

Mô phỏng số dòng chảy qua trụ tròn với 2 bộ điều khiển xoay có dạng chữ thập được đặt phía sau

Numerical Simulation of Flow through a Circular Cylinder with 2 Rotating Controllers having Crucial-Shape Placed behind

Phan Đức Huỳnh, Nguyễn Trần Bá Đình*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh

Số 1 Võ Văn Ngân, Linh Chiểu, Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Đến Tòa soạn: 29-7-2019; chấp nhận đăng: 25-9-2020

Tóm tắt

Khi cho dòng chảy của một lưu chất với hệ số $Re \geq 47$ qua một kết cấu nhất định thì chúng sẽ tương tác lẫn nhau. Điều này có thể gây ra hiện tượng dao động và dẫn đến phá hủy kết cấu do sự tác động của dòng chảy gây ra. Một trong những kỹ thuật để làm giảm dao động của kết cấu là sử dụng các hệ thống phụ để thay đổi cấu trúc dòng chảy. Trong nghiên cứu này, phương pháp biên nhúng được áp dụng để khảo sát sự hiệu quả của việc điều khiển dòng chảy qua trụ tròn bằng cách đặt 2 bộ điều khiển xoay có dạng chữ thập. Kết quả cho thấy lực nâng và lực cản tác dụng lên trụ tròn giảm đáng kể khi tốc độ quay của 2 chữ thập tăng dần. Ngoài ra, ảnh hưởng từ vị trí đặt 2 chữ thập đến hệ số cản và hệ số nâng cũng được khảo sát. Từ kết quả thu được, có thể kết luận rằng: 2 chữ thập xoay có thể loại bỏ hoàn toàn dòng xoáy và làm ổn định dòng chảy nếu vị trí đặt và tốc độ quay của chúng hợp lý.

Từ khóa: điều khiển dòng chảy, phương pháp biên nhúng, xoáy, trụ tròn, chữ thập xoay.

Abstract

When a fluid with coefficient $Re \geq 47$ flows through a certain structure, they will interact with each other. This can cause oscillation and lead to the destruction of a structure due to the flow effects. One of the techniques to reduce structural vibration is to use sub-systems to change the flow structure. In this research, the immersed boundary method is applied to investigate the effect of controlling flow through a circular cylinder by placing two rotating controllers with crucial shape. The results showed that the lift force and drag force acting on the circular cylinder are significantly decreased. Besides, the influence from the placing position of 2 crucial to the drag coefficient and lift coefficient is also investigated. From the results, it can be concluded that 2 rotating crucial can eliminate the vortex and stabilize the flow if their position and rotating speed are reasonable.

Keywords: control flow, immersed boundary method, vortex, circular cylinder, rotating crucial.

1. Giới thiệu

Khảo sát dòng chảy qua vật thể là một trong những bài toán cơ bản của cơ học lưu chất. Như đã biết, khi hệ số $Re \geq 47$ dòng chảy sẽ dẫn xuất hiện các xoáy có chu kỳ ở phía sau kết cấu. Nó gây nên sự rung động và có thể dẫn đến phá hủy kết cấu. Hiện tượng này thường rất hay gặp trong thực tế. Do đó, việc nghiên cứu các kỹ thuật để làm giảm dao động và triệt tiêu các xoáy hình thành phía sau vật thể đóng vai trò rất quan trọng trong các ứng dụng thực tế.

Các kỹ thuật điều khiển được phát triển trước đây được sử dụng chủ yếu trong cơ chế bị động hoặc các dạng vòng lặp hở. Hầu hết chúng đều tập trung vào việc sử dụng các hệ thống phụ để thay đổi cấu trúc của dòng chảy. Các nghiên cứu nổi bật có thể kể đến như: sử dụng tấm phẳng điều khiển Kwon và Choi

(1996) [1], sử dụng trụ tròn điều khiển Wu và cộng sự (2012) [2].

Ban đầu, các nghiên cứu đều tập trung vào việc khảo sát ảnh hưởng của các kết cấu phụ có kích thước nhỏ được đặt cố định tại phía sau vật thể đến các đặc điểm khí động học, kết cấu của dòng xoáy. Mittal và Raghuvanshi (2001) [3] đã tiến hành nghiên cứu số ảnh hưởng việc đặt một trụ tròn nhỏ cố định tại phía sau của trụ tròn chính với hệ số Re từ 60 đến 100. Từ kết quả thu được, họ chỉ ra rằng: việc đặt trụ tròn nhỏ phía sau trụ tròn chính có thể làm giảm lực cản, lực nâng và cả hệ số *Strouhal*.

