



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <http://tapchi.humg.edu.vn>



Tính toán tối ưu đường kính và các yếu tố ảnh hưởng đến thông số tối ưu của vòi phun thủy lực

Phạm Đức Thiên *

Khoa Cơ điện, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

TÓM TẮT

Quá trình:
 Nhận bài 15/6/2017
 Chấp nhận 20/7/2017
 Đăng online 28/2/2018

Từ khóa:
 Vòi phun
 Tối ưu thủy lực
 Thủy lực dòng tia

Thủy lực vòi phun là dạng dòng tia được ứng dụng rộng rãi trong đời sống và công nghiệp. Yêu cầu đặt ra khi nghiên cứu dòng tia làm thế nào tận dụng được tối đa năng lượng của máy bơm để hiệu quả ứng dụng cao nhất. Trong bài báo này, tác giả thiết lập và đưa ra các biểu thức thể hiện điều kiện tối ưu thủy lực qua lỗ vòi phun, cụ thể là thiết lập biểu thức giảm áp qua lỗ phun, tổn thất áp suất trong hệ thống, sau đó thiết lập các biểu thức xác định áp suất ma sát tối ưu, giảm áp qua lỗ phun tối ưu, vận tốc chất lỏng qua lỗ phun tối ưu, đường kính lỗ phun tối ưu trên hai khía cạnh đó là tối ưu về công suất thủy lực, tối ưu về lực và đập của dòng thủy lực qua vòi phun. Đồng thời xác định ảnh hưởng của các yếu tố trọng lượng riêng chất lỏng, lưu lượng và áp suất máy bơm đến tối ưu thủy lực qua lỗ vòi phun. Trên cơ sở đó xây dựng các hình ảnh cụ thể về mối tương quan này bằng phần mềm Matlab.

© 2018 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

1. Mở đầu

Trong công nghiệp nói chung, việc sử dụng vòi phun thủy lực áp dụng khá rộng rãi, như: Thủy lực cát để làm sạch bề mặt vật, cắt vật; vòi phun thủy lực cắt và xói bùn, đất đá đáy sông phục vụ công tác nạo vét hoặc khai thác vật liệu; thủy lực vòi phun để sơn vật thể; vòi phun thủy lực trong công tác chữa cháy; ... và nhiều ứng dụng khác. Vấn đề đặt ra phải giải quyết đó là khi cho trước năng lượng của máy bơm thông qua áp suất và lưu lượng làm thế nào để tận dụng được tối ưu năng lượng này qua lỗ vòi phun thủy lực nhằm mang lại hiệu quả trong ứng dụng. Để giải quyết vấn đề này,

tác giả nghiên cứu tối ưu dòng thủy lực qua lỗ vòi phun theo hai khía cạnh: tối ưu về công suất thủy lực và tối ưu về lực và đập của dòng chất lỏng qua vòi phun, đồng thời nghiên cứu sự ảnh hưởng của các yếu tố đến sự tối ưu này.

2. Giảm áp qua lỗ vòi phun

Để tính toán sự giảm áp suất qua lỗ vòi phun, ta phải sử dụng định luật bảo toàn năng lượng.

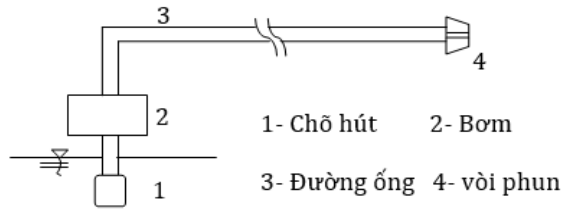
Dòng chảy từ máy bơm đến vòi phun mô tả bằng sơ đồ (Hình 1), từ đó ta có:

$$P_b = \Delta P_v + P_{ms} \tag{1}$$

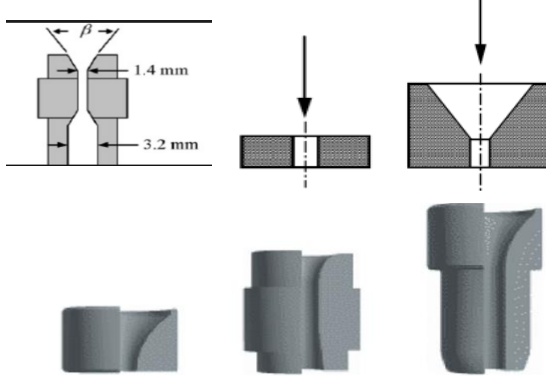
trong đó: p_b - áp suất máy bơm; p_{ms} - áp suất tổn hao do ma sát trong hệ thống; Δp_v - Giảm áp qua lỗ phun. Nếu chọn 2 vị trí mặt cắt 1 và 2 ở đầu vào và đầu ra của lỗ phun, thì ta có:

*Tác giả liên hệ

E-mail: phamducthien@humg.edu.vn



Hình 1. Sơ đồ hệ thống thủy lực dòng chảy qua vòi phun.



