

XÂY DỰNG MÔ HÌNH TOÁN CHO THIẾT KẾ BIÊN DẠNG BÌNH COMPOZIT ĐƯỢC QUẤN THEO ĐƯỜNG PHI TRẮC ĐỊA DESIGN OF SHAPE MODEL FOR COMPOSITE PRESSURE VESSELS BASED ON NON-GEODESIC TRAJECTORIES

TRẦN THỊ THANH VÂN^{1*}, TRẦN NGỌC THANH², ĐINH VĂN HIÊN²

¹Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

²Viện Tên lửa, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự

*Email liên hệ: vanttt.vck@vimaru.edu.vn

Tóm tắt

Trên cơ sở xây dựng hệ tọa độ quán thiết lập điều kiện cân bằng của băng quấn gồm sợi cốt và nhựa nền trên bề mặt khuôn quấn, từ điều kiện đó xây dựng phương trình cân bằng của vỏ trụ tròn xoay chịu áp lực trong nhận được bằng phương pháp quán, xây dựng phương trình tổng quát xác định quy luật biến đổi của góc quán, biên dạng đáy vỏ, khối lượng và thể tích vỏ; giải các phương trình để xác định quy luật và biến dạng của đáy vỏ trong trường hợp quán phi trắc địa. Qua đó, đã thiết lập được công thức xác định chiều dày các lớp quấn (quấn xoắn, quấn ngang) trên phần trụ và phần chòm bình phụ thuộc vào góc quán, áp suất phá hủy, độ bền của vật liệu.

Từ khóa: Quán phi trắc địa, bình chịu áp compozit, công nghệ quấn.

Abstract

Based on the coordinate system, the equilibrium conditions of bandwidths or fibers and matrix on the surface of the winding pattern will be represented in this paper. From these conditions, calculate the equilibrium equations for a shell of revolution under internal pressure; define a governing equation determines the change of winding angle, the shape of the dome, weight and total volume of the vessel; the solution of these equations for determining the rules and deformation of the dome in the non-geodesic trajectories. Thereby, the equations of the thick-walled composite cylinder and dome (using helical and hoop winding) depend on the winding angle, destructive pressure and strength of materials can be given.

Keywords: Non-geodesic winding, composite pressure vessels, winding technology.

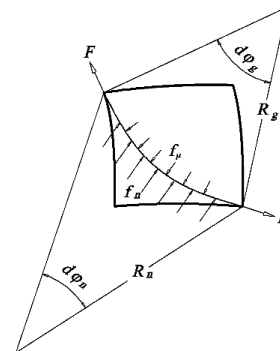
1. Giới thiệu

Bình chịu áp hình trụ làm bằng vật liệu compozit có thể tích làm việc từ vài lít đến hàng trăm lít, áp suất nén từ 20 đến 30Mpa, dùng chứa không khí, nitơ và heli... Sử dụng vật liệu compozit trong chế tạo bình chịu áp hình trụ cho phép giảm khối lượng từ 1,5 đến 2,5 lần, có tính ăn mòn tốt, tuổi thọ cao và an toàn trong sử dụng. Bình chịu áp hình trụ được làm bằng công nghệ quấn. Công nghệ quấn dễ tự động hóa và tăng năng suất trong chế tạo các chi tiết từ vật liệu compozit nền polime. Có nhiều sơ đồ quấn khác nhau, với giới hạn nội dung bài báo đi vào công nghệ quấn theo đường phi trắc địa là cách quấn mà không thỏa mãn phương trình Klero: $r \sin \beta = \text{const}$. [1]

Vấn đề tính toán kết cấu bình compozit hình trụ kín bằng phương pháp quán phi trắc địa là bài toán thiết kế biên dạng chòm thỏa mãn điều kiện chống trượt của sợi trên nền tảng của lý thuyết lưới. Bài báo đã nghiên cứu tổng hợp và hệ thống hóa được lý thuyết tổng quát về thiết kế bình compozit hình trụ kín, đưa ra được mô hình toán tổng quát cho thiết kế biên dạng chòm bình, thiết lập được công thức xác định chiều dày các lớp quấn (quấn xoắn, quấn ngang) trên phần hình trụ và phần chòm bình.

