

NGHIÊN CỨU CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN LỰC CẢN ĐÀO CỦA MÁY BỐC XÚC TRONG ĐƯỜNG HẦM KHẨU ĐỘ NHỎ ANALYSIS OF FACTORS INFLUENCING ON RESISTIVE AND DIGGING FORCES OF EXCAVATORS IN SMALL-SECTION TUNNELS

NGUYỄN QUỐC SÁNG^{1*}, NGUYỄN VIỆT TÂN², LÊ ANH TUẤN³

¹Hệ Quản lý học viên sau đại học, Học viện Kỹ thuật quân sự

²Viện Cơ khí động lực, Học viện Kỹ thuật quân sự

³Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: quocsangnvs@lqdtu.edu.vn

Tóm tắt

Để nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến lực cản đào của máy bốc xúc trong đường hầm khẩu độ nhỏ, cần phải xây dựng mô hình tính toán và giải quyết bài toán tương tác giữa gầu xúc và môi trường vật liệu sau khoan nổ (môi trường hạt rời). Bài báo trình bày phương pháp xây dựng mô hình tính toán, xác định các thành phần lực cản, lực cản tổng cộng tác động lên gầu xúc và lựa chọn một số thông số đặc trưng để đánh giá ảnh hưởng của chúng đến lực cản đào trong quá trình vận hành máy. Kết quả nghiên cứu có tính ứng dụng trong thực tiễn làm cơ sở cho việc thiết kế, chế tạo máy bốc xúc phục vụ thi công đường hầm khẩu độ nhỏ.

Từ khóa: Lực đào, máy xúc, môi trường hạt rời, mô hình toán học, lực cản.

Abstract

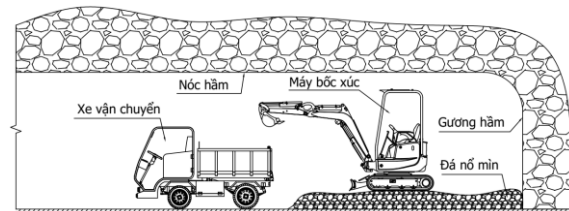
To discover the factors influencing on resistive and digging forces of excavators, we develop a mathematical model describing the interaction between excavator bucket and post-blast material in small-section tunnels. We analyze the partially resistive forces and total resistance acting on the excavator bucket in granular environment. Based on this, we select the key parameters to evaluate their influences to excavation resistance. The results show the effectiveness in design and manufacturing of the excavators working in constructional small-section tunnels.

Keywords: Digging forces, excavators, granular environment, mathematical model, resistive forces.

1. Mở đầu

Hiện nay, trong công nghệ thi công đường hầm, các máy bốc xúc vật liệu thường được sử dụng bao gồm máy bốc xúc kiểu gầu lật, kiểu cào vơ, kiểu

vuốt đứng, kiểu gầu ngược,... [1]. Đối với đường hầm khẩu độ nhỏ, không gian hoạt động hạn chế thì các máy xúc mini có bộ công tác dạng cần, tay gầu, gầu trên thực tế cho thấy hoạt động hiệu quả hơn cả. Nhiệm vụ của máy bốc xúc là thu gom và xúc vật liệu sau nổ mìn lên xe vận chuyển theo sơ đồ như trên Hình 1.



Hình 1. Mô tả quá trình làm việc của máy bốc xúc trong đường hầm khẩu độ nhỏ

Quá trình tương tác giữa bộ công tác của máy với môi trường làm việc chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố như tính chất cơ lý của vật liệu bốc xúc, thông số kết cấu và thông số làm việc của máy. Các nghiên cứu gần đây tập trung vào vật liệu có độ mịn cao như đất, cát, và giả thiết là vật liệu đồng nhất [2, 3]. Nghiên cứu này xét vật liệu bốc xúc trong đường hầm là đá sau nổ mìn, đây là môi trường hạt rời, không đồng nhất nên quá trình tương tác của gầu với môi trường này cũng có nhiều khác biệt so với đất tự nhiên. Mặt khác, sự tương tác của bộ công tác máy bốc xúc với môi trường đá sau nổ mìn chưa được nghiên cứu nhiều nên nội dung bài báo này đã xây dựng mô hình tính toán các thành phần lực cản tác động lên gầu xúc và tiến hành khảo sát các yếu tố ảnh hưởng đến lực cản đào, làm cơ sở cho việc tính toán và xây dựng mô hình động học, động lực học sau này.

