

Tính toán mô phỏng dòng chảy hai pha rắn – lỏng trong bơm ly tâm

Bùi Minh Hoàng^{1,*}, Nguyễn Duy Chính¹

¹ Trường Đại học Mỏ - Địa chất

TÓM TẮT

Dòng chảy hai pha rắn-lỏng trong bơm ly tâm rất phức tạp, phương pháp tính toán thiết kế thủy lực cho bơm ly tâm hai pha vẫn còn nhiều điểm chưa được làm sáng tỏ. Có hai vấn đề chính cần lưu ý của bơm ly tâm hai pha rắn-lỏng là hiệu suất thấp và mài mòn nghiêm trọng. Trong bài báo này nhóm tác giả nghiên cứu, dòng chảy hai pha rắn-lỏng, chuyển động dừng, không nén, trong bơm ly tâm với số vòng quay đặc trưng thấp bằng phương pháp số. Được phân tích bằng cách sử dụng mô hình rối RKE, $k - \varepsilon$, trong đó ảnh hưởng của nồng độ thể tích pha rắn đến hiệu suất của bơm được nghiên cứu một cách chi tiết. Các kết quả mô phỏng cho thấy rằng các đặc tính pha rắn trong dòng chảy hai pha, đặc biệt là nồng độ phần trăm pha rắn trong hỗn hợp, đường kính trung bình của hạt rắn có ảnh hưởng lớn đến hiệu suất của bơm. Cột áp và hiệu suất của bơm giảm khi đường kính hoặc phần trăm pha rắn tăng. Mất hút của cánh bánh công tác bị mài mòn nghiêm trọng hơn nhiều so với mặt đáy. Kết quả thu được sơ bộ cho thấy các đặc tính của dòng chảy hai pha rắn lỏng trong bơm ly tâm, giúp ích cho việc cải tiến và điều chỉnh thực nghiệm trong tính toán thiết kế thủy lực bơm ly tâm.

Từ khóa: Dòng hai pha; xỉ than; bơm hai pha.

1. Đặt vấn đề

Bơm ly tâm được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống vận chuyển bùn và có chi phí tiết kiệm hơn vận chuyển bằng xe tải hoặc băng tải. Vận chuyển hỗn hợp bùn bằng bơm ly tâm thường được dùng để nạo vét kênh dẫn nước, san lấp mặt bằng cho mục đích xây dựng, khai thác mỏ, vận tải tro xỉ trong các nhà máy nhiệt điện,... Hiệu suất hoạt động của bơm ly tâm sử dụng trong vận chuyển bùn phụ thuộc lớn vào việc thiết kế bơm và các đặc tính của hỗn hợp hai pha mà bơm vận chuyển. Nghiên cứu một cách bài bản có hệ thống dòng chảy hai pha lỏng rắn trong bơm và ảnh hưởng của kích thước hạt rắn đến tính chất dòng chảy là cơ sở quan trọng để thiết kế và nâng cao hiệu suất hoạt động của bơm trong hệ thống vận chuyển dòng hai pha.

Nghiên cứu, phân tích dòng chảy hai pha trong bài toán thực tế chủ yếu được thực hiện bằng cách sử dụng phương pháp số (CFD). Trong phương pháp số các hạt rắn trong hỗn hợp thường được coi như một môi trường giả chất lỏng, quỹ đạo chuyển động của các hạt tìm được bằng cách giải phương trình đặc trưng của mô hình dòng chảy nhiều pha [1]. Phương pháp này đã được sử dụng rộng rãi trong nhiều bài toán kỹ thuật do độ chính xác cao, chi phí thấp của nó trong tính toán phân tích dòng chảy nhiều pha. Tính toán mô phỏng dòng chảy nhiều pha có thể dễ dàng thực hiện nhờ sử dụng các phần mềm CFD thương mại có sẵn. Điều này được thể hiện rõ ràng trong các bài báo nghiên cứu về dòng hai pha chất lỏng rắn trong máy cánh dẫn [2], [3], các bài báo đó có đóng góp đáng kể vào việc thiết kế hiệu quả hơn bơm hai pha rắn lỏng. Tuy nhiên, trong phương pháp CFD cũng có những hạn chế nhất định do sự xấp xỉ gần đúng của hạt rắn, và sự không liên tục trong quá trình chuyển động của các hạt rắn. Ảnh hưởng của đặc tính của hạt như vật liệu, hình dạng và kích thước không thể được tính toán chính xác bằng cách sử dụng phương pháp.