2. Xây dựng cơ sở lý thuyết mô hình quấn sợi phi trắc địa

2.1. Quỹ đạo phi trắc địa



Hình 1. Sự cân bằng lực của sợi với lực ma sát trên mỗi phần tử của lớp vỏ

Xét một phân tố sợi trên bề mặt vỏ tròn xoay như Hình 1. Lực sợi trên đơn vị chiều dài hoạt động trên bề mặt vỏ có thể xác định như sau [2]:

$$f_n \cdot R_n \cdot \Delta \varphi_1 = 2 \cdot F \cdot \sin(\Delta \varphi_1 / 2) \approx F \cdot \Delta \varphi_1 \quad (1)$$

$$f_\mu \cdot R_g \cdot \Delta \varphi_2 = 2 \cdot F \cdot \sin(\Delta \varphi_2 / 2) \approx F \cdot \Delta \varphi_2 \quad (2)$$

$$f_\mu = \lambda \cdot f_n \quad (3)$$

Trong đó: λ là hệ số ma sát trượt giữa sợi (hoặc bó sợi) và bề mặt vỏ, còn được gọi là hệ số trượt.

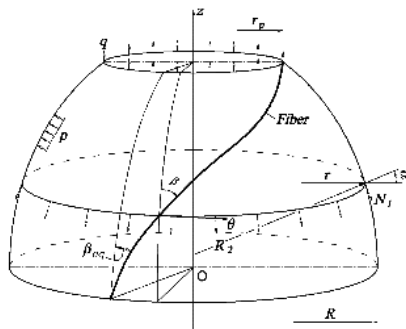
Từ ba phương trình (1), (2) và (3) ta được:

$$\lambda = f_\mu / f_n = R_n / R_g = k_g / k_n \quad (4)$$

Trong đó k_g và k_n là độ cong trắc địa và độ cong dạng pháp tuyến.

Gọi $[\lambda]$ là hệ số trượt cho phép, nếu λ lớn hơn $[\lambda]$, sợi sẽ bị trượt trên bề mặt vỏ. Do đó, điều kiện để sợi không bị trượt là:

$$\lambda = k_g / k_n \leq [\lambda] \quad (5)$$



Hình 2. Các thông số hình học và hệ tọa độ vỏ tròn xoay

Xét bề mặt phần chòm dạng tròn xoay: $S(z, \theta) = [z, r(z)\cos\theta, r(z)\sin\theta]^T$ với z là tọa độ trục, θ là tọa độ góc và r là tọa độ hướng tâm được miêu tả như hình 2. Theo nghiên cứu [1], độ cong dạng trắc địa và độ cong pháp tuyến được xác định theo phương trình sau:

$$k_g = \frac{d\beta}{ds} + \frac{r' \cdot \sin \beta}{r \cdot \sqrt{1+r'^2}} \quad (6)$$

$$k_n = -\frac{r'' \cdot \cos^2 \beta}{\sqrt{(1+r'^2)^3}} + \frac{\sin^2 \beta}{r \cdot \sqrt{1+r'^2}} \quad (7)$$

Trong đó r' và r'' là đạo hàm bậc nhất và bậc hai của r theo z ; β là góc tạo bởi giữa đường đi của sợi và hướng kinh tuyến của vòm; s là chiều dài của sợi.

