blocul *Debit extras  $Q_2$  [l/min]* iar valoarea presiunii din sondă în blocul *Presiunea din sonda, [bar]*. Pompa cu jet este de asemenea, un bloc din biblioteca Simulink; în acest fel nu mai suntem obligați să folosim relațiile (1-6) introduse în construcția acestui bloc. Parametri pompei cu jet (notată în model prin *Pompa jet*) sunt introduși în caseta de dialog corespunzătoare, respectiv: aria duzei; aria camerei de amestec; raportul dintre aria difuzorului la intrare și la ieșire; coeficienții de pierderi pentru duză, la intrarea în camera de amestec, de-a lungul camerei de amestec și pentru difuzor. Presiunea la intrarea (produsul extras) în pompa cu jet se măsoară în subsistemul  $P_2$ , [bar]. Debitul și presiunea la ieșirea din pompă sunt măsurate cu blocurile *Debit total* respectiv  $PD$  [bar]. Valorile sunt transmise la alte blocuri (*Raport debite*,  $M$  [-] și  $P_2\text{-nec}$  [bar]) prin același procedeu descris mai sus (instrumentele *Goto / From*) asigurându-se simplificarea modului de vizualizare a sistemului. Schema este completată cu blocul pentru introducerea condițiilor numerice inițiale pentru simulare, blocul *Configurație inițială*. Un subsistem este constituit pentru calculul raportului de debite  $M$  relația (3).

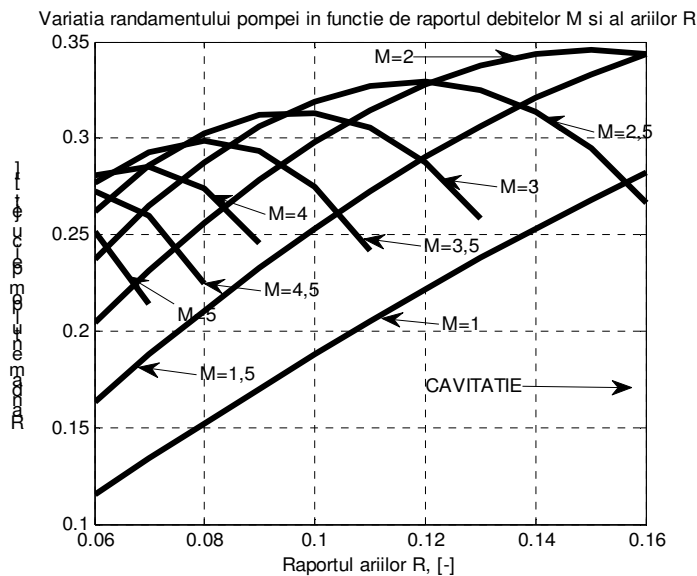


**Fig. 5. Variația presiunii la intrarea în pompa cu jet obținută prin modificarea raportului de debite  $M$  și al secțiunilor de curgere  $R$ .**

În acest subsistem notat cu *Raport de debite*,  $M$  [-] se transmit debitele de la pompa de suprafață  $Q_1$  și debitul de fluid extras  $Q_2$ . Un rol important în aprecierea condițiilor de utilizare ale pompei cu jet îl are fenomenul de cavitație care apare la scăderea accentuată a presiunii în camera de amestec prin creșterea vitezei (acest lucru este impus de principiul de funcționare al pompei cu jet). Cavitația poate fi evitată prin asigurarea unei valori a presiunii la intrarea în pompă peste valoarea care duce la cavitație calculată în blocul  $P2\_nec$  [bar]. Modelul Simulink al pompei cu jet nu are introduse aceste elemente referitoare la cavitație, de aceea acestea au fost adăugate în subsistemul  $P2\_nec$  [bar]. La scăderea presiunii sub valoarea  $P_{2n}$  simularea este întreruptă. Structura completă a modelului, cu subsistemele corespunzătoare se poate vedea în figura 4,b.

#### 4. REZULTATELE OBȚINUTE

După alcătuirea modelului prezentat și setarea caracteristicilor echipamentelor folosite (pompe, conducte, aparate de măsură) urmărim determinarea debitului de produs extras impunând debitul de fluid motor  $Q_1$  ( $58 \text{ m}^3/\text{zi}$  pentru exemplificările următoare). Ne interesează utilizarea eficientă la pompa cu jet (randamentul maxim). Aplicația se desfășoară impunând mai multe rapoarte ale secțiunilor de curgere prin pompa cu jet  $R$ . Pentru stabilirea efectivă a diametrului camerei de amestec și a duzei se folosesc relațiile (1-4, 6) și seriile de valori furnizate de producătorii de pompe cu jet [2]. În figura 5 este exemplificată variația presiunii la intrarea în pompă pentru o adâncime de fixare a pompei cu jet de 500 m și o presiune în sondă de 30 bar (viscozitatea cinematică a produsului la nivelul pompei cu jet fiind 10 cSt). Se observă limitarea posibilității de funcționare prin cavitație la fiecare raport de debite.