2. Mô hình và phương pháp tính toán

2.1. Công cụ và phương pháp mô hình mô phỏng

Nghiên cứu sử dụng phần mềm Ansys-Fluent [4] cho mô phỏng dòng chảy hai pha lỏng-rắn trong bơm ly tâm. Mô phỏng dòng nhiều pha được thực hiện theo mô hình mô hình DDPM (Dense Discrete Phase Model) cho dòng nhiều pha nồng độ cao. Mô hình DDPM dựa trên phương pháp Euler-Lagrange cho dòng nhiều pha được cải tiến từ mô hình DPM (Discrete Phase Model).

Dạng tổng quát của các phương trình bảo toàn khối lượng và động lượng được cho bởi các phương trình (1) và (2) dưới đây:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_{DPM} + S_{other} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho \cdot \vec{g} + \vec{F}_{DPM} + \vec{F}_{other} \quad (2)$$

trong đó:

ρ - mật độ;

\vec{v} - véc tơ vận tốc;

S_{DPM} - khối lượng được thêm vào pha liên tục từ pha phân tán;

S_{other} - khối lượng thêm vào khác;

p - áp suất;

τ - ứng suất;

\vec{g} - véc tơ lực trọng trường;

\vec{F}_{DPM} - lực tác dụng lên pha liên tục từ pha phân tán;

\vec{F}_{other} - lực khác.

Đơn vị: sử dụng hệ thống đơn vị chuẩn quốc tế SI

Mô hình DPM chỉ phù hợp với các bài toán có nồng độ pha rắn nhỏ hơn 10%. Để vượt qua giới hạn này của mô hình DPM, trong mô hình DDPM, tỷ phần thể tích của các pha riêng biệt được tính đến bằng cách mở rộng phương trình (1) và (2) tới hệ các phương trình được viết cho từng pha p như sau:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_p) = \sum_{q=1}^{npha} (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq}) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p \vec{v}_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_p \vec{v}_p) = & -\alpha_p \nabla p + \nabla \cdot [\alpha_p \mu_p (\nabla \vec{v}_p + \nabla \vec{v}_p^T)] + \alpha_p \rho_p \vec{g} + \vec{F}_{vm, lift, user} \\ & + \sum_{q=1}^{npha} (\vec{K}_{qp} (\vec{v}_q - \vec{v}_p) + \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp} - \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq}) + K_{DPM} (\vec{v}_{DPM} - \vec{v}_p) + S_{DPM, other} \end{aligned} \quad (4)$$

trong đó:

α - tỷ phần pha;

μ_q - độ nhớt của pha q ;

p, q - các chỉ số dưới, để chỉ các pha khác nhau;

\dot{m}_{qp} - đặc trưng cho tốc độ chuyển khối lượng từ pha q sang pha p ;

\dot{m}_{pq} - đặc trưng cho tốc độ chuyển khối lượng từ pha p sang pha q ;

K - hệ số trao đổi động lượng giữa các pha;

$\vec{F}_{vm, lift, user}$ - hợp lực của trọng lực ảo, lực nâng và ngoại lực;

\vec{v}_{pq} - vận tốc tương đối giữa các pha;

$S_{DPM, other}$ - tổng khối lượng được thêm vào pha liên tục từ pha phân tán;

Các số hạng trao đổi động lượng (ký hiệu DPM) được tính đến chỉ với các phương trình cho pha chính.

2.2. Mô hình tính toán

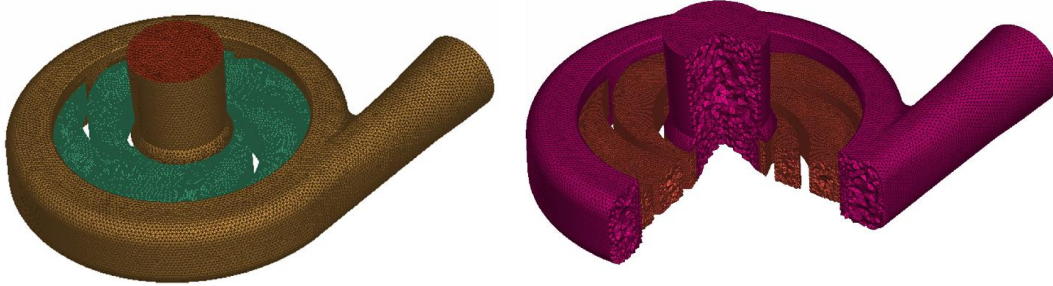
Mô hình tính toán là bơm ly tâm một cấp với các thông số thiết kế như sau: Lưu lượng $Q = 200 \text{ m}^3/\text{h}$, cột áp $H = 54 \text{ mH}_2\text{O}$, và tốc độ quay $n = 1450 \text{ v/phút}$. Các thông số hình học chính được thể hiện trong Bảng 1, cánh bánh công tác có dạng cánh trụ [5]:

Bảng 1. Các thông số cơ bản của bơm mô hình

Đường kính mép vào bánh công tác D1 (mm)	Đường kính mép ra bánh công tác D2 (mm)	Chiều rộng máng dẫn của bánh công tác tại cửa vào b1 (mm)	Chiều dày lá cánh δ (mm)
140	400	60	15
Góc đặt cánh mép vào β_1	Góc đặt cánh mép ra β_2	Chiều rộng máng dẫn của bánh công tác tại cửa ra b2 (mm)	Số lá cánh Z
28	34	60	5

2.3. Chia lưới miền không gian tính toán

Phần không gian khảo sát bao gồm phần tĩnh và phần không gian động, trong bài báo này miền không gian khảo sát được mô hình hóa bằng lưới tứ diện không cấu trúc. Để tính hiệu suất của bơm, số lượng lưới dùng trong các tính toán là 1.300.118. Số lưới không đủ lớn để mô phỏng dòng chảy trong lớp biên, nhưng nó có thể được sử dụng để dự đoán tương đối chính xác hiệu suất của bơm ở bên ngoài lớp biên và bắt được các hiện tượng cơ bản của dòng chảy.



Hình 1. Miền không gian sau khi chia lưới

2.4. Phương pháp tính

Mô phỏng rối được thực hiện theo mô hình RKE (Realizable $k - \epsilon$). Quá trình tính toán, mô phỏng dòng chảy được lặp lại cho đến khi hội tụ với một bước thời gian nhất định ($t=10^{-3}s$). Các mô phỏng xác định vị trí tức thời, biến thiên vận tốc mỗi hạt rắn.

2.5. Điều kiện tính toán

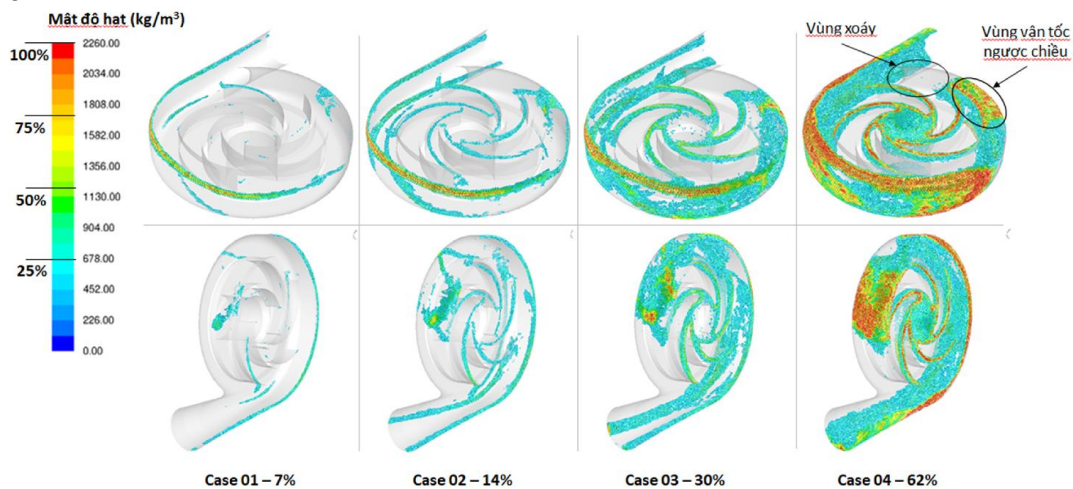
Các điều kiện tính toán sau đây nhằm khảo sát ảnh hưởng của một số yếu tố của pha rắn đến đặc tính của bơm gồm:

- Để khảo sát ảnh hưởng của đường kính hạt, các trường hợp mô phỏng được thực hiện với đường kính hạt lần lượt là 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm với phần trăm pha rắn là 33% và khối lượng riêng 2260 kg/m³ [6];
- Để khảo sát ảnh hưởng của nồng độ thể tích pha rắn, các trường hợp mô phỏng được thực hiện khi nồng độ phần trăm pha rắn lần lượt là 7%, 14%, 30%, 62%, giả sử rằng đường kính là 2 mm và khối lượng riêng là 2260 kg/m³;

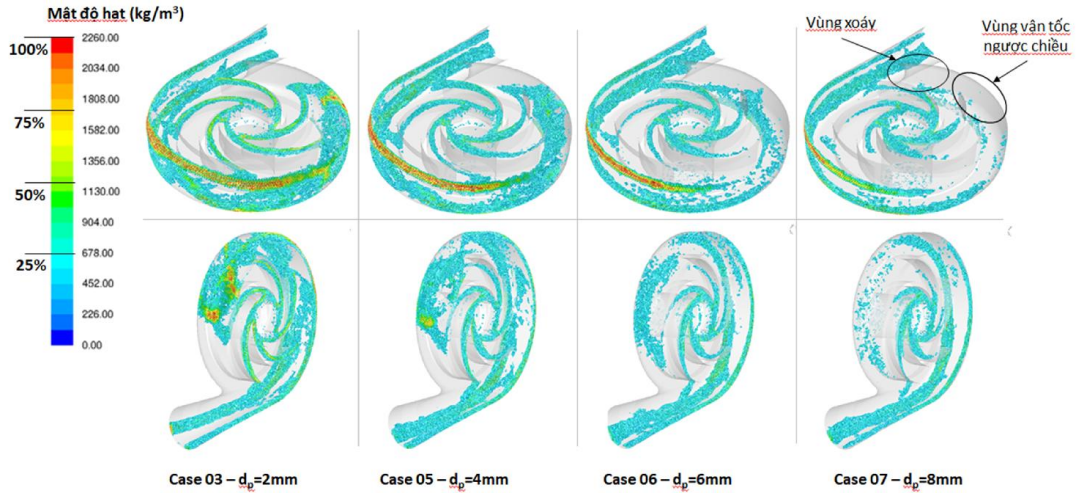
3. Phân tích kết quả

3.1. Ảnh hưởng của các đặc tính hạt tới quỹ đạo chuyển động pha rắn trong bơm

Hình 2 cho thấy các kết quả mô phỏng số phù hợp với kết quả thực nghiệm. Các giá trị cột áp được tính toán bằng mô phỏng số nhỏ hơn các giá trị thực nghiệm khi lưu lượng dòng chảy hoạt động thấp hơn giá trị định mức.