Thay thế phương trình (6) và (7) vào phương trình (4) ta được:

$$\frac{d\beta}{ds} = -\lambda \left(\frac{r'' \cdot \cos^2 \beta}{\sqrt{(1+r'^2)^3}} - \frac{\sin^2 \beta}{r \cdot \sqrt{1+r'^2}} \right) - \frac{r' \cdot \sin \beta}{r \cdot \sqrt{1+r'^2}} \quad (8)$$

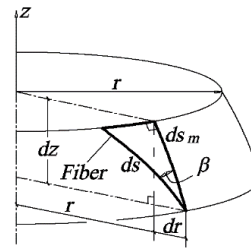
Vì sợi tạo với đường kinh tuyến một góc β (Hình 3), khi đó $d\beta/ds$ có dạng:

$$\frac{d\beta}{ds} = \frac{d\beta}{dz} \cdot \frac{dz}{ds_m} \cdot \frac{ds_m}{ds} = \frac{d\beta}{dz} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+r'^2}} \cdot \cos \beta \quad (9)$$

Biến đổi và cân bằng hai vế của $d\beta/ds$ trong phương trình (8) và (9) ta được:

$$\beta = -\lambda \left(\frac{r'' \cdot \cos \beta}{1+r'^2} - \frac{\sin \beta \cdot \tan \beta}{r} \right) - \frac{r' \cdot \tan \beta}{r} \quad (10)$$

Trong đó β' là đạo hàm bậc nhất của β theo z .



Hình 3. Mối liên hệ hình học của z , s , s_m và β

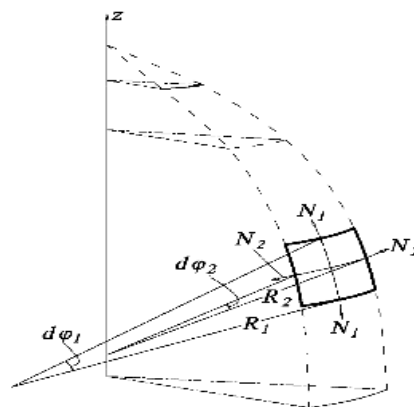
Sắp xếp lại phương trình (5) và (10), điều kiện để sợi không bị trượt như sau:

$$\lambda = \frac{(1+r'^2) \cdot (\beta' \cdot r \cdot \cos \beta + r' \cdot \sin \beta)}{(1+r'^2) \sin^2 \beta - r \cdot r'' \cdot \cos^2 \beta} \quad (11)$$

$$\text{Với } \lambda = 0: r' \cdot \sin \beta + r \cdot \beta' \cdot \cos \beta = 0 \quad (12)$$

Vế phải của phương trình (12) chính là đạo hàm của $r \cdot \sin \beta$ theo z . Do đó giá trị $r \cdot \sin \beta = \text{constant}$. Đây chính là phương trình Clairaut ứng với quỹ đạo dạng trắc địa. Trong các trường hợp khác ($\lambda \neq 0$), đường quán sợi xuất phát từ dạng trắc địa sẽ được gọi là phi trắc địa.

2.2. Các lực tác dụng và sự cân bằng lực trên lớp vỏ tròn xoay



Hình 4. Các lực tác dụng vào phân tố được tách ra từ vỏ

Dưới tác động của áp suất p , ($p \neq 0$) trong vỏ sẽ xuất hiện các ứng lực kinh tuyến N_1 và ứng lực vĩ tuyến N_2 .

Phương trình cân bằng lực tác dụng lên một phần tử vỏ bất kỳ có dạng:

$$2.N_1.R_1.d\phi_1.\sin\left(\frac{d\phi_1}{2}\right) + 2.N_2.R_1.d\phi_1.\sin\left(\frac{d\phi_2}{2}\right) - p.R_1.d\phi_1.R_2.d\phi_2 = 0 \quad (13)$$

Do $d\phi$ là vô cùng nhỏ nên $\sin(d\phi/2) = d\phi/2$.