Một hướng nghiên cứu khác nhằm thay đổi cấu trúc dòng chảy là cho kết cấu của vật thể có thể xoay với một tốc độ quay không đổi. Badr và cộng sự (1990) [4] đã thực nghiệm cho dòng chảy với hệ số $Re = 1000$ qua một trụ tròn xoay với tốc độ quay $\alpha = 3$ không đổi. Mittal và Kumar [5] đã tiến hành mô phỏng số dòng chảy qua một trụ tròn xoay với tốc

*Địa chỉ liên hệ: Tel: (+84) 358642971

Email: badinhstar@gmail.com

độ quay α thay đổi trong khoảng từ 0 đến 5. Các nghiên cứu của họ đều cho thấy việc cho trụ tròn quay cường bức với tốc độ góc không đổi có thể triệt tiêu hoàn toàn dòng xoáy nhưng lại phụ thuộc rất lớn vào tốc độ quay của trụ tròn.

Gần đây, các nghiên cứu dần tập trung vào việc thay đổi cấu trúc dòng chảy bằng cách sử dụng nhiều trụ tròn xoay với tốc độ quay không đổi. Vị trí đặt các trụ tròn này thường được sắp xếp đối xứng nhau nhưng có chiều quay ngược nhau (Schulmeister và cộng sự (2017) [6]; Dehkordi và cộng sự (2018) [7]). Các kết quả điều chỉ ra rằng, việc đặt 2 trụ tròn nhỏ đối xứng và quay ngược chiều nhau có thể loại bỏ hoàn toàn dòng xoáy nhưng việc triệt tiêu xoáy chịu ảnh hưởng rất lớn bởi vị trí đặt cũng như tốc độ quay của trụ tròn.

Trong nghiên cứu hiện tại, phương pháp biên nhúng được sử dụng để mô phỏng dòng chảy của lưu chất qua một trụ tròn với 2 bộ điều khiển xoay có dạng chữ thập được đặt phía sau. Ảnh hưởng của vị trí đặt cũng như tốc độ quay của 2 chữ thập lên dòng chảy của lưu chất sẽ được khảo sát.

2. Xác định vấn đề

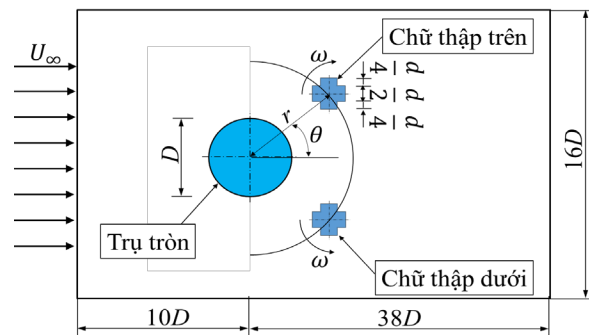
Mô hình bài toán được xây dựng cho một kết cấu chính có dạng trụ tròn và 2 chữ thập quay ngược chiều nhau với tốc độ góc ω , và được đặt đối xứng nhau qua trục đối xứng nằm ngang đi qua tâm của trụ tròn. Vị trí của 2 chữ thập được xác định bằng giá trị của góc θ và bán kính r như Hình 1. Góc θ_f được thay đổi trong phạm vi từ 10° đến 90° và bán kính không thứ nguyên $r_D = r / D$ thay đổi trong khoảng từ 0,8 đến 1,4 (D là đường kính trụ tròn). Các kích thước của chữ thập thì tỉ lệ với giá trị của hệ số $d = 0,2D$ có thể quan sát được trong Hình 1. Tốc độ quay $\alpha = \omega D / 2U_\infty$ của 2 chữ thập được thay đổi trong khoảng từ 0 đến 6. Trong bài báo này, phương

pháp biên nhúng được sử dụng để mô phỏng dòng chảy của lưu chất qua một trụ tròn và 2 chữ thập quay ngược chiều nhau trong chế độ dòng chảy bất ổn định với giá trị hệ số $Re = 200$.

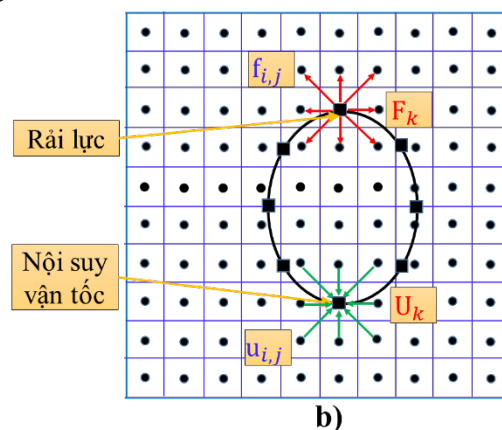
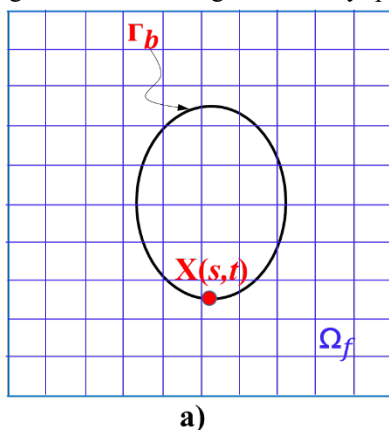
3. Phương pháp số