Hình 2. Hình ảnh một số vòi phun; a, b, c - vòi phun cắt kim loại; d, e, f - vòi phun sử dụng xói và phá đất đá (Schlumberger Company, 2017).

$$\Delta p_v + p_2 - p_1 = -p_{msv} \quad (2)$$

Trong đó: p_1, p_2 - áp suất ở đầu vào và đầu ra của vòi phun; p_{msv} - tổn thất áp suất qua vòi phun.

Dòng chảy qua lỗ phun ngắn có thể bỏ qua p_{msv} , đồng thời giảm áp qua vòi phun chính là do thay đổi động năng. Vì vậy, công thức (2) có thể viết thành:

$$\Delta p_v = p_1 - p_2 = \frac{\gamma}{2g} (v_2^2 - v_1^2) \quad (3)$$

Tuy nhiên, v_1 rất nhỏ so với v_2 nên có thể bỏ qua v_1 (theo nguyên tắc viết phương trình cân bằng năng lượng) (Võ Xuân Minh và nnk, 2009). Do vậy, giảm áp qua vòi phun là:

$$\Delta p_v = \frac{\gamma}{2g} v_2^2 \quad (4)$$

hay:

$$\Delta p_v = \frac{\gamma}{2g} v_{ra}^2 \quad (5)$$

Với: v_{ra} - vận tốc chất lỏng chảy ra khỏi vòi phun (thay thế v_2).

Từ công thức (5) biến đổi, ta được:

$$v_{ra} = \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \Delta p_v} \quad (6)$$

Thông thường vận tốc chất lỏng ra khỏi vòi phun nhỏ hơn vận tốc tính toán. Theo công thức (6) dòng chảy qua vòi phun có tổn thất áp suất ma

sát nhất định. Để điều chỉnh sự khác biệt này, ta đưa vào công thức (6) hệ số điều chỉnh C_d có giá trị nhỏ hơn 1 (C_d gọi là hệ số cản). Các trường hợp thông thường $C_d = 0,95$ (Jamal J. Azar, G. Robello Samuel, 2007), các trường hợp đặc biệt C_d xác định riêng. Công thức (6) trở thành:

$$v_{ra} = C_d \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \Delta p_v} \quad (7)$$

Nếu gọi A là diện tích của vòi phun, Q là lưu lượng chất lỏng thì:

$$v_{ra} = \frac{Q}{A} \quad (8)$$

Nếu thay vào công thức (7) rút theo Δp_v , ta được:

$$\Delta p_v = \frac{\gamma Q^2}{2gA^2 C_d^2}$$

Công thức (9) sử dụng để tính giảm áp qua lỗ phun.

3. Tổn thất áp suất ma sát trong hệ thống

Tổn thất áp suất trong hệ thống thủy lực dẫn ra vòi phun được giả thiết và tính toán như sau:

- Hệ thống có một cấp đường kính ống d , chiều dài l ;

- Dòng chảy trong ống là chất lỏng Newton.

Tổn thất áp suất ma sát được tính theo công thức Darcy:

$$p_{ms} = \lambda \gamma \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (10)$$

Trong đó: p_{ms} - tổn thất áp suất ma sát trong hệ thống; λ - hệ số ma sát; γ - trọng lượng riêng chất lỏng; v - vận tốc chất lỏng trong ống dẫn; d - đường kính ống; l - chiều dài ống; g - gia tốc trọng trường. Hệ số ma sát tính theo khu vực sức cản (chảy tầng, chảy rối thành trơn, chảy rối ít nhám và chảy rối thành nhám).

Thay vận tốc theo lưu lượng:

$$p_{ms} = 8\lambda \frac{lQ^2}{g\pi^2 d^5} \quad (11)$$

4. Tối ưu thủy lực vòi phun

Mục tiêu của tối ưu thủy lực qua vòi phun là xác định các giá trị của một số thông số thủy lực, mà với các giá trị đó sự làm việc hiệu quả của vòi phun là tốt nhất.