Rút gọn phương trình (13) ta được:

$$\frac{N_1}{R_1} + \frac{N_2}{R_2} = p \quad (14)$$

Trong đó R_1 và R_2 là bán kính đường kinh tuyến và vĩ tuyến của đường cong đang xét. Theo nghiên cứu của [2], [3], [4], các giá trị này được xác định như sau:

$$R_1 = -\frac{\sqrt{(1+r'^2)^3}}{r''} \quad (15)$$

$$R_2 = \frac{r}{\cos \alpha} = r.\sqrt{1+r'^2} \quad (16)$$

Xét cân bằng lực theo phương dọc trục (trục z) của vỏ, ta có:

$$2.\pi.r.N_1.\cos \alpha = 2.\pi \int_{r_0}^r p.r.dr + 2.\pi.r_0.q \quad (17)$$

Thay thế $\cos \alpha$ trong phương trình (16) vào phương trình (17) để tìm N_1 , đồng thời thay N_1 vào phương trình (14) ta được:

$$N_1 = \frac{p.R_2}{2} \left(1 + \frac{2.q.r_0 - p.r_0^2}{p.r^2}\right) \quad (18)$$

$$N_2 = \frac{p.R_2}{2} \left[2 - \frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{2.q.r_0 - p.r_0^2}{p.r^2}\right)\right] \quad (19)$$

Ứng suất trung bình theo phương kinh tuyến và vĩ tuyến (σ_1, σ_2) có thể được xác định thông qua các lực (N_1, N_2) và chiều dày (h):

$$\sigma_1 = \frac{N_1}{h} \quad (20)$$

$$\sigma_2 = \frac{N_2}{h} \quad (21)$$

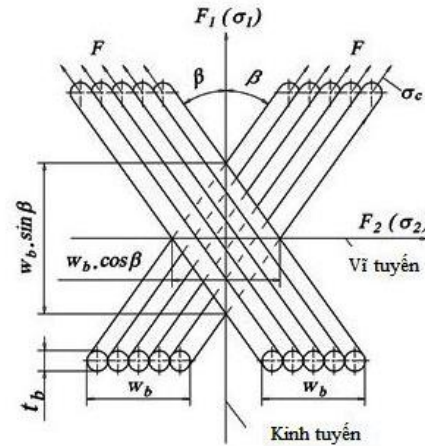
Xem xét vị trí hai băng quán rộng t và dày w . Mỗi băng quán nghiêng với đường sinh góc quán β như Hình 5. Khi đó:

$$\sigma_1 = \frac{F_1.\cos \beta}{2.\delta.t} = \sigma_c.\cos^2 \beta \quad (22)$$

$$\sigma_2 = \frac{F_1.\sin \beta}{2.\delta.t} = \sigma_c.\sin^2 \beta \quad (23)$$

Cân bằng và kết hợp hai cặp phương trình (20) và (22), (21) và (23), ta được:

$$\tan^2 \beta = \frac{N_2}{N_1} \quad (24)$$



Hình 5. Sơ đồ phân bố cốt sợi trên bề mặt vật thể tròn xoay

2.3. Các phương trình xác định đường kinh tuyến của vòm

Từ trạng thái cân bằng lực đã phân tích ở trên, các phương trình xác định đường kinh tuyến của vòm sẽ được trình bày trong mục này.

Thay thế R_1 và R_2 từ các phương trình (15) và (16) vào phương trình (18) và (19) tương ứng, sau đó thế phương trình (18) và (19) vào phương trình (24). Sau khi biến đổi ta được:

$$r'' = \left[\tan^2 \beta - \frac{2.r^2}{r^2 - r_0^2 + \frac{2.q.r_0}{p}} \right] \frac{1+r'^2}{r} \quad (25)$$

Kết hợp các phương trình (10) và (25) ta được hệ phương trình vi phân xác định các đường kinh tuyến của vòm.