**Fig. 6. Variația randamentului pompei la modificarea raportului de arii  $R$  și de debite  $M$ .**

Raportul de debite are un rol important asupra randamentului pompei cu jet, figura 6. Se observă că pentru valorile studiate obținem un maxim al randamentului la valoarea  $M = 2$ , corespunzătoare unui raport de arii  $R = 0,15$ . Putem astfel să recomandăm diametrul duzei pompei (figura 7) necesar pentru a obține cel mai bun randament de folosire al pompei cu jet în condițiile de simulare alese. Această valoare este de 2,75 mm. În prezent există preocupări deosebite referitoare la stabilirea condițiilor de utilizare economică a sistemelor de extracție. Firma Lufkin care a dezvoltat o secție de producție în parcul industrial Ploiești echipează instalațiile de extracție (cu balansier) pe care le furnizează pentru OMV Petrom cu: sisteme de măsură a parametrilor din sondă; panouri de automatizare care asigură conducerea sistemului de extracție în acord cu condițiile din sondă; un sistem de transmisie a datelor de tip Scada; sistem de recuperare a energiei la faza de coborâre a unității de pompare prin transformarea energiei mecanice în energie electrică. Astfel se asigură pentru prima dată în România o folosire eficientă a sistemelor de extracție. Economia de energie este atât de mare încât permite nu numai *amortizarea rapidă a prețului echipamentelor* suplimentare asociate sistemului de extracție cât și *beneficii importante* prin reducerea pierderilor și producerea de energie electrică prin sistemele de recuperare. Tradusă la nivelul pompei cu jet această orientare se poate realiza prin adaptarea continuă a pompei la condițiile din sistem și alegerea duzei potrivite și a raportului de debite favorabil. Schimbarea duzei se poate face cu ușurință la acest sistem de extracție deoarece se folosește distribuitorul din capul de erupție la sondei pentru ridicarea și coborârea pompei. Un sistem automat de modificare a vitezei la pompa de suprafață (și implicit a debitului) se poate folosi la fel ca la unitățile de pompare cu balansier. O modificare redusă de randament (5 %) poate determina economii însemnate pe perioada îndelungată de folosire a pompei.

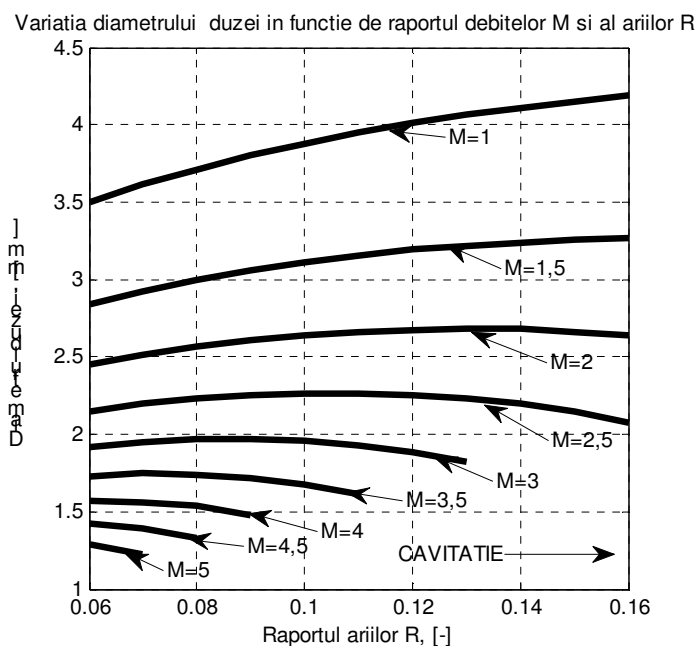


Fig. 7. Valoarea necesară pentru diametrul duzei la pompa cu jet.

## 5. CONCLUZII

Folosirea produselor specializate la modelarea sistemelor de extracție cu pompe cu jet evită calculele pe un model numeric format din relațiile (1-7). Se realizează un model echivalent sistemului real, înzestrat cu parametri corespunzători echipamentelor, ușor de modificat și de exploatat. Simularea numerică este orientată în direcția exploatării eficiente a sistemului prin sugerarea modificărilor necesare pentru atingerea acestui obiectiv. Astfel pentru exemplul discutat anterior la mărirea debitului de fluid motor de la  $58 \text{ m}^3/\text{zi}$  la  $87 \text{ m}^3/\text{zi}$  valoarea cea mai bună a randamentului se obține tot pentru rapoartele  $M = 2$  și  $R = 0,15$  dar diametrul necesar al duzei va fi de  $3,85 \text{ mm}$ , arătând necesitatea modificărilor permanente pentru atingerea obiectivului propus al folosirii economice a sistemului de pompare. Lucrarea evidențiază limitele impuse de apariția fenomenului de cavitație (figurile 5-7). Analiza sistemelor de extracție cu pompă cu jet poate fi folosite în fundamentarea unor sisteme expert de conducere automată a acestora, similară celor deja implementate pentru sistemele de pompare cu balansier. Rămân în continuare foarte multe probleme deschise în produsele software dedicate pompelor cu jet. Astfel informațiile referitoare la coeficienții de pierderi  $K_d, K_s, K_p, K_t$  nu sunt publicate de producătorii de pompe cu jet.