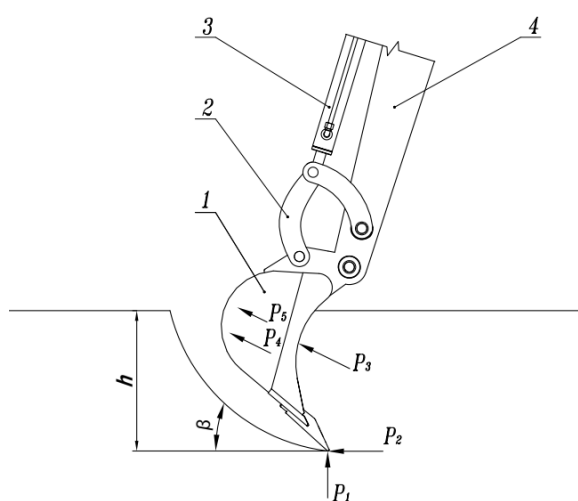
2. Xây dựng mô hình tính toán lực cản đào tác dụng lên máy bốc xúc

Để xây dựng mô hình tính toán, cần một số giả thiết sau: Môi trường đá sau nổ mìn là môi trường hạt rời có lực kết dính giữa các hạt rất nhỏ, có thể bỏ qua trong quá trình tính toán; phoi cắt được quy về dạng phoi rời rạc; quá trình cắt được xem là quá trình

cắt kín và có sự tham gia của lưỡi cắt hai thành bên, không xét đến lực quán tính; gầu đào được coi là vật thể cứng tuyệt đối; bỏ qua lực ma sát tại các khớp quay.

Khi đó, các thành phần lực cản tác dụng lên gầu xúc như trên hình 2, bao gồm:

- Lực cản cắt theo phương pháp tuyến P_1 ;
- Lực cản cắt theo phương tiếp tuyến P_2 ;
- Lực cản trên lưỡi cắt thành bên của gầu P_3 ;
- Lực cản sinh ra khi dịch chuyển khối vật liệu vào bên trong gầu P_4 ;
- Lực cản ma sát giữa hai bên thành gầu với khối vật liệu P_5 .



Hình 2. Sơ đồ các thành phần lực cản tác dụng lên gầu xúc

1. Gầu xúc; 2. Cơ cấu bốn khâu; 3. Xi lanh dẫn động gầu;
4. Tay gầu

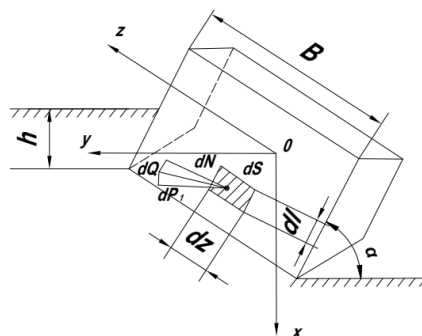
Tổng lực cản tác dụng trực tiếp lên gầu khi bốc xúc là:

$$\bar{P} = \bar{P}_1 + \bar{P}_2 + \bar{P}_3 + \bar{P}_4 + \bar{P}_5 \quad (1)$$

* Xác định thành phần lực cản cắt P_1 và P_2

Môi trường đá sau nổ mìn có các đặc điểm và tính chất cơ lý khác biệt so với môi trường đất thuần túy nên việc áp dụng các công thức tính lực cản cắt của Dombrovski, Zelenhin là không phù hợp. Do đó, các thành phần lực cản cắt đối với môi trường đá nổ mìn được xác định theo lý thuyết cân bằng tới hạn và sẽ được trình bày dưới đây.