Viết các phương trình (25) và (10) trong tọa độ không thứ nguyên bằng cách đặt $\bar{r} = r/R$, $\bar{z} = z/R$, sẽ thu được hệ phương trình mới như sau:

$$\begin{cases} \bar{r}'' = \left[\tan^2 \beta - \frac{2.\bar{r}^2}{\bar{r}^2 - \bar{r}_0^2 + \frac{2.q.\bar{r}_0}{p.R}} \right] \frac{1+\bar{r}'^2}{\bar{r}} \\ \beta'_{|\bar{z}} = \lambda \left(\frac{\sin \beta.\tan \beta}{\bar{r}} - \frac{\bar{r}''.\cos \beta}{\sqrt{1+\bar{r}'^2}} \right) - \frac{\bar{r}'.t.a.\eta\beta}{\bar{r}} \end{cases} \quad (26)$$

Trong trường hợp phần lỗ đầu cực có dạng đóng, lấy $q = p.r_0/2$ và phương trình đầu tiên của hệ phương trình (26) sẽ trở thành phương trình (27). Trong khi đó,

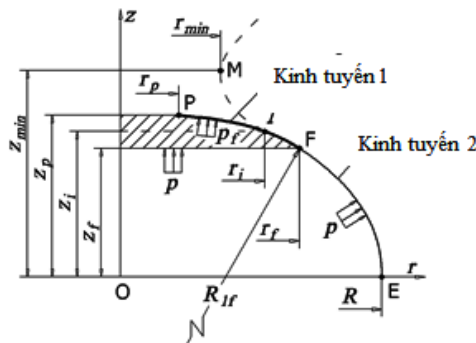
nếu phần lỗ đầu cực được mở để làm đầu phun của động cơ tên lửa thì $q = 0$ và phương trình đầu tiên của hệ phương trình (26) trở thành phương trình (28).

$$\bar{r}' = \left(\tan^2 \beta - 2 \right) \frac{1 + \bar{r}^2}{\bar{r}} \quad (27)$$

$$\bar{r}' = \left(\tan^2 \beta - \frac{2\bar{r}^2}{\bar{r}^2 - \bar{r}_0^2} \right) \frac{1 + \bar{r}^2}{\bar{r}} \quad (28)$$

Hệ phương trình vi phân (26) được giải bằng cách sử dụng phương pháp số với điều kiện ban đầu là $\bar{z}(0) = 0$, $\bar{r}(0) = 1$, $\bar{r}'(0) = 0$, $\beta(0) = \beta_{eq}$ và λ được đưa ra như một hằng số hoặc một hàm phân phối nhất định.

2.4. Hiện tượng chệch của đường kinh tuyến cơ sở và giải pháp hiệu chỉnh



Hình 6. Hình mô tả đường kinh tuyến của lớp vỏ composite theo tính toán không xem xét tới điều kiện và hình học liên quan trong thực tế

Đường kinh tuyến của vòm được chỉ định bởi hệ phương trình (26) luôn có điểm mở rộng mà tại đó hướng của độ cong thay đổi (Hình 6). Đối với quần sợi trục địa, bán kính hướng tâm tại điểm này là $\bar{r}_i = 0.1225 \cdot \bar{r}_0$ [3]. Đối với quần dạng phi trục địa,

bằng cách giải hệ phương trình (26) và tìm giá trị $\bar{r}_i$ theo điều kiện bán kính đường kinh tuyến lớn nhất, R_1 , sẽ thu được $\bar{r}_i$. Do sự uốn cong này, việc lắp đường cong kinh tuyến là bắt buộc. Như trên Hình 6, đường cong 1 (cung EF) được xác định bằng cách giải hệ phương trình (26), đường cong 2 (cung FP) là đường cong sau hiệu chỉnh.