3.1. Rời rạc hóa không gian và thời gian

Phương pháp biên nhúng là một phương pháp sai phân hữu hạn Eulerian-Lagrangian hỗn hợp để tính toán sự tương tác giữa dòng chảy của lưu chất với kết cấu. Xem xét bài toán với mô hình của một lưu chất nhớt, không nén được trong một miền hai chiều $\Omega_f = [0, l_x] \times [0, l_y]$ chứa một biên nhúng dưới dạng một đường cong khép kín đơn giản Γ_b (Hình 2a). Ta thiết lập trong mô hình 2D với một đường cong biên nhúng được thể hiện như trong Hình 2b. Trong đó, lưới Lagrangian biểu thị cho kết cấu và lưới Eulerian biểu thị cho miền lưu chất. Trong bài báo này, phương pháp phân đoạn thời gian được sử dụng để giải các phương trình chủ đạo của lưu chất theo từng bước thời gian.



Hình 1. Sơ đồ của một hình trụ tròn với 2 chữ thập xoay được đặt phía sau.



Hình 2. a) Mô hình của hệ lưu chất - biên nhúng; b) Mô hình cách chia lưới (lưới Eulerian (•) và lưới Lagrangian (■)) và phương pháp giải.

3.2. Xử lý miền kết cấu

Do 2 chữ thập quay đều với tốc độ góc ω không đổi nên theo từng bước thời gian thì việc cập nhật vị trí có thể được thực hiện theo phương trình sau:

$$x_n^u = x_c^u + r_u \cos(\varphi_{n-1}^u - \omega dt) \tag{1}$$

$$y_n^u = y_c^u + r_u \sin(\varphi_{n-1}^u - \omega dt) \tag{2}$$

$$x_n^d = x_c^d + r_d \cos(\varphi_{n-1}^d + \omega dt) \tag{3}$$

$$y_n^d = y_c^d + r_d \sin(\varphi_{n-1}^d + \omega dt) \tag{4}$$

trong đó: (x_n^u, y_n^u) , (x_n^d, y_n^d) lần lượt là tọa độ xác định vị trí của 2 chữ thập trên, dưới theo các phương x, y trong hệ tọa độ Eulerian; (x_c^u, y_c^u) , (x_c^d, y_c^d) lần lượt là tọa độ tâm quay của 2 chữ thập trên, dưới theo tọa độ Eulerian; r_u, r_d lần lượt là khoảng cách từ tọa độ vị trí của 2 chữ thập trên, dưới đến tâm quay của chính nó; và $\varphi_{n-1}^u, \varphi_{n-1}^d$ lần lượt là góc hợp bởi đoạn thẳng nối từ tọa độ vị trí của chữ thập trên, dưới đến tâm quay của nó và trục x tại thời điểm thứ $n - 1$.

Tiếp đó, ta xác định giá trị của lực khối tác dụng vào toàn bộ miền lưu chất được xác định theo công thức sau:

$$\mathbf{f}_{i,j}^n = \sum_{k=1}^{N_h} \mathbf{F}_k^n(t) \delta_h(\mathbf{x}_{i,j}^n - \mathbf{X}_{i,j}^n) \Delta s_k \tag{5}$$

trong đó: $\mathbf{f}_{i,j}^n$ là lực khối của biên nhúng tác dụng lên toàn bộ miền lưu chất; \mathbf{F}_k^n là lực khối tại các điểm biên nhúng; $\mathbf{x}_{i,j}^n$ là tọa độ lưới Cartesian; $\mathbf{X}_{i,j}^n$ là tọa độ các điểm biên nhúng trong hệ tọa độ Lagrangian; và $\delta_h(\mathbf{x}) = (1/h^2) \varphi(x/h) \varphi(y/h)$ là hàm Dirac delta hai chiều và φ là hàm liên tục:

$$\phi\left(\frac{x}{h}\right) = \phi\left(\frac{y}{h}\right) = \phi(r) = \begin{cases} (3 - 2|r| + \sqrt{1 + 4|r| - 4r^2})/8, & 0 \leq |r| \leq 1 \\ (5 - 2|r| - \sqrt{-7 + 12|r| - 4r^2})/8, & 1 \leq |r| \leq 2 \\ 0, & 2 \leq |r| \end{cases} \tag{6}$$

Vì biên nhúng là biên đàn hồi nên theo định luật Hooke ta có:

$$\mathbf{F}(s, t) = -k(\mathbf{X}(s, t) - \mathbf{X}^e(s, t)) \tag{7}$$

trong đó k là độ cứng của lò xo liên kết ảo; $\mathbf{X}^e(s, t)$ là tọa độ ban đầu các điểm biên nhúng trong hệ tọa độ Lagrangian. Khi tương tác với dòng lưu chất thì các điểm biên này di chuyển theo dòng lưu chất và có tọa độ mới là $\mathbf{X}(s, t)$.

Sau đó, ta tiến hành giải phương trình Navier-Stokes đã có thành phần lực khối để tìm trường áp suất $p_{i,j}^{n+1}$ và trường vận tốc $\mathbf{u}_{i,j}^{n+1}$ bằng cách sử dụng phương pháp sai phân phần tử hữu hạn. Tiếp đó, trường vận tốc này được nội suy để tìm vận tốc tại các điểm biên nhúng theo phương trình:

$$\frac{d\mathbf{X}_k^{n+1}}{dt} = \sum_{i,j} \mathbf{u}_{i,j}^{n+1} \delta_h(\mathbf{x}_{i,j}^n - \mathbf{X}_k^{n+1}) h^2 \tag{8}$$

3.3. Bộ giải phương trình Navier-Stokes

Trong miền không gian 2 chiều, phương trình Navier-Stokes cho dòng lưu chất nhớt, không nén được đã bao gồm các thành phần ngoại lực được thể hiện theo công thức:

$$\rho \left[\frac{(\mathbf{u}_{i,j}^{n+1} - \mathbf{u}_{i,j}^n)}{\Delta t} + [(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}]_{i,j}^n \right] \tag{9}$$

$$= -\nabla p_{i,j}^{n+1} + \mu(\Delta \mathbf{u}_{i,j}^{n+1}) + \mathbf{f}_{i,j}^n$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_{i,j}^{n+1} = 0 \tag{10}$$

Phương trình (9) và (10) sẽ được giải tại bước thời gian thứ $(n + 1)$ theo 3 bước chính sau.

3.3.1. Xử lý thành phần phi tuyến, độ nhớt, lực khối

Phương trình (9) sẽ được giải bằng cách sử dụng các trường vận tốc trung gian. Các trường vận tốc này được xác định bằng phương trình (11) khi các điều kiện phi tuyến, độ nhớt và lực khối đã được xác định.

$$\frac{(\mathbf{u}^* - \mathbf{u}^n)}{\Delta t} = -(\mathbf{u}^n \cdot \nabla) \mathbf{u}^n + \tag{11}$$

$$+ \left(\frac{\mu}{\rho}\right) (\Delta \mathbf{u}^n) + \left(\frac{1}{\rho}\right) \mathbf{f}^n$$

$$\frac{(\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^*)}{\Delta t} = -\frac{(\nabla p^{n+1})}{\rho} \tag{12}$$

3.3.2. Điều chỉnh áp suất

Hiệu chỉnh trường vận tốc trung gian \mathbf{u}^* bởi gradient của áp suất p^{n+1} , nhân $(\nabla \cdot)$ vào hai vế của phương trình (12) ta được một hệ phương trình tuyến tính.

$$\frac{(\Delta p^{n+1})}{\rho} = \frac{(\nabla \cdot \mathbf{u}^*)}{\Delta t} \tag{13}$$

Phương trình (13) là phương trình Poisson của trường áp suất p^{n+1} tại thời điểm thứ $n + 1$.

3.3.3. Cập nhật trường vận tốc

Trường vận tốc mới \mathbf{u}^{n+1} sẽ được cập nhật theo phương trình: $\mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{u}^* - \Delta t (\nabla p^{n+1}) / \rho$ với giá trị áp suất p^{n+1} đã được tính ở bước phía trên

3.4. Giải thuật của phương pháp biên nhúng

Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng giải thuật tường minh tức là lực khối tại các điểm Lagrangian được tính tại bước đầu tiên. Toàn bộ giải thuật của phương pháp trình bày như sau:

- (1) Cập nhập vị trí của chữ thập trên, dưới theo phương trình (1-4)
- (2) Xác định lực $F^n(s,t)$ từ biên của kết cấu $X^n(s,t)$ theo phương trình (7).
- (3) Áp đặt lực của biên nhúng lên toàn bộ miền lưu chất theo phương trình (5).
- (4) Giải phương trình Navier- Stokes đã có các thành phần ngoại lực.
- (5) Nội suy vận tốc mới của các điểm biên nhúng theo phương trình (8). Quay lại bước (1).