Theo [4], để xác định được các thành phần lực cản P_1 và P_2 , tiến hành xem xét một phân tử diện tích dS có chiều rộng dz , chiều dài dl trên bề mặt lưỡi cắt thực hiện quá trình tách một lớp vật liệu với góc cắt α (hình 3).



Hình 3. Mô hình tính thành phần lực cản pháp tuyến và tiếp tuyến

Sau đó, tính các thành phần lực cản pháp tuyến dN và hợp lực dQ của lực cản phân tử trên bề mặt chính diện và xác định được thành phần cản pháp tuyến P_1 (theo phương đứng), thành phần cản tiếp tuyến P_2 (theo phương ngang) theo các công thức sau:

$$P_1 = A_{\alpha 1} A_1 \int_0^B \int_0^h \left[\gamma \chi + c_w \cot \rho \left(1 - \frac{1}{A_1} \right) \right] dx dz \quad (2)$$

$$= A_{\alpha 1} A_1 B h \left[\frac{\gamma h}{2} + c_w \cot \left(1 - \frac{1}{A_1} \right) + p \right]$$

$$P_2 = A_{\alpha 2} A_1 \int_0^B \int_0^h \left[\gamma \chi + c_w \cot \rho \left(1 - \frac{1}{A_1} \right) \right] dx dz \quad (3)$$

$$= A_{\alpha 2} A_1 B h \left[\frac{\gamma h}{2} + c_w \cot \left(1 - \frac{1}{A_1} \right) + p \right]$$

Trong đó: γ, ρ là trọng lượng riêng và góc ma sát trong của đất đá; χ là độ sâu của phân tử đang xét trên bề mặt dao; p là áp lực phân bố trên bề mặt dao cắt: $p = K_p \gamma (h - l \sin \alpha)$; K_p là hệ số áp lực chủ

động: $K_p = (1 + \sin \rho) / (1 - \sin \rho)$; l, h là chiều cao

của lưỡi cắt và chiều sâu ấn gầu vào đồng vật liệu; c_w là hệ số kết dính giữa các phân tử của đất đá; A_1 là hệ số ảnh hưởng của góc cắt và ma sát trong của vật

liệu: $A_1 = \frac{1 - \sin \rho \cos 2\alpha}{1 - \sin \rho}$; hệ số

$$A_{\alpha 1} = (1 + \cot \alpha \tan \delta); \text{ hệ số } A_{\alpha 2} = (\cot \alpha - \tan \delta)$$

với α là góc cắt; δ là góc ma sát ngoài.

Đối với môi trường hạt rời, khi lực kết dính không đáng kể (có thể bỏ qua) thì $c_w=0$ và công thức (2), (3) được viết như sau:

$$P_1 = A_{u2} A_1 B h \left[\frac{\gamma h}{2} + p \right] \quad (4)$$

$$P_2 = A_{u1} A_1 B h \left[\frac{\gamma h}{2} + p \right] \quad (5)$$

* Xác định thành phần lực cản cắt P_3

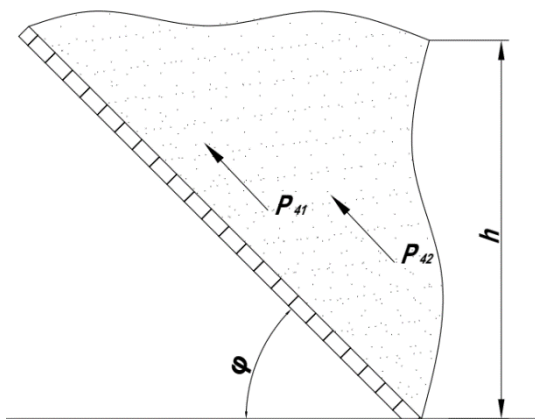
Lực cản trên lưỡi cắt thành bên của gầu, theo [5], được xác như sau:

$$P_3 = K_2 (\ell + 0.03s) \quad (6)$$

Trong đó: ℓ , s là chiều dài và chiều dày lưỡi cắt thành bên; K_2 là hệ số kể đến ảnh hưởng lực cản cắt trên lưỡi cắt thành bên.

* Xác định thành phần lực cản sinh ra khi dịch chuyển khối vật liệu P_4

Do phoi cắt trong môi trường đá sau nổ mìn có dạng rời rạc nên việc xác định lực cản P_4 được tính toán theo mô hình gầu ngoạm.



Hình 4. Các thành phần lực cản P_4

Cụ thể, theo [6], P_4 là tổng của hai lực thành phần: P_{41} là lực cản sinh ra khi dịch chuyển khối vật liệu có khối lượng Q trượt lên trên theo bề mặt đáy gầu và P_{42} là lực cản sinh ra bởi lực ma sát của khối vật liệu với hai mặt trong của hai thành bên gầu (Hình 4), được xác định là:

$$P_4 = P_{41} + 2P_{42} \quad (7)$$

Lực cản P_{41} được tính theo công thức:

$$P_{41} = Q \tan(\varphi + \delta) \quad (8)$$

Trong đó: φ là góc nghiêng của đáy gầu so với mặt phẳng nằm ngang; δ là góc ma sát ngoài; Q là khối lượng vật liệu được xúc vào gầu, được xác định

$$\text{nghư sau: } Q = \frac{\gamma B h^2}{2} \cot \varphi.$$

Khi đó:

$$P_{41} = \frac{\gamma B h^2}{2} \cot \varphi \tan(\varphi + \delta) \quad (9)$$

Lực cản P_{42} được tính theo công thức:

$$P_{42} = E_p \tan \delta \quad (10)$$

Trong đó: E_p là áp lực bị động của vật liệu lên thành gầu, được xác định như sau:

$$E_p = \frac{\gamma h^2}{2} \frac{h \tan^2(90 - \tau) \cot \varphi}{3} \quad (11)$$

Trong đó: τ là góc trượt: $\tau = \tau_0 - \frac{\rho}{2}$ với τ_0 là góc dốc tự nhiên của vật liệu; ρ là góc ma sát trong của vật liệu.

Thế các công thức (9), (10), (11) vào công thức (7), lực P_4 được xác định là:

$$P_4 = \frac{B h^2 \gamma}{2} \frac{\tan(\varphi + \delta)}{\tan \varphi} + \frac{\gamma h^2 h \tan^2(90 - \tau) \cot \varphi}{3} \tan \delta \quad (12)$$

* Xác định thành phần lực cản ma sát thành bên P_5

Lực cản này sinh ra khi gầu thực hiện cắt kín trong khối vật liệu. Lực P_5 được xác định theo công thức:

$$P_5 = N_{ng} \mu \quad (13)$$

Trong đó: μ là hệ số ma sát giữa gầu với đá nổ mìn; N_{ng} là lực pháp tuyến do khối vật liệu bên ngoài tác động lên thành gầu:

$$N_{ng} = K_p \gamma h^2 L \quad (14)$$

Như vậy, có thể viết lại công thức tính lực P_5 như sau:

$$P_5 = \gamma h^2 L \mu (1 + \sin \rho) / (1 - \sin \rho) \quad (15)$$

3. Khảo sát sự ảnh hưởng của một số yếu tố đến lực cản đào

Đối với môi trường đá sau nổ mìn, lấy bộ số liệu đầu vào như sau [4, 6]:

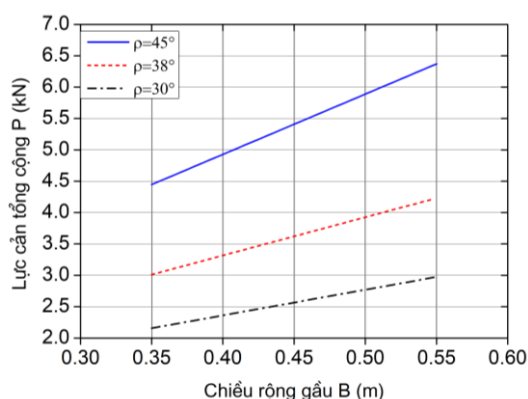
$\alpha = 40^\circ$; $\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$; $\mu = 0,84$; $L = 0,45 \text{ m}$; $l = 0,1 \text{ m}$; $s = 0,005 \text{ m}$; $\ell = 0,3 \text{ m}$; $K_2 = 400$; $\tau = 20^\circ$; $\varphi = 30^\circ$; $\delta = 45^\circ$.

Lực cản tổng cộng P phụ thuộc vào tính chất cơ

lý của vật liệu bốc xúc, thông số kết cấu và làm việc của bộ công tác. Trong đó, tính chất cơ lý của vật liệu bao gồm: Trọng lượng riêng (γ), hệ số ma sát (μ), góc ma sát trong (ρ), góc trượt (τ), góc ma sát ngoài (δ); thông số kết cấu bộ công tác gồm: Chiều rộng gầu (B), chiều dài gầu (L), chiều dài lưỡi cắt thành bên (l), chiều dày lưỡi cắt thành bên (s); thông số làm việc gồm: Độ sâu ấn gầu (h), góc cắt (α). Trong phạm vi nghiên cứu, bài báo chỉ khảo sát sự ảnh hưởng đồng thời của một số yếu tố điển hình là: Chiều rộng gầu (B) và góc ma sát trong của vật liệu (ρ), độ sâu ấn gầu (h) và góc ma sát trong của vật liệu (ρ), chiều rộng gầu (B) và độ sâu ấn gầu (h) đến lực cản tổng cộng.

*** Khảo sát sự ảnh hưởng của chiều rộng gầu và góc ma sát trong của vật liệu**

Chọn $h=0,15\text{m}$, các thông số còn lại theo bộ số liệu đầu vào. Lấy góc ma sát trong theo ba loại vật liệu hạt rời trong đường hầm là: thạch cao ($\rho = 30^\circ$); than đá ($\rho = 38^\circ$); đá vôi ($\rho = 45^\circ$) [6], thay đổi chiều rộng B từ giá trị $B_{\min}=0,35\text{m}$ đến giá trị $B_{\max}=0,55\text{m}$. Đồ thị biểu diễn lực cản tổng cộng cho như Hình 5.



Hình 5. Ảnh hưởng của chiều rộng gầu và góc ma sát trong vật liệu đến lực cản đào

Nhận xét:

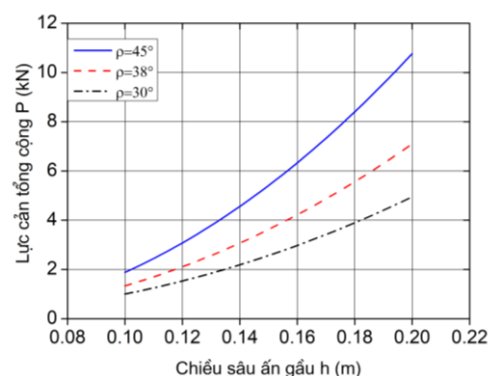
- Về quy luật: lực cản tổng cộng thay đổi gần như tuyến tính với giá trị chiều rộng gầu B và tăng theo góc ma sát trong của vật liệu (hay là loại vật liệu) do thông số B xuất hiện trong hầu hết các công thức tính lực cản thành phần (P_1, P_2, P_4, P_5) như một biến của hàm bậc nhất.

- Về giá trị: khi chọn ba loại vật liệu ứng với góc ma sát trong là $30^\circ, 38^\circ$ và 45° , thay đổi chiều rộng gầu từ $0,35\text{m}$ đến $0,55\text{m}$, lực cản tổng cộng tăng tương ứng từ $2,16 \div 2,98$ (kN), $3,0 \div 4,2$ (kN), $4,45 \div 6,37$ (kN). Như vậy, với một giá trị B cho trước

thì có thể xác định được P theo từng loại vật liệu, cũng như theo vật liệu tạo ra P lớn nhất ứng với đá vôi phong hóa, từ đó xác định được lực dẫn động cần thiết cho gầu xúc để có thể hoạt động bình thường, cụ thể: Với $B=0,45\text{m}$ thì lực cản đào tổng cộng lần lượt là $2,57\text{kN}$, $3,6\text{kN}$ và $5,41\text{kN}$. Khi đó, chọn công suất dẫn động gầu phải $\geq 5,41\text{kN}$.