Để đảm bảo đường cong là lồi trong vùng lân cận của đầu cực, bán kính hướng tâm của điểm F, $\bar{r}_f$ phải lớn hơn $\bar{r}_i$ [3]. Đối với trường hợp phần lỗ cực

đóng, có thể sử dụng giải pháp hiệu chỉnh được giới thiệu bởi Vasiliev [5], bằng cách sử dụng hệ phương trình (26) với $q = 0$ là điều kiện ban đầu, tại $\bar{z} = 0$, $\bar{r}(0) = \bar{r}(\bar{z}_f)|_{curve1}$, $\bar{r}'(0) \rightarrow -\infty$,

$\beta(0) = \beta(\bar{z}_f)|_{curve1}$ và λ . Tuy nhiên, đối với phần lỗ

đầu cực mở, giải pháp này rất khó thực hiện vì đường cong 1 và đường cong 2 có cùng hệ phương trình, do đó, không thể thực hiện được độ phân giải của hệ phương trình của đường cong 2.

Để giải quyết vấn đề trên, tác giả đề xuất một vòng cung tròn có bán kính kinh tuyến, R_{1f} (Hình 6) để điều chỉnh đường cong. Điều này hoàn toàn hợp lý vì độ dài của cung tròn hiệu chỉnh thường ngắn, do đó, xu hướng trượt của sợi có thể bị bỏ qua.

Phương trình hiệu chỉnh cung tròn được xác định như sau:

$$\begin{cases} (\bar{z} + \bar{R}_{1f} \cdot \sin \alpha_f - \bar{z}_f)^2 + (\bar{r} + \bar{R}_{1f} \cdot \cos \alpha_f - \bar{r}_f)^2 = \bar{R}_{1f}^2 \\ \alpha_f = \arccos[(1 + \bar{r}^2)^{-1/2}] \Big|_{\bar{z}=\bar{z}_f} \end{cases} \quad (29)$$

2.5. Chiều dày lớp vỏ composit

a. Chiều dày lớp composit tại phần mái vòm

Tại phần mái vòm, góc quần của sợi thay đổi từ $\beta_{eq} \rightarrow \pi/2$. Phương pháp này gọi là quần xoắn. Xét hai trường hợp phần lỗ tại đầu cực:

- Trường hợp một, các lỗ đầu cực có dạng đóng: khi đó và tại đường xích đạo, $R_1 \rightarrow \infty$, và $R_2 = R$, do đó từ phương trình (18) và (19) ta được:

$$N_1 = \frac{p \cdot R}{2} \quad (30)$$

$$N_2 = p \cdot R \quad (31)$$

Kết hợp các phương trình (20), (22) và (30), chiều dày nhỏ nhất của vật liệu tại xích đạo được xác định như sau:

$$h_{eq} = \frac{p \cdot R}{2 \cdot [\sigma_c] \cos^2 \beta_{eq}} \quad (32)$$

Trong đó $[\sigma_c]$ là độ bền kéo của vật liệu composit và β_{eq} là góc quần tại xích đạo.

Để xác định chiều dày của vật liệu tại phần vòm, giả sử rằng tổng số lượng sợi đi qua mặt phẳng bất kỳ là không đổi. Ta có:

$$h = h_{eq} \frac{R \cdot \cos \beta}{r \cdot \cos \beta_{eq}} \quad (33)$$

Trong tọa độ không thứ nguyên:

$$\bar{h}_{eq} = \frac{h_{eq}}{R} = \frac{p}{2[\sigma_c] \cos^2 \beta_{eq}} \quad (34)$$

$$\bar{h} = \frac{h}{R} = \bar{h}_{eq} \frac{\cos \beta}{\bar{r} \cdot \cos \beta_{eq}} \quad (35)$$

- Trường hợp 2, các lỗ đầu cực có dạng đóng: Tiến hành tương tự như trường hợp trên, chiều dày nhỏ nhất của vật liệu ở xích đạo là:

$$\bar{h}_{eq} = \frac{h_{eq}}{R} = \frac{p \cdot (1 - \bar{r}_0^2)}{2[\sigma_c] \cos^2 \beta_{eq}} \quad (36)$$

Chiều dày của vật liệu dọc theo kinh tuyến của vòm xác định theo phương trình (35).