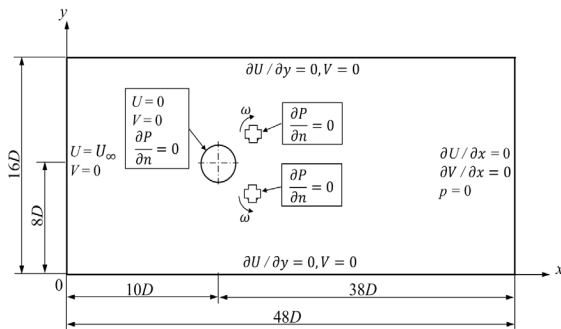
Ngoài ra, để bài toán hội tụ thì sau mỗi bước chạy ta cần phải cập nhập lại giá trị của bước thời gian Δt . Xét trong một miền 2 chiều, giá trị Δt phải đảm bảo đủ nhỏ để mô phỏng duy trì sự ổn định. Để xác định Δt ta cần tìm được giá trị nhỏ nhất giữa điều kiện ổn định khuếch tán

$$\Delta t \leq 0,25.Re. \frac{\min(hx^2, hy^2)}{2} \tag{14}$$

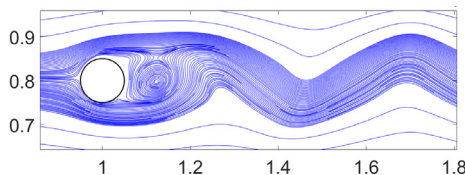
và điều kiện ổn định của phương pháp CFL (Courant-Friedrichs-Lewy)

$$\Delta t \leq \min\left(\frac{hx}{u_{max}}, \frac{hy}{v_{max}}\right) \tag{15}$$

trong đó u, v lần lượt là thành phần vận tốc của miền lưu chất theo phương x, y .



Hình 3. Điều kiện biên cho dòng chảy qua một hình trụ tròn với 2 chữ thập được đặt phía sau (tham khảo [7]).



Hình 4. Mô phỏng tương tác giữa trụ tròn và lưu chất có $Re = 200$.

4. Miền tính toán và điều kiện biên

Miền tính toán và hệ tọa độ cùng với các điều kiện biên được minh họa trong Hình 3. Cụ thể, điều kiện biên Dirichlet với $U_\infty = 1$ và $V = 0$ được đặt tại biên đầu vào; điều kiện biên Neumann với $\partial U / \partial x = 0$ và $\partial V / \partial x = 0$ được đặt với đầu ra; 2 biên mặt bên là biên trượt tự do với $\partial U / \partial y = 0$ và $V = 0$; biên của trụ tròn chính được đặt cố định là biên không trượt ($U = V = 0$); và biên của 2 chữ thập là biên không trượt và quay đều với tốc độ góc ω . Mô hình được mô phỏng trong lưu chất có hệ số $Re = 200$.

5. Kết quả mô phỏng số

5.1. Kiểm tra phương pháp: dòng chảy qua trụ tròn

Để đánh giá một phương pháp số mới nghiên cứu sự tương tác lưu chất và kết cấu có đúng hay là không, ta thường sử dụng phương pháp đó để giải quyết bài toán dòng chảy của lưu chất qua một kết cấu dạng trụ tròn. Các kết quả mô phỏng có thể được quan sát trong Hình 4. Khi dòng chảy của lưu chất đi qua trụ tròn thì các lớp trượt sẽ được tách ra từ cả hai mặt trên và dưới của trụ tròn và cuộn lại tại phía sau trụ tròn hình thành nên các xoáy. Các xoáy này làm cho các lớp trượt của lưu chất bị dao động một cách có tuần hoàn. Hiện tượng này được biết đến như là các xoáy von-Karman.

Mặc khác, để đánh giá được sự tác động của dòng lưu chất lên trụ tròn, ta xem xét đến độ lớn của 2 thông số: hệ số cản, C_D và hệ số nâng, C_L .

$$C_D = \frac{F_D}{0,5\rho U_\infty^2 D} \tag{16}$$

$$C_L = \frac{F_L}{0,5\rho U_\infty^2 D} \tag{17}$$

trong đó F_D và F_L lần lượt là lực cản và lực nâng của dòng lưu chất tác dụng lên trụ tròn.