Về mặt tư duy, nếu cho trước một năng lượng (năng lượng của máy bơm), làm thế nào đó mà các

thông số thủy lực qua vòi phun có giá trị lớn nhất. Điều đó đồng nghĩa với việc nếu ta tìm được công suất thủy lực của dòng chất lỏng qua vòi phun lớn nhất, lực va đập của dòng chất lỏng qua lỗ phun lớn nhất thì sự tối ưu thủy lực của dòng chất lỏng qua vòi phun được thực hiện.

4. 1. Công suất thủy lực của dòng chất lỏng qua vòi phun lớn nhất, vận tốc chất lỏng và đường kính lỗ phun tối ưu

Đưa công thức (1) về dạng công thức công suất thủy lực, ta có:

$$p_b \cdot Q = p_{ms} \cdot Q + \Delta p_v \cdot Q \quad (12)$$

hay:

$$H_b = H_{ms} + H_v \quad (13)$$

trong đó: H_b - Công suất thủy lực máy bơm;
 H_{ms} - Công suất thủy lực do tổn thất áp suất ma sát;
 H_v - Công suất thủy lực do giảm áp qua vòi phun.

Lúc đó, ta có:

$$H_v = (p_b - p_{ms}) \cdot Q \quad (14)$$

Để đơn giản và có thể xác định được công suất thủy lực lớn nhất của dòng chất lỏng qua vòi phun, áp suất tổn thất do ma sát p_{ms} được mô tả như sau (Jamal et al., 2007):

$$p_{ms} = C \cdot Q^\alpha \quad (15)$$

trong đó: C- hằng số, phụ thuộc vào đặc tính chảy, đặc tính hình học hệ thống dẫn chất lỏng; α - số mũ dòng chảy.

Logarit hoá 2 vế công thức (15), ta được:

$$\lg p_{ms} = \lg C + \lg Q^\alpha \quad (16)$$

Đồ thị logarit là đường thẳng có độ dốc là α . Vì vậy, nếu trên đồ thị có 2 điểm i (p_{msi}, Q_i), j (p_{msj}, Q_j) được biết, thì độ dốc α của đường thẳng được xác định:

$$\alpha = \frac{\lg\left(\frac{P_{msj}}{P_{msi}}\right)}{\lg\left(\frac{Q_j}{Q_i}\right)} \quad (17)$$

Vi vậy, tại một số giá trị lưu lượng cho trước Q_1, Q_2, \dots , tính toán được p_{ms1}, p_{ms2}, \dots số mũ dòng chảy α được xác định.

Sau khi mô tả áp suất ma sát theo lưu lượng, thay công thức (15) vào công thức (14), ta có:

$$H_v = p_b Q - C Q^{\alpha+1} \quad (18)$$

Từ công thức (18), ta thấy công suất thủy lực của dòng chất lỏng qua vòi phun phụ thuộc nhiều

vào Q và là hàm số của lưu lượng Q.

Vi vậy, nếu thực hiện đạo hàm công thức (18) theo Q và cho bằng 0, ta có giá trị công suất thủy lực của dòng chất lỏng qua vòi phun lớn nhất:

$$\frac{dH_v}{dQ} = p_b - (\alpha + 1)C \cdot Q^\alpha = 0 \quad (19)$$

Khi:

$$p_{ms} = C \cdot Q^\alpha$$

thì:

$$p_b - (\alpha + 1)p_{ms} = 0 \quad (20)$$

hay:

$$p_{ms} = \frac{1}{\alpha + 1} p_b \quad (21)$$

Vấn đề căn nguyên mà H_v đạt lớn nhất đó là $\frac{d^2 H_v}{dQ} < 0$ tại $p_{ms} = \frac{1}{\alpha + 1} p_b$. Như vậy, tối ưu thủy lực vòi phun sẽ đạt được nếu tổn thất áp suất ma sát trong hệ thống được duy trì ở giá trị tối ưu là:

$$p_{mstu} = \frac{1}{\alpha + 1} p_b \quad (22)$$

Khi có áp suất ma sát tối ưu, ta có giảm áp qua vòi phun tối ưu là:

$$\Delta p_{vtu} = \frac{\alpha}{\alpha + 1} p_b \quad (23)$$

Từ công thức (7) và công thức (23), ta có được vận tốc tối ưu qua lỗ phun vòi phun:

$$v_{vtu} = C_d \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \frac{\alpha}{\alpha + 1} p_b} \quad (24)$$

Diện tích lỗ vòi phun tối ưu:

$$A_{tu} = \frac{Q}{v_{vtu}} \quad (25)$$

Nếu gọi d_{tu} là đường kính vòi phun thủy lực tối ưu, ta có:

$$d_{ntu} = 2 \sqrt{\frac{A_{tu}}{\pi}} \quad (26)$$

Các công thức (22), (23), (24) (25), (26) là các công thức tối ưu về công suất thủy lực của dòng chất lỏng qua vòi phun.

4. 2 Phản lực dòng va đập của dòng chất lỏng qua lỗ phun lớn nhất

Lực va đập thủy lực bởi dòng chất lỏng qua lỗ phun được xác định theo định luật 2 Newton (Kostic, Hartnett, 1984) hoặc theo phản lực dòng tia (Jamal et al., 2007; Smalling, Key, 1979):

$$F = BQ\sqrt{\Delta p_v} \quad (27)$$

trong đó: B - hệ số xác định bởi, $B = C_d \sqrt{\frac{2\gamma}{g}}$

Từ công thức (12) và (15), có:

$$\Delta p_v = p_b - CQ^\alpha \quad (28)$$

Thay công thức (28) vào công thức (27), được:

$$F = BQ\sqrt{p_b - CQ^\alpha} \quad (29)$$

Áp suất của bơm được mô tả:

$$p_b = \frac{H_b}{Q} \quad (30)$$

Thay công thức (30) vào công thức (29):

$$F = B\sqrt{QH_b - CQ^{\alpha+2}} \quad (31)$$

Lấy đạo hàm công thức (4. 35) theo Q và cho bằng 0, ta được:

$$\frac{dF}{dQ} = \frac{1}{2} B \frac{(H_b - (\alpha + 2)CQ^{\alpha+1})}{\sqrt{QH_b - CQ^{\alpha+2}}} = 0 \quad (32)$$

Công thức (32) = 0 đồng nghĩa với tử số bằng 0:

$$p_b Q - (\alpha + 2) p_{ms} Q = 0 \quad (33)$$

Từ đó, ta có tổn thất áp suất ma sát tối ưu:

$$p_{mstu} = \frac{1}{\alpha + 2} p_b \quad (34)$$

Giảm áp qua vòi phun tối ưu:

$$p_{vtu} = \frac{\alpha + 1}{\alpha + 2} p_b \quad (35)$$

Từ công thức (7) và công thức (35), ta có được vận tốc tối ưu qua lỗ phun vòi phun:

$$v_{vtu} = C_d \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \frac{\alpha + 1}{\alpha + 2} p_b} \quad (36)$$

Diện tích và đường kính lỗ vòi phun tối ưu được xác định theo công thức (25), (26).

5. Tính toán mô phỏng tối ưu thủy lực qua lỗ vòi phun và các yếu tố ảnh hưởng đến thông số tối ưu

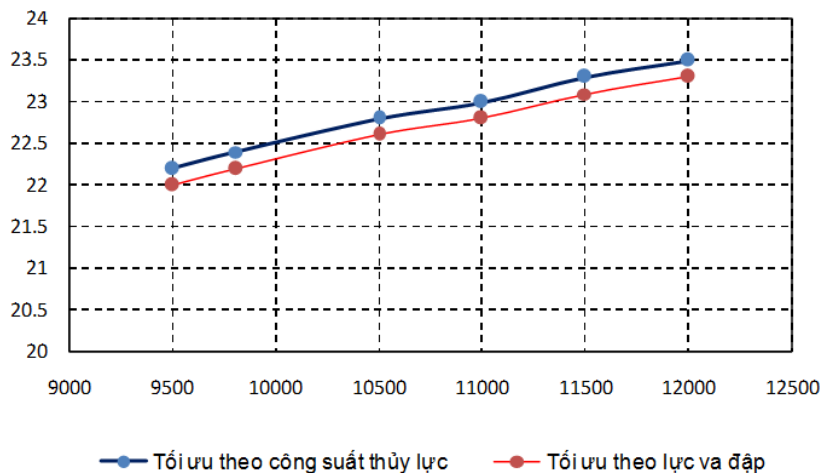
5.1. Thuật toán mô phỏng

Bảng 1. Thông số dữ liệu cơ sở.

Thông số	Độ nhớt	Đường kính ống	Chiều dài ống	Lưu lượng	Áp suất máy bơm	Trọng lượng riêng chất lỏng
Giá trị	0,0101 St	34 mm	50 m	15 l/s	10 at	9810N/m ³

Bảng 2. Đường kính vòi phun tối ưu theo trọng lượng riêng chất lỏng.