b. Chiều dày tại phần thân giữa của bình

Trong trường hợp các lỗ đầu cực có dạng đóng, nếu chiều dày tại phần thân giữa của bình ($\beta = 90^\circ$) bằng không, từ ba phương trình (24), (28) và (29), $\tan^2 \beta(0)$ phải bằng 2, khi đó kinh tuyến của vòm sẽ bị thổi phồng tại chính đường xích đạo và trở thành đường cong lõm. Vì lý do này, lớp quần tại phần thân giữa sẽ được yêu cầu. Đối với trường hợp lỗ cực mở, lớp quần sợi có thể không cần thiết khi bán kính của lỗ cực gần bằng 1.

Khi yêu cầu lớp quần tại phần thân giữa (h_c), lực tác dụng lên phần này là N_2 , khi đó chiều dày tương ứng là:

$$N_2 = \sigma_c \cdot (h_{eq} \cdot \sin^2 \beta_{eq} + h_c \cdot \sin^2 90^\circ) \quad (37)$$

Cân bằng phương trình (30) và (37), lớp quần nhỏ nhất tại phần giữa có dạng như sau:

$$h_c = \frac{p \cdot R - [\sigma_c] h_{eq} \cdot \sin^2 \beta_{eq}}{[\sigma_c]} \quad (38)$$

Trong hệ tọa độ không thứ nguyên:

$$\bar{h}_c = \frac{p - [\sigma_c] \bar{h}_{eq} \cdot \sin^2 \beta_{eq}}{[\sigma_c]} \quad (39)$$

3. Kết quả và bàn luận

Vỏ được quần theo đường phi trắc địa khi $\lambda \neq 0$, biên dạng đáy và góc quần được xác định theo các công thức (26) với hệ số trượt λ được tính toán theo (11).

Để xác định biên dạng đáy theo (26), cần phải xác định được quy luật của góc quần phi trắc địa. Với giá trị $\lambda \neq 0$, việc giải phương trình góc quần phi trắc địa (26) được tính toán bằng phương pháp số (phương pháp lặp Runge-Kutta), điều kiện ban đầu là góc quần tại lỗ cực $\beta_0 = 90^\circ$ và hệ số trượt phải

được xác định trước. Tuy nhiên trên thực tế hệ số trượt luôn thay đổi dọc theo đường quần của sợi theo công thức (11). Vì vậy giải đồng bộ các phương trình (26), (11), là rất phức tạp.

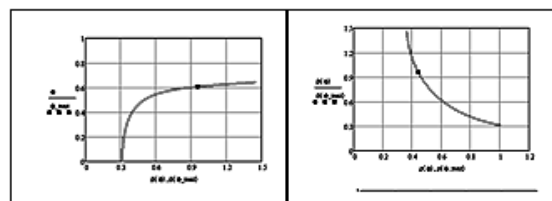
Như đã đề cập ở trên, để quần không trượt hệ số trượt phải luôn luôn nhỏ hơn hệ số ma sát tĩnh tối đa. Giải các phương trình nêu trên bằng cách ghép giá trị hệ số trượt trên biên dạng mặt cong biến thiên đơn điệu theo r dưới dạng:

$$\lambda = f \frac{1 - \bar{r}}{1 - \bar{r}_0} \quad (39)$$

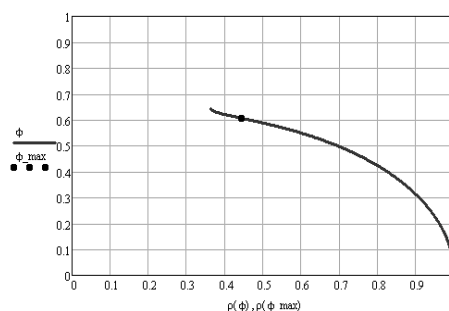
Trong đó f là hệ số ma sát tĩnh giữa băng sợi quần với bề mặt khuôn quần.