Ngoài ra, để đánh giá được sự dao động của dòng lưu chất ta có thể xem xét giá trị của hệ số Strouhal, S_t . Với S_t được định nghĩa là một hệ số vô thứ nguyên dùng để mô tả các cơ chế dao động của dòng lưu chất.

$$S_t = \frac{f.D}{U_\infty} \tag{18}$$

trong đó f là tần số xoáy tách ra phía sau kết cấu của hình trụ tròn; D là đường kính của hình trụ tròn; và U_∞ là vận tốc đầu vào.

Từ các kết quả mô phỏng thu được, ta tiến hành so sánh với kết quả đã được công bố trước đó.

Bảng 1. Bảng so sánh kết quả nghiên cứu hiện tại với kết quả nghiên cứu của các tác giả khác.

		Hiện tại	Norouzi và cộng sự [8]	Riahi và cộng sự [9]	Liu và cộng sự [10]	Russell và Wang [11]
Phương pháp nghiên cứu		Phương pháp biên nhúng (IBM)	Phương pháp Thể tích hữu hạn (FVM)	Phần mềm OpenFOAM	Phương pháp sai phân phân tử (FDM)	Phương pháp nhúng không liên tục (EDM)
$Re = 100$	C_D	1,395	1,387	1,35	1,35	1,38
	C_L	0,302	0,298	0,237	0,339	0,3
	S_t	0,163	0,164	0,164	0,165	0,169
$Re = 200$	C_D	1,298			1,31	1,29
	C_L	0,532			0,69	0,5
	S_t	0,191			0,192	0,195

Từ Bảng 1, có thể thấy độ sai lệch của kết quả mô phỏng trong nghiên cứu hiện tại với các nghiên cứu khác là tương đối nhỏ nằm trong khoảng từ 1 % đến 7 %. Trong đó, kết quả thu được gần giống nhất là với nghiên cứu của Russell và Wang [11] do cả 2 nghiên cứu đều sử dụng dạng lưới non-conforming mesh và phương pháp bước thời gian hiện (explicit time-stepping method) để cải thiện độ ổn định của nghiệm.

5.2. Kết quả qua trụ tròn với 2 chữ thập được gắn phía sau

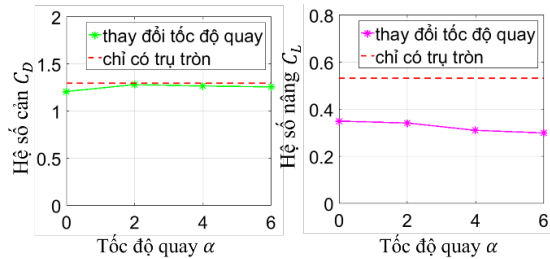
5.2.1. Ảnh hưởng của tốc độ quay của 2 chữ thập

Để xem xét ảnh hưởng của tốc độ quay của 2 chữ thập đến hệ số cản, hệ số nâng của lưu chất tác dụng lên trụ tròn ta sẽ cho các giá trị khác cố định gồm: bán kính đặt $r_D = 0,8$ và góc đặt $\theta = 30^\circ$ cho 2 chữ thập. Từ Hình 5 có thể thấy rằng: khi tăng dần tốc độ quay của 2 chữ thập thì hệ số cản ban đầu có tăng rồi sau đó giảm dần nhưng giá trị của nó luôn nhỏ hơn trường hợp của trụ tròn. Trong khi đó, nếu tăng dần tốc độ quay của 2 chữ thập thì hệ số nâng sẽ liên tục giảm dần và đạt giá trị nhỏ nhất tại $\alpha = 6$ ($C_L = 0,3$ giảm 40,61 % so với trường hợp chỉ có trụ tròn). Điều đó chứng tỏ rằng tốc độ quay của 2 chữ thập càng lớn thì hiệu quả triệt tiêu dòng xoáy càng cao.

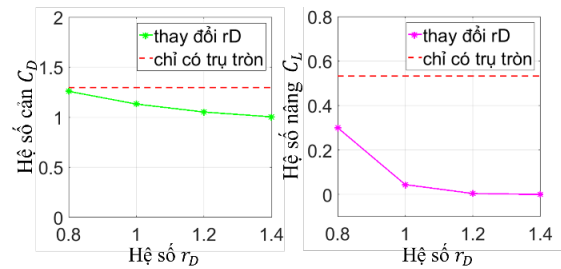
5.2.2. Ảnh hưởng của vị trí đặt 2 chữ thập

Thay đổi bán kính đặt r_D của 2 chữ thập:

Để xem xét ảnh hưởng bán kính đặt r_D của 2 chữ thập đến hệ số cản, hệ số nâng của lưu chất tác dụng lên trụ tròn ta sẽ cho các giá trị khác cố định gồm: tốc độ quay $\alpha = 6$ và góc đặt $\theta = 30^\circ$ cho 2 chữ thập. Các kết quả của mô phỏng có thể được tổng hợp và xem xét trong Hình 6. Khi xem xét Hình 6, dễ nhận thấy rằng: Khi giá trị r_D tăng dần thì cả hệ số cản lẫn hệ số nâng đều giảm dần và cả 2 đạt giá trị nhỏ nhất tại $r_D = 1,4$ ($C_D = 1,0035$ (giảm 22,69% so với trường hợp chỉ có trụ tròn); $C_L = 0,00005$ (giảm 99,991 % so với trường hợp chỉ có trụ tròn)).



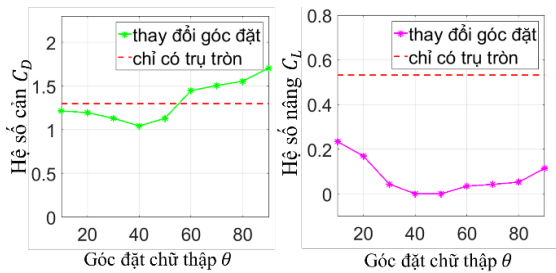
Hình 5. Đồ thị biểu diễn sự thay đổi của hệ số cản và hệ số nâng khi thay đổi tốc độ quay của 2 chữ thập.



Hình 6. Đồ thị biểu diễn sự thay đổi của hệ số cản và hệ số nâng khi bán kính đặt r_D của 2 chữ thập thay đổi.

Thay đổi góc đặt θ của 2 chữ thập:

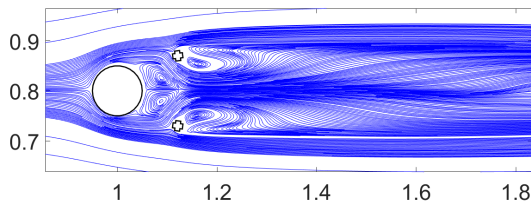
Để xem xét ảnh hưởng của tốc độ quay của 2 chữ thập đến hệ số cản, hệ số nâng của lưu chất tác dụng lên trụ tròn ta sẽ cho các giá trị khác cố định gồm: bán kính đặt $r_D = 1$ và tốc độ quay $\alpha = 6$ cho 2 chữ thập. Các kết quả thu được có thể được quan sát trong Hình 7. Cụ thể: Khi tăng góc θ từ 10° đến 40° hệ số cản giảm dần và đạt giá trị nhỏ nhất tại $\theta = 40^\circ$ ($C_D = 1,0433$ (giảm 19,62 % so với trường hợp trụ tròn)). Nếu tiếp tục tăng góc θ thì hệ số cản tăng dần và có thể vượt qua giá trị của trường hợp trụ tròn. Mặt khác, khi xét đến giá trị của hệ số nâng có thể thấy: Khi tăng góc θ từ 10° đến 50° thì giá trị của hệ số nâng giảm dần và đạt giá trị xấp xỉ bằng không khi $40^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$. Khi đó, nếu tiếp tục tăng θ thì hệ số nâng lại tăng nhưng tổng thể thì luôn nhỏ hơn trường hợp trụ tròn.



Hình 7. Đồ thị biểu diễn sự thay đổi của hệ số cản và hệ số nâng khi góc đặt θ của 2 chữ thập thay đổi.

Tóm lại, vị trí đặt của 2 chữ thập có ảnh hưởng rất lớn đến giá trị của hệ số cản và hệ số nâng. Từ kết quả, có thể xác định vị trí thích hợp của 2 chữ thập nằm trong khoảng $40^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ và $1 \leq r_D \leq 1,4$. Ta có thể gọi khoảng các giá trị này là vùng hiệu quả. Nếu chữ thập đặt trong vùng này thì hiệu quả triệt tiêu xoáy và ổn định dòng chảy là lớn nhất.

Để xem xét tổng thể ảnh hưởng của vận tốc quay và vị trí đặt của 2 chữ thập trong việc thay đổi cấu trúc của dòng chảy ta có thể quan sát kết quả mô phỏng trong Hình 8. Quan sát Hình 8 có thể thấy được, việc đặt 2 chữ thập có chiều quay ngược nhau tại phía sau trụ tròn làm hình thành nên 2 xoáy chính có kích thước xấp xỉ, ngược chiều nhau tại phía sau trụ tròn. Ngoài ra, khi 2 chữ thập quay thì phía sau của chúng cũng hình thành 2 xoáy phụ đối xứng nhau qua mặt phẳng đối xứng nằm ngang đi qua tâm của trụ tròn. Các xoáy này có tác dụng triệt tiêu lẫn nhau, điều đó làm cho dòng chảy của lưu chất trở nên ổn định và loại bỏ hoàn toàn rung động tác dụng lên trụ tròn.