Utilizarea apei ca fluid motor este insuficient studiată (apar și depuneri de produse conținute de apă barită, sulfatați care reduc eficiența pompei) și de asemenea, efectul temperaturii la nivelul pompei cu jet. Lipsesc / nu sunt complete datele referitoare la exploatarea pompelor din schelele de extracție.

### Notațiile utilizate

$A_d$  aria secțiunii duzei

$K_d$  coeficientul de pierderi hidraulice al difuzorului

$A_t$  aria camerei de amestec

$K_s$  coeficientul de pierderi hidraulice al camerei de amestec la intrare

$K_p$ coeficientul de pierderi hidraulice al duzei	$K_c$ coeficientul de pierderi hidraulice prin camera de amestec
$M$ raportul debitelor	$N$ raportul presiunilor
$R$ raportul dintre aria secțiunii duzei și aria secțiunii camerei de amestec	$p_1$ presiunea la intrarea în duză
$p_2$ presiunea la aspirația pompei cu jet	$p_{2m}$ presiunea necesară la aspirația pompei cu jet pentru evitarea cavităției
$p_d$ presiunea la ieșirea din pompa cu jet	$p_v$ presiunea vaporilor saturați a fluidului extras la temperatura de la talpa sondei
$q_1$ debitul de fluid motor (activ) prin duza pompei cu jet	$q_2$ debitul de fluid extras
$q_d$ debitul total de fluid extras și fluid motor	$\alpha$ coeficient de debit prin duza pompei
$\eta$ randamentul pompei cu jet	$\rho_1$ densitatea fluidului motor
$\rho_2$ densitatea fluidului extras	$\sigma_L$ coeficientul de cavităție al pompei cu jet

### Referințe

- [1] **I.J. Karassic, J.P. Messina, P. Cooper, C.C. Heald.** „*Pump Handbook*”, Fourth edition, McGraw-Hill, NY, 2008.
- [2] **P. Săvulescu.** „*Cercetări privind utilajul petrolier pentru exploatarea sondelor prin metode neconvenționale*”, teză de doctorat, Universitatea de Petrol și Gaze din Ploiești, 2004.
- [3] **P. Săvulescu, I. Pană.** „*Utilizarea ejectorului la etanșarea pompelor centrifuge*”, în Buletinul Universității de petrol și gaze, vol. **LIV**, seria tehnică, nr. 3, 2002, pp. 185-189.
- [4] **P. Chamlong, T. Shinichi, A. Katsumi, N. Yasuki.** „*Numerical Prediction on the Optimum Mixing Throat Length for Drive Nozzle Position of the Central Jet Pump*”, The 10th International Symposium on Flow, August 26-29, 2002, Kyoto, Japan.
- [5] **S. Mikhail.** „*Two-phase Flow in Jet Pumps for Different Liquids*”, J. Fluids Eng. September 2005 Volume **127**, Issue 5, 1038 (5 pages).
- [6] **M. M Sarshar., N. A Beg Caltec.** „*The Applications and Performance of Jet Pumps in Oil and Gas Production Handling Multiphase Flow*”, 2<sup>th</sup> Nord American Conference, Banff, Canada, 2000.
- [7] **I. Pană.** „*Determination of Performance Curves for Jet Pumps Used in Oil Extraction*”, Mechanical Engineering Tehnologies '06, MT '06, Volume **8/91**, Section IV Investigation, Measuring, Testing, Control, pp. 34-37, September 20-23, Varna Bulgaria, 2006.
- [8] **A.W. Gruppig, J.L.R. Coppes, J.G. Groot.** „*Fundamentals of Oilwell Jet Pumping*” (SPE Production Engineering, Volume **3**, Number 1, Pages 9-14, February 1988.
- [9] \*\*\* *Matlab* – R 2013 b, Product help, Mathworks, 2013.
- [10] **K. S., Manjit, P. Dhruva, K. S. Aditya, J. Mihir, T. Rohit.** „*Large Scale Jet Pump Performance Optimization in a Viscous Oil Field*”, SPE 166077, Louisiana, USA, 30 Sep–2 Oct.2013.
- [11] **C. Chavan, M. Jha, M.K. Singh, R. Singh.** „*Selection and Successful Application of Jet Pumps in Mangala Oil Field: A Case Study*”. SPE 163116-MS. Presented at the SPE Artificial Lift Conference and Exhibition, Bahrain, 27- 28 November, 2012.
- [12] **I. Pană, P. Săvulescu.** „*Alcătuirea unui sistem de extracție bazată pe analiza fuzzy*”, în Buletinul Universității Petrol- Gaze Ploiești, pag. 39-45, Seria tehnică, vol. **LVII**, nr: 1/2005.
- [13] **J. Anderson.** „*Hydraulic Jet Pumps prove Ideally Suited for Remote Canadian Oil Field*”, SPE paper no. 94263, 2005.