3.1. Trường hợp khi lỗ cực được đóng kín bằng các mặt bích

Trường hợp này $q = p \cdot r_0/2$, kết quả giải (27) có tính đến qui luật phân bố (39) xác định được quy luật thay đổi góc quần β như mô tả trên (Hình 7). Trên cơ sở đó đã giải được phương trình (26) và tìm được biên dạng điển hình đáy vỏ ứng với các giá trị $\bar{r}_0$ như (Hình 8).



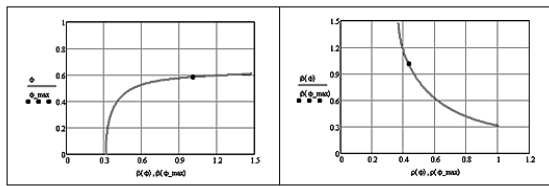
Hình 7. Góc quần β theo các tọa độ bán kính z và r với $q = p \cdot r_0/2$



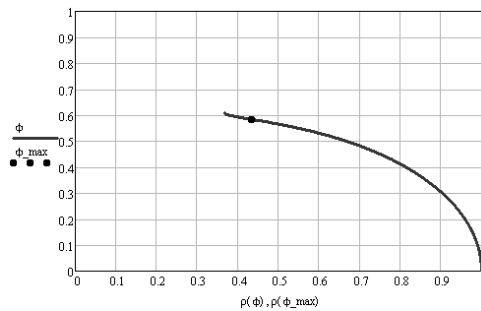
Hình 8. Biên dạng đáy vỏ khi quần theo đường phi trắc địa với $q = p \cdot r_0/2$

3.2. Trường hợp khi lỗ cực được mở

Trường hợp này lực phân bố $q = 0$, kết quả giải (28) với các điều kiện đầu và biểu diễn kết quả dưới dạng đồ thị nhận được sự phụ thuộc của góc quần vào các tọa độ và biên dạng đáy vỏ như (Hình 9) và (Hình 10).



Hình 9. Góc quán β theo các tọa độ bán kính z và r với $q = p.r_0/2$



Hình 10. Biên dạng đáy vỏ khi quán theo đường phi trắc địa với $q = 0$

4. Kết luận

Trên nền tảng của lý thuyết lưới, bài báo đã xây dựng được mô hình toán tổng quát cho thiết kế biên dạng chòm bình theo đường quán phi trắc địa. Đã thiết lập được công thức xác định chiều dày các lớp quán (quán xoắn, quán ngang) trên phần hình trụ và phần chòm bình phụ thuộc vào góc quán, áp suất phá hủy, độ bền vật liệu compozit.

Lời cảm ơn

Bài báo là kết quả của nghiên cứu sinh và đề tài nghiên cứu khoa học cấp trường năm học 2019-2020: “Nghiên cứu tính toán kết cấu bình chịu áp bằng vật liệu compozit cho thiết bị thoát hiểm trên tàu”, được hỗ trợ kinh phí bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Gray A, Modern differential geometry of curves and surfaces, Boca Ration: CRC press; 1993.
- [2] W.S. Read, Equilibrium shapes for pressurized fibreglas domes, Journal of Engineering of Industry, Volume 85, pp.115-118, February 1963.
- [3] V.V. Vasiliev, Composite pressure vessels-analysis, design, and manufacturing, Virginia, USA: Bull Ridge Publishing, Blacksburg, 2009.
- [4] M. Hojjati, A.V. Safavi and S.V Hoa, Design of domes for polymeric composite pressure vessels, Composite Engineering, Volume 5(1), pp.51-59, 1995.
- [5] W. M. Mahdy, H. Kamel and E.E. El-Soaly, Design of optimum filament wound pressure vessel with integrated end domes, International Conference on Aerospace Sciences & Aviation Technology, May 2015.

Ngày nhận bài: 20/04/2020

Ngày nhận bản sửa: 08/05/2020

Ngày duyệt đăng: 14/05/2020