Hình 2. Ảnh hưởng nồng độ tới phân bố hạt trong buồng xoắn bánh công tác

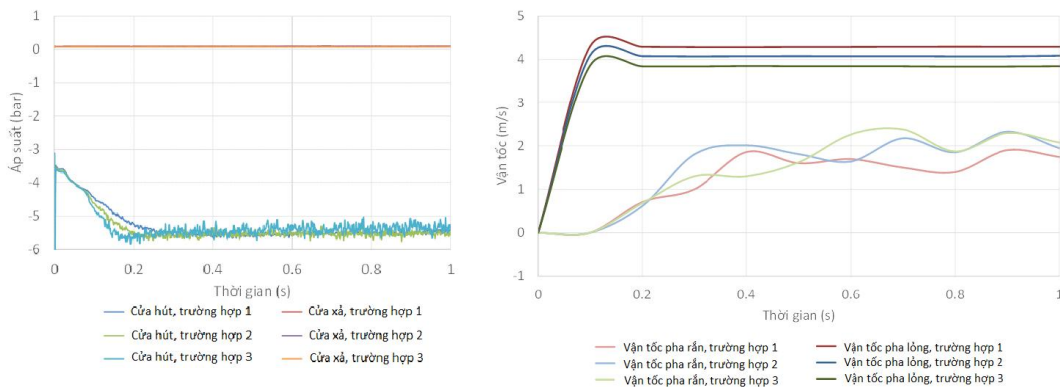


Hình 3. Ảnh hưởng kích hạt tới phân bố hạt trong buồng xoắn bánh công tác

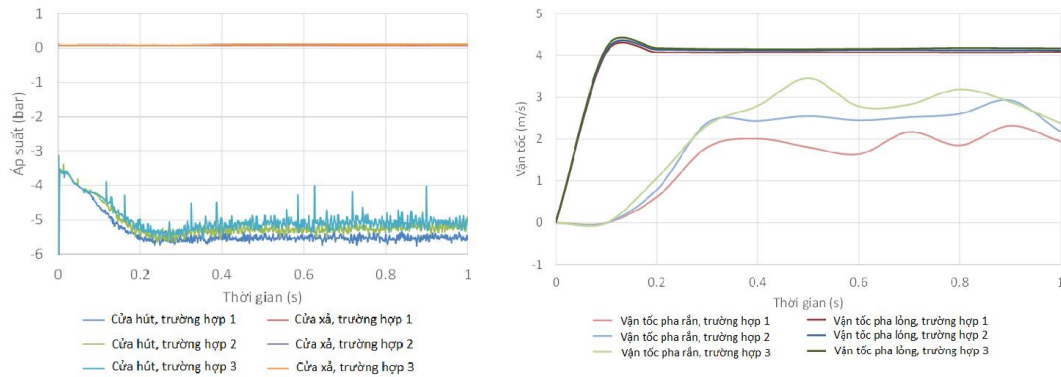
Hình 2 và Hình 3 cho thấy phân bố và quỹ đạo của các hạt rắn bên trong bơm trong những thời điểm khác nhau trong quá trình mô phỏng. Các phần tính toán của ống hút và ống đẩy được bỏ qua để thể hiện rõ ràng sự phân bố của các hạt rắn xung quanh các cánh của bánh công tác và vỏ bơm. Phân bố của các hạt rõ ràng cho thấy phần trăm khối lượng pha rắn trong hỗn hợp tăng dần trong khoảng thời gian $t \leq 0,2s$. Sau đó, các hạt rắn có xu hướng phân bố đồng đều hơn trong phần ống hút của bơm, và đi vào cánh bánh công tác dọc theo các mặt đáy của cánh bánh công tác. Từ các hình ảnh minh họa trên có thể thấy các hạt có khuynh hướng duy trì quỹ đạo ổn định trong suốt dòng chảy theo hướng tiếp tuyến với biên dạng cánh của bánh công tác. Các hạt cũng có khuynh hướng lắng đọng dọc theo tường ngoài của buồng xoắn và di chuyển xuôi xuống đầu ra. Nhìn chung, quỹ đạo của hạt không có sự sai lệch nhiều giữa các trường hợp được khảo sát.

3.2. Ảnh hưởng của các đặc tính của hạt tới tổn thất áp suất đầu ra của bơm

Ảnh hưởng của đặc tính của hạt đối với vận tốc và áp suất tổng tại đầu vào bánh công tác ở phần trung tâm được thể hiện trong hình vẽ. Hình 4,5 cho thấy sự phân bố của vận tốc tuyệt đối và áp suất tổng là rất giống nhau trong các trường hợp mô phỏng. Cả hai đều có các đặc điểm dao động có chu kỳ xấp xỉ nhau do sự bố trí hình học của cánh bánh công tác và đạt cực đại tại mép thoát của cánh bánh công tác. Trong khi đó, cả hai đều không đối xứng do ảnh hưởng của hình dáng cánh bánh công tác, và đạt giá trị cực tiểu gần đầu vào cánh bánh công tác, từ đó có thể kết luận rằng biên dạng cánh bánh công tác đóng một vai trò quan trọng với dòng chảy bên trong bánh công tác.



Hình 4. Ảnh hưởng nồng độ hạt đến phân bố áp suất và vận tốc trong bơm
(Kết quả áp suất của bơm sinh ra ứng với nồng độ 7% là 5.61 bar, nồng độ 14% là 5.58 bar và nồng độ 30% là 5.45bar)



Hình 5. Ảnh hưởng kích thước của hạt đến phân bố áp suất và vận tốc trong bơm
(Kết quả áp suất của bơm sinh ra ứng với đường kính hạt 2mm là 5.41 bar, 4mm là 5.25 bar và 6mm là 5.08 bar)

Hình 4 và Hình 5 cho thấy vận tốc tuyệt đối của pha rắn có xu hướng tăng khi nồng độ hạt tăng. Ngược lại, áp suất tổng giảm khi nồng độ tăng.