Trọng lượng riêng, N/m ³	9500	9810	10500	11000	11500	12000
Đường kính lỗ phun theo tối ưu công suất, mm.	22,2	22,4	22,8	23,0	23,3	23,5
Đường kính lỗ phun theo tối ưu lực va đập, mm.	22,0	22,2	22,6	22,8	23,1	23,3



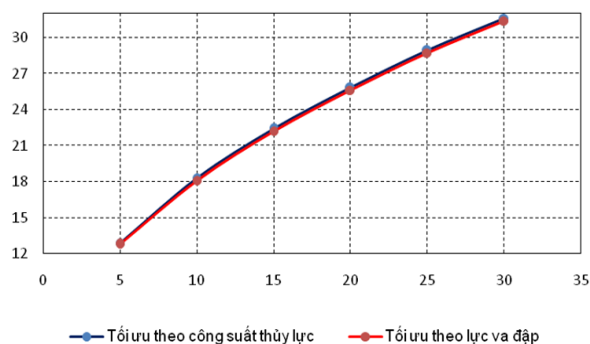
Hình 3. Đồ thị biểu diễn quan hệ giữa trọng lượng riêng chất lỏng với đường kính lỗ phun tối ưu.

Bảng 3. Đường kính vòi phun tối ưu theo lưu lượng chất lỏng.

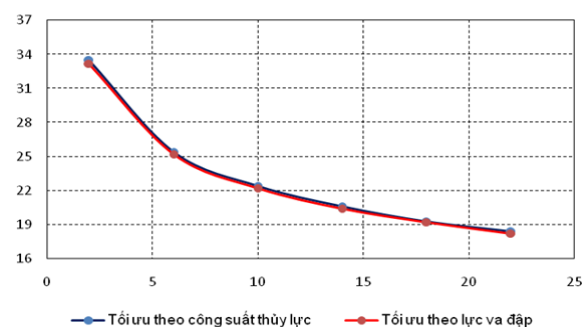
Lưu lượng chất lỏng, l/s.	5	10	15	20	25	30
Đường kính lỗ phun theo tối ưu công suất, mm.	12,9	18,3	22,4	25,8	28,9	31,6
Đường kính lỗ phun theo tối ưu lực va đập, mm.	12,8	18,1	22,2	25,6	28,7	31,4

Bảng 4. Đường kính vòi phun tối ưu theo áp suất máy bơm.

Áp suất máy bơm, at.	2	6	10	14	18	22
Đường kính lỗ phun theo tối ưu công suất, mm.	33,5	25,4	22,4	20,6	19,3	18,4
Đường kính lỗ phun theo tối ưu lực va đập, mm.	33,2	25,2	22,2	20,4	19,2	18,2



Hình 4. Đồ thị biểu diễn quan hệ giữa lưu lượng chất lỏng với đường kính lỗ phun tối ưu.



Hình 5. Đồ thị biểu diễn quan hệ giữa áp suất máy bơm với đường kính lỗ phun tối ưu.

Bước 1: Nhập các đại lượng: độ nhớt chất lỏng, trọng lượng riêng chất lỏng, đường kính ống, độ nhám tuyệt đối của ống, chiều dài ống, lưu lượng dòng chảy, áp suất máy bơm;

Bước 2: Tính các thông số dòng chảy: diện tích mặt cắt ướt, số Reynol, ...;

Bước 3: Tính hệ số ma sát;

Bước 4: Tính tổn thất áp suất ma sát;

Bước 5: Tính chỉ số đặc trưng dòng chảy;

Tùy theo tiêu chuẩn tối ưu, ta có các bước tiếp theo:

- Tối ưu theo công suất thủy lực.

Bước 6: Tính áp suất ma sát tối ưu theo công thức (21);

Bước 7: Tính giảm áp tối ưu qua lỗ phun theo công thức (22);

Bước 9: Tính tiết diện tối ưu lỗ phun theo công thức (25);

Bước 10: Tính đường kính lỗ phun tối ưu theo công thức (26);

- Tối ưu theo lực va đập đáy

Bước 11: Tính áp suất ma sát tối ưu theo công thức (34);

Bước 12: Tính giảm áp tối ưu qua lỗ phun theo công thức (35);

Bước 13: Tính tiết diện tối ưu lỗ phun theo công thức (25);

Bước 14: Tính đường kính lỗ phun tối ưu theo công thức (26).