*** Khảo sát sự ảnh hưởng của chiều sâu ấn gầu và góc ma sát trong của vật liệu**

Chọn $B=0,45\text{m}$, các thông số còn lại theo bộ số liệu đầu vào. Lấy góc ma sát trong theo ba loại vật liệu đã nêu ở trên lần lượt là $30^\circ, 38^\circ$ và 45° , thay đổi chiều sâu ấn gầu từ giá trị $h_{\min}=0,1\text{m}$ đến giá trị $h_{\max}=0,2\text{m}$. Đồ thị biểu diễn lực cản tổng cộng như trên Hình 6.



Hình 6. Ảnh hưởng của độ sâu ấn gầu và góc ma sát trong của vật liệu đến lực cản đào

Nhận xét:

- Về quy luật: lực cản tổng cộng thay đổi theo đường cong và tăng theo góc ma sát trong của vật liệu do các lực cản thành phần P_1, P_2, P_4, P_5 là hàm bậc hai và bậc ba của h .

- Về giá trị: khi chọn ba loại vật liệu ứng với góc ma sát trong là $30^\circ, 38^\circ$ và 45° , thay đổi chiều sâu ấn gầu từ $0,1\text{m}$ đến $0,2\text{m}$, lực cản tổng cộng tăng nhanh tương ứng từ $1,0 \div 4,95$ (kN), $1,33 \div 7,1$ (kN), $1,89 \div 10,76$ (kN). Như vậy, khi cho trước lực dẫn động gầu, cho phép xác định được chiều sâu ấn gầu theo từng loại vật liệu, cụ thể: khi chọn công suất dẫn động gầu là $5,41\text{kN}$ cân bằng với lực cản tổng cộng thì chiều sâu ấn gầu tương ứng là $0,2\text{m}$, $0,18\text{m}$ và $0,15\text{m}$. Kết quả này cho phép người vận hành lựa chọn chiều sâu ấn gầu theo vật liệu bốc xúc để tăng nhanh khả năng tích vật liệu vào gầu.

*** Khảo sát sự ảnh hưởng của chiều rộng gầu và độ sâu ấn gầu đến lực cản đào**

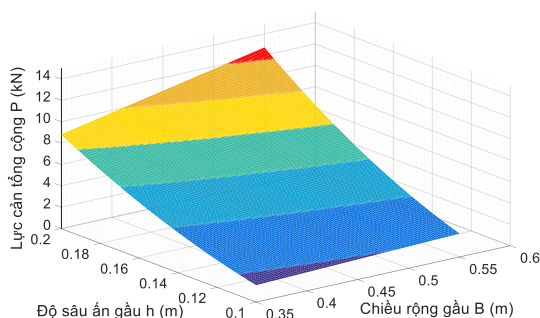
Chọn góc ma sát trong của vật liệu $\rho = 45^\circ$, các thông số còn lại theo bộ số liệu đầu vào. Thay đổi

chiều rộng B từ giá trị $B_{min}=0,35m$ đến giá trị $B_{max}=0,55m$, chiều sâu ấn gầu từ giá trị $h_{min}=0,1m$ đến giá trị $h_{max}=0,2m$. Kết quả nhận được theo đồ thị Hình 7.

Nhận xét:

- Về quy luật: khi tăng đồng thời cả B và h , lực cản tổng cộng tăng và có tốc độ tăng nhanh ở vùng B và h có giá trị lớn. Điều này là phù hợp vì hai yếu tố này, trong đó có yếu tố h càng làm gia tăng tốc độ tăng của lực cản.