4. Kết luận và trao đổi

Dựa trên kết quả mô phỏng, nghiên cứu đưa ra một số nhận xét sau:

- Nồng độ hạt, đường kính hạt là những thông số rất quan trọng ảnh hưởng đến hiệu suất thủy lực của bơm ly tâm vận chuyển hỗn hợp hai pha rắn lỏng.
- Cả cột áp và hiệu suất bơm giảm với sự gia tăng của đường kính hạt hoặc nồng độ phần trăm pha rắn.
- Cấu trúc dòng chảy thay đổi là tính năng rõ ràng nhất ở đuôi cánh bánh công tác, và nó trở nên rõ ràng hơn khi nồng độ phần trăm pha rắn trong hỗn hợp tăng lên.
- Bánh công tác là phần chính bị mài mòn khi bơm vận chuyển dòng hai pha rắn, lỏng. Các mặt hút của cánh bánh công tác bị mài mòn nghiêm trọng và các mặt đẩy chịu bị mài mòn nhẹ chủ yếu ở vùng đuôi.

Cần mở rộng khảo sát ảnh hưởng của các yếu tố trên tới hiệu suất, độ mòn hỏng tại bánh công tác, ... để tối ưu hóa thiết kế bơm ly tâm vận tải dòng hỗn hợp hai pha rắn – lỏng.

Tài liệu tham khảo

1. CAI Baoyuan. Theory and design of two-phase flow centrifugal pump[J], Kexue Tongbao, 1984, 29(3): 407-414.
2. Medvitz R. B., Kunz R. F., Boger D. A., Pauley L. L. (2002), Performance analysis of cavitating flow in centrifugal pumps using multiphase CFD, *ASME Journal of Fluids Engineering*, 124, (2), pp. 377-383.
3. Liu J., Li Z., Wang L., Jiao L. (2011), Numerical simulation of the transient flow in a radial flow pump during stopping period, *ASME Journal of Fluids Engineering*, 133,(11), pp.101-111.
4. ANSYS, Inc. (2009), Ansys Fluent 12.9 – Theore Guide.
5. Bùi Minh Hoàng, Nguyễn Thế Mịch, Nguyễn Duy Chính. Mô phỏng số cho dòng hai pha rắn - lỏng trong bơm ly tâm bằng mô hình DDPM. *Tập 3 - Cơ học Thủy khí, Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ X, Hà Nội*, 12/2017.
6. Vũ Thành Lâm, Lê Đức Nguyên, Phạm Trung Nguyên, Dương Đức Hải, 2016. Nghiên cứu lựa chọn vật liệu chén lò tro, xi nhà máy nhiệt điện, đá thải và bã sàng làm vật liệu chén lò trong các mô than hầm lò thuộc TKV. *Tuyển tập báo cáo Hội nghị KHKT Mô toàn quốc lần thứ XXV*.

ABSTRACT

Numerical Simulation and Analysis of Solid-Liquid Flow in Centrifugal Pump

Hoang Bui Minh¹, Chinh Nguyen Duy¹
¹ *Hanoi University of Mining and Geology*

The flow with solid-liquid two-phase media inside centrifugal pumps is very complicated and the relevant method for the hydraulic design is still immature so far. There exist two main problems in the operation of the two-phase flow pumps, i.e., low overall efficiency and severe abrasion. In this study, the three-dimensional, steady, incompressible, and turbulent solid-liquid two-phase flows in a low-specific-speed centrifugal pump are numerically simulated and analyzed by using a computational fluid dynamics (CFD) code based on the mixture model of the two-phase flow and the RKE k- ϵ two-equation turbulence model. The simulation results predicted indicate that the solid phase properties in two-phase flow, especially the concentration, the particle diameter, have strong effects on the hydraulic performance of the pump. Both the pump head and the efficiency are reduced with increasing particle diameter or concentration. However, the effect of particle density on the performance is relatively minor. An obvious jet-wake flow structure is presented near the volute tongue and becomes more remarkable with increasing solid phase concentration. The suction side of the blade is subject to much more severe abrasion than the pressure side. The obtained results preliminarily reveal the characteristics of solid-liquid two-phase flow in the centrifugal pump, and are helpful for improvement and empirical correction in the hydraulic design of centrifugal pumps.

Keywords: Two-phase flow; coal ash; two-phase flow pump