5. 2. Nguyên tắc tính toán mô phỏng

Quá trình tính toán mô phỏng được thực hiện bằng lập chương trình trong phần mềm Matlab (Trần Quang Khánh, 2012; Phan Thanh Tao, 2004). Sự mô phỏng được thực hiện dựa trên trường hợp dữ liệu cơ sở trong Bảng 1.

Để tính các thông số tối ưu. Khi chạy chương trình tính toán mô phỏng, các thông số: trọng lượng riêng chất lỏng, lưu lượng, áp suất máy bơm lần lượt được thay đổi. Các thông số còn lại theo giá trị dữ liệu cơ sở. Kết quả chạy chương trình tính toán mô phỏng thể hiện phần dưới.

5. 3. Kết quả tính toán mô phỏng sự ảnh hưởng của các yếu tố đến đường kính tối ưu lỗ vòi phun

5. 3. 1. Ảnh của trọng lượng riêng chất lỏng

Xác định sự thay đổi của đường kính lỗ phun tối ưu theo có trọng lượng riêng khi chạy chương trình tính toán mô phỏng ta thay đổi từ giá trị 9500N/m³ đến 12000 N/m³. Từ kết quả ta thấy

trọng lượng riêng chất lỏng tăng làm đường kính tối ưu tăng. Đường kính tối ưu theo lực va đập nhỏ hơn đường kính tối ưu theo công suất.

5.3.3. Ảnh hưởng của áp suất máy bơm

Ngược lại so với hai thông số trên, khi cho áp suất máy bơm tăng (từ 2 đến 22at) làm đường kính tối ưu giảm. Đường kính tối ưu theo lực va đập nhỏ hơn đường kính tối ưu theo công suất.

6. Kết luận

Bằng lý luận lô gic toán học thiết lập được đường kính tối ưu lỗ vòi phun thủy lực theo hai khía cạnh đó là tối ưu về công suất thủy lực và tối ưu về lực đập của dòng chất lỏng qua vòi phun. Đại lượng này phụ thuộc các yếu tố đó là trọng lượng riêng chất lỏng, lưu lượng bơm và áp suất máy bơm.

Bằng tính toán mô phỏng thấy rằng thông số trọng lượng riêng chất lỏng, lưu lượng bơm tăng làm đường kính tối ưu tăng, còn áp suất máy bơm tăng làm đường kính tối ưu giảm. Đường kính tối ưu theo lực va đập luôn nhỏ hơn đường kính tối ưu theo công suất.

Tài liệu tham khảo

- Jamal, J., Azar, G., Robello S., 2007. *Drilling Engineering*. Tulsa, Oklahoma, USA.
- Kostic, M., Hartnett, J. P., 1984. Predicting turbulent friction factor of non - newtonian fluids in non-circular ducts, in. comm heat mass transfer. 345-352.
- Phan Thanh Tao, 2004. *Giáo trình Matlab*. Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng, Đà Nẵng.
- Schlumberger Company, 2017. Smith bits product catalog.
- Smalling, D. A, Key, T. A., 1979. Optimization of jet bit hydraulic using impact pressure. Paper SPE 8440, *Presented at the 54th annual fall technology conference*. Las Vegas, USA.
- Trần Quang Khánh, 2012. *Giáo trình Cơ sở Matlab ứng dụng*. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật.
- Võ Xuân Minh, Vương Lan Vân, Phạm Đức Thiên, 2009. *Thủy lực cơ sở*. Trường Đại học Mỏ -Địa chất, Hà Nội.

ABSTRACT

Optimizing diameter of hydraulic nozzle and researching the influence of parameters on optimal hydraulic nozzle's performance

Thien Duc Pham

Faculty of Electro - Mechanics, Hanoi University of Mining and Geology, Vietnam.

Hydraulic nozzles are widely used in industry as well as human life. The hydraulic energy could be converted to mechanical energy (momentum force) by using a hydraulic nozzle. Due to nozzle resistance the flow energy is lost. Therefore, taking high efficiency is necessary. This paper presents the equations to optimize hydraulic nozzle. The equations illustrate the pressure drop on nozzle and friction pressure loss along conduit and other equations for calculating pressure drop, friction loss relatively on an optimal nozzle. Based on those equations, author suggests the equations to determine the optimal diameter also pressure loss and velocity on an optimal nozzle. Further, author research the influence of fluid specific gravity, the flow rate and the head static on the optimal nozzle performance.