Hình 8. Mô phỏng tương tác giữa trụ tròn với 2 chữ thập được đặt phía sau và lưu chất có $Re = 200$.

6. Kết luận và hướng phát triển

Từ kết quả mô phỏng của mô hình ta thấy rằng: khi cho dòng chảy qua một kết cấu dạng trụ tròn thì các lớp trượt sẽ bị phân tách về 2 phía trên và dưới của hình trụ và chúng cuộn tại tạo nên các xoáy tại bề mặt phía sau của trụ tròn. Các xoáy này làm cho các lớp trượt của lưu chất bị dao động một cách có tuần hoàn. Những dao động này gây nên hiện tượng rung động và có thể phá hủy kết cấu.

Việc đặt 2 chữ thập có chiều quay ngược nhau vào phía sau của trụ tròn có tác dụng triệt tiêu hoàn toàn xoáy và làm ổn định dòng chảy. Mặt khác, kết

quả mô phỏng còn chỉ ra rằng: Khi tốc độ quay của 2 chữ thập càng tăng thì hiệu quả triệt tiêu xoáy càng mạnh. Ngoài ra, nhờ kết quả thu được ta có thể xác định được ảnh hưởng của vị trí đặt 2 chữ thập đến cấu trúc dòng chảy, và tìm ra vùng hiệu quả là tại vị trí $40^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ và $1 \leq r_D \leq 1,4$ thì hiệu quả triệt tiêu xoáy và ổn định dòng chảy là tối ưu nhất.

Từ các kết quả thu được trong nghiên cứu này, trong các nghiên cứu tiếp theo nhóm tác giả sẽ tiến hành thay đổi biên dạng của hệ thống phụ từ hình chữ thập sang một số hình dạng khác và khảo sát ảnh hưởng của chúng để tìm ra biên dạng tối ưu. Ngoài ra, chúng tôi cũng sẽ tiếp tục phát triển một vài hệ thống phụ từ hệ thống hiện tại (ví dụ như 4 chữ thập xoay) và khảo sát sự hiệu quả của chúng trong vấn đề điều khiển dòng chảy.

Tài liệu tham khảo

- [1] Kwon, K., Choi, H., Control of laminar vortex shedding behind a circular cylinder using splitter plates. *Physics of Fluids* 8, (1996) 479-486.
- [2] Wu, H., Sun, D.P., Lu, L., Teng, B., Tang, G.Q., Song, J.N., Experimental investigation on the suppression of vortex-induced vibration of long flexible riser by multiple control rods. *Journal of Fluids and Structures* 30, (2012) 115-132.
- [3] Mittal, S., Raghuvanshi, A., Control of vortex shedding behind circular cylinder for flows at low Reynolds numbers. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 35(4), (2001) 421-447.
- [4] Badr, H.M., Coutanceau, M., Dennis, S. C. R., Menard, C., Unsteady flow past a rotating cylinder at Reynolds numbers 10^3 and 10^4 . *J Fluid Mech* 220 (1990) 459-84.
- [5] Mittal, S., Kumar, B., Flow past a rotating cylinder. *J Fluid Mech* 476 (2003) 303-34.
- [6] Schulmeister, J. C., Dahl, J. M., Weymouth, G. D., Triantafyllou, M. S., Flow control with rotating cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, 825 (2017) 743-763.
- [7] Dehkordi, E. K., Goodarzi, M., Nourbakhsh, S. H., Optimal active control of laminar flow over a circular cylinder using Taguchi and ANN. *European Journal of Mechanics-B / Fluids*, 67 (2018) 104-115.
- [8] Norouzi, M., Varedi, S. R., Maghrebi, M. J., Shahmardan, Numerical investigation of viscoelastic shedding flow behind a circular cylinder. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 197 (2013) 31-40.
- [9] Riahi, H., Meldi, M., Favier, J., Serre, E., Goncalves, A pressure-corrected Immersed Boundary Method for the numerical simulation of compressible flows. *Journal of Computational Physics*, 374 (2018) 361-383.
- [10] C. Liu, X. Zheng, C.H. Sung., Preconditioned Multigrid Methods for Unsteady Incompressible Flows. *Journal of Computational Physics*. 139 (1998) 35-57.
- [11] D. Russell, Z. Jane Wang., A cartesian grid method for modeling multiple moving objects in 2D incompressible viscous flow. *Journal of Computational Physics*, 191 (2003) 177.