- Về giá trị: khi cho trước vật liệu có $\rho = 45^\circ$, lực cản tổng cộng nhỏ nhất ứng với $B=0,35m$ và $h=0,1m$ và có giá trị là 1,58kN, lực cản tổng cộng lớn nhất ứng với $B=0,55m$ và $h=0,2m$ và có giá trị là 12,72kN. Điều này cho thấy nếu tăng B lên 1,6 lần, h lên 2 lần thì lực cản tổng cộng tăng 8,05 lần, nghĩa là tốc độ tăng lực cản rất nhanh khi tăng cả hai yếu tố B và h . Như vậy, khi cho trước vật liệu cần bốc xúc, để giảm sự tăng nhanh của lực cản tổng cộng thì chỉ nên chọn sự tăng của một trong hai yếu tố này hoặc chọn vùng B và h có giá trị của nhỏ hoặc trung bình để tốc độ tăng không nhanh.



Hình 7. Ảnh hưởng của chiều rộng gầu và độ sâu ấn gầu đến lực cản đào

4. Kết luận

Bài báo đã xây dựng được mô hình tính toán lực cản đào của máy bốc xúc khi tương tác với đá sau nổ mìn (môi trường hạt rời) bằng lý thuyết cân bằng giới hạn và mô hình tính toán của gầu ngoạm. Từ đó xác định và khảo sát một số yếu tố ảnh hưởng đến lực cản đào khi máy làm việc, đồng thời đưa ra được một số nhận xét về quy luật và giá trị theo các trường hợp khảo sát đồng thời của hai yếu tố như ở mục 3, cụ thể là: Sự thay đổi đồng thời của B và ρ , sự thay đổi đồng thời của h và ρ , sự thay đổi đồng thời của B và h . Như vậy, nếu cho trước lực dẫn động lớn nhất của gầu (với một máy bốc xúc cụ thể) và một loại vật liệu cần bốc xúc thì có thể lựa chọn được chiều rộng gầu hoặc chiều sâu ấn gầu phù hợp, cũng như

khuyến cáo chọn vùng có chiều rộng gầu và chiều sâu ấn gầu phù hợp để giảm sự gia tăng của lực cản tổng cộng.

Kết quả đạt được thể hiện đây là phương pháp tiếp cận có cơ sở khoa học và chưa được đề cập nhiều đối với máy bốc xúc. Kết quả tính toán làm cơ sở cho việc nghiên cứu động lực học ngược và động lực học hệ thống thủy lực dẫn động bộ công tác khi máy bốc xúc làm việc trong điều kiện không gian chật hẹp được giới hạn bởi hai thành hầm và nóc hầm. Đồng thời, kết quả nghiên cứu cũng mang ý nghĩa thực tiễn phục vụ cho việc tính toán, thiết kế, chế tạo bộ công tác theo nhiệm vụ của đề tài “Nghiên cứu thiết kế, chế tạo thiết bị bốc xúc sử dụng động cơ điện cho thi công đường hầm khẩu độ nhỏ” đang được triển khai.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Xuân Trọng (2010), *Thi công hầm và công trình ngầm*, Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội.
- [2] J. Chen et al. (2018), *Digging performance characterization for hydraulic excavator considering uncertainty during digging operation*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science.
- [3] N. Bennett et al. (2016), *Integration of digging forces in a multi-body-system model of an excavator*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, Vol.230(2), pp.159-177.
- [4] Nguyễn Việt Tân (2010), *Xác định các thông số tối ưu của gầu xúc máy bốc xúc sử dụng trong thi công đường hầm khẩu độ vừa và nhỏ*, Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Hà Nội.
- [5] Живейнов Н.Н. (1995), *Копание грунтов ковшами гидравлических экскаваторов*, Москва.
- [6] Таубер Б.А. (1967), *Грейферные механизмы*, Машиностроение, Москва.

Ngày nhận bài:	10/03/2025
Ngày nhận bản sửa:	19/03/2025
Ngày duyệt đăng:	24/03/2025