

# XÁC ĐỊNH HỆ SỐ CẢN LẮC NGANG CỦA TÀU BẰNG PHƯƠNG PHÁP KẾT HỢP CFD VÀ MÔ HÌNH HỘP XÁM

## A HYBRID PREDICTION METHOD FOR SHIP ROLL DAMPING USING CFD AND GREY-BOX MODELING

LÊ THANH BÌNH\*, NGUYỄN THỊ HÀ PHƯƠNG

Khoa Đóng tàu, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

\*Email liên hệ: binhlt@vimaru.edu.vn

### Tóm tắt

Tính toán dao động lắc ngang của tàu có ý nghĩa quan trọng trong việc đảm bảo an toàn, tính chống lật của tàu trong khai thác và cần được đặc biệt quan tâm trong giai đoạn thiết kế. Lý thuyết thế được áp dụng rộng rãi trong xác định hệ số cản lắc ngang có độ chính xác không cao và cần được chính xác hóa bằng thực nghiệm. Trong nghiên cứu này, dao động lắc ngang tự do của tàu DTMB5512 trên nước tĩnh được mô phỏng bằng phương pháp số (CFD) sử dụng phần mềm thương mại Star-CCM+ kết hợp phương pháp mô hình hộp xám để xác định hệ số cản lắc ngang của tàu. Ảnh hưởng của kích thước lưới, độ lớn góc lắc ban đầu, vận tốc tàu và vận tốc giảm lắc được nghiên cứu và phân tích. Kết quả tính toán hệ số cản lắc ngang được so sánh với phương pháp năng lượng Froude,... Kết quả cho thấy phương pháp được đề xuất là một giải pháp tốt, tiết kiệm thời gian và chi phí mà vẫn đảm bảo độ tin cậy.

**Từ khóa:** Mô phỏng số CFD, lưới chong, chuyển động lắc ngang, hệ số cản lắc ngang, mô hình hộp xám, phương pháp năng lượng Froude.

### Abstract

Ship roll motion prediction plays an important role in ensuring the safety, anti-capsizing of the ship in operation and needs special attention during the design phase. The potential theory, which is widely applied in determining the roll damping coefficient, has low accuracy and needs to be determined by model test. In this paper, free-roll motion in calm water is simulated numerically using commercial software Star-CCM+ together with the application of the grey-box modeling method for the direct calculation of roll damping coefficient. The effect of mesh size, initial roll angle, forward speed, and bilge keels are studied and analyzed; roll damping coefficient are compared with Froude energy,... The obtained

results indicate that the proposed hybrid method is a good solution, cost and time saving with a high level of accuracy.

**Keywords:** CFD simulation, overset mesh, roll motion, roll damping coefficient, grey-box modeling, Froude energy method.

### 1. Tổng quan

Dao động lắc ngang gắn liền với mức an toàn chống lật của tàu. Tầm quan trọng của nó được khẳng định thông qua quy định của các tổ chức đăng kiểm trong kiểm tra ổn định ngang của tàu [1], [2], [3], cũng như nhiều nghiên cứu từ giữa thế kỷ 19 cho đến nay [4], [5], [6] và vẫn đang được tiếp tục nghiên cứu. Ngoài ra, lắc ngang còn ảnh hưởng xấu đến điều kiện làm việc của các trang thiết bị, an toàn hàng hóa trên tàu và mức độ tiện nghi đối với thuyền viên, hành khách trên tàu.

Cho đến nay, các nghiên cứu đã đề cập đến gần như đầy đủ các yếu tố ảnh hưởng nhằm mục đích nâng cao độ chính xác của việc xác định hệ số lực cản lắc ngang. Tiền đề là Froude [7] với đề xuất mô hình tuyến tính, phi tuyến bậc hai và đến nay là mô hình phi tuyến bậc ba đã được áp dụng rộng rãi [8]. Tổng quát, lực cản lắc ngang được biểu diễn như sau:

$$B_{\phi} = B_{1\phi}\dot{\phi} + B_{2\phi}\dot{\phi}|\dot{\phi}| + B_{3\phi}\dot{\phi}^3 \quad (1)$$

Trong đó:  $B_{\phi}(\dot{\phi})$ ,  $B_{i\phi}$  - Là các hệ số lực cản lắc ngang,  $\dot{\phi}$  - Vận tốc lắc ngang của tàu.

Mô hình phi tuyến bậc hai có nhược điểm là gây khó cho việc biến đổi biểu thức khi giải bài toán liên quan, độ chính xác trong bài toán xấp xỉ kém [9] nhưng đạt được sự phù hợp tốt hơn với kết quả thử mô hình đối với trường hợp tàu có vây giảm lắc [10].

Ảnh hưởng của vận tốc đến lực cản lắc ngang được Ikeda và các đồng nghiệp nghiên cứu và đề xuất phương pháp tính toán [11]. Ảnh hưởng của vận tốc đến lực cản lắc ngang xuất hiện mạnh ở một dải vận tốc tương đối nhỏ và giảm dần khi vận tốc của tàu đạt đến một giá trị nào đó và không đổi [12].

Các phương pháp xác định hệ số lực cản lắc ngang

của tàu như: lý thuyết, thực nghiệm và thử mô hình. Các phương pháp như: Lý thuyết thể 2D, lý thuyết Ursell, biến hình bảo giác,... cho phép xác định nhanh và kết quả tính toán trơn đều nhưng không thể hiện tốt trường hợp thân tàu có góc nhọn, các mặt cắt ngang tàu có hệ số béo diện tích nhỏ. Lý thuyết thể và phương pháp tấm 3D [13], [14] có thể áp dụng với hầu hết các hình dáng tàu và được Huijismans phát triển áp dụng thêm đối với trường hợp tàu có vận tốc [15].

Phương pháp thực nghiệm đề xuất bởi Himeno [16] được áp dụng rộng rãi đối với các tàu hàng có hình dáng truyền thống dưới tên gọi “phương pháp Ikeda”. Các cải tiến sau đó cho phép tính đến ảnh hưởng của vận tốc tịnh tiến của tàu [17] và mở rộng đối với các tàu có hình dáng bất kỳ bởi Kawahara [18].

Thử mô hình là phương pháp chính xác để xác định lực cản lắc ngang của tàu có chi phí cao và tốn nhiều thời gian. Hệ số lực cản lắc ngang được xác định dựa trên dữ liệu ghi góc nghiêng ngang của tàu theo thời gian sử dụng phương pháp bán tuyến tính (lượng giảm lôgarit), năng lượng Froude,... Các phương pháp này có nhược điểm khi chỉ áp dụng cho dao động có lực cản nhỏ, lực cản phi tuyến nhỏ hơn nhiều so với thành phần tuyến tính, biên độ ban đầu nhỏ ( $\leq 10^\circ$ ).

Với sự phát triển mạnh của lý thuyết CFD trong những năm gần đây, ứng dụng CFD trong mô phỏng các bài toán động học tàu nói chung và mô phỏng dao động lắc ngang của tàu nói riêng đã đạt được các kết quả tốt [19], [20]. CFD có thể được áp dụng để thay thế cho việc chế tạo và thử mô hình giúp giảm chi phí và thời gian. Ngoài ra, CFD còn cho phép trích xuất nhiều kết quả trung gian mà không thể thực hiện được trong khi thử mô hình tàu.

Trong nghiên cứu, dao động lắc ngang của tàu được mô phỏng bằng phần mềm thương mại Star-CCM+. Tính toán được thực hiện cho mô hình tỷ lệ của tàu chiến DTMB 5512. Mô hình tàu được thiết lập lắc ngang tự do với góc lắc ban đầu sử dụng kỹ thuật lưới chồng (overset mesh) và sử dụng kết quả vào việc xác định hệ số lực cản lắc ngang của tàu bằng phương pháp mô hình hộp xám cho phép áp dụng không giới hạn độ lớn của biên độ lắc ngang ban đầu.

## 2. Cơ sở lý thuyết

### 2.1. Phương trình dao động lắc ngang của tàu trên nước tĩnh

Phương trình dao động lắc ngang 1 bậc tự do của tàu có dạng:

$$(I_{xx} + A_\phi)\ddot{\phi} + B_\phi(\dot{\phi})\dot{\phi} + C(\phi)\phi = 0 \quad (2)$$

Trong đó:  $I_{xx}$  - Mô-men quán tính khối lượng

của tàu đối với trục  $Ox$  ( $\text{kg.m}^2$ );  $A_\phi$  - Mô-men quán tính khối lượng nước kèm lắc ngang ( $\text{kg.m}^2$ );  $B_\phi(\dot{\phi})$  - Hệ số lực cản lắc ngang của tàu, hàm phụ thuộc vào tốc độ lắc ngang ( $\text{N.m.s}$ );  $C(\phi)$  - Mô-men hồi phục của tàu, hàm phụ thuộc góc nghiêng ngang ( $\text{N.m}$ ).

Sử dụng công thức (1), hệ số lực cản được biểu diễn ở dạng tổng của các thành phần:

$B_\phi(\dot{\phi}) =$	$B_{1\phi}\dot{\phi} +$	$B_{2\phi}\dot{\phi} \dot{\phi}  +$	$B_{3\phi}\dot{\phi}^3$	(3)
$b_\phi(\dot{\phi}) =$	$b_{1\phi}\dot{\phi} +$	$b_{2\phi}\dot{\phi} \dot{\phi}  +$	$b_{3\phi}\dot{\phi}^3$	(4)
	<i>Thành</i>	<i>Thành</i>	<i>Thành</i>	
<i>Hệ số lực cản</i>	<i>phần</i>	<i>phần phi</i>	<i>phần</i>	
<i>lắc ngang tổng</i>	<i>tuyến</i>	<i>tuyến bậc</i>	<i>tuyến</i>	
	<i>tính</i>	<i>hai</i>	<i>bậc ba</i>	

$$\text{Với } b(\dot{\phi}) = \frac{B_\phi(\dot{\phi})}{I_{xx} + A_\phi}; \quad c(\phi) = \frac{C(\phi)}{I_{xx} + A_\phi}.$$

Phương trình (2), được viết lại ở dạng chuẩn hóa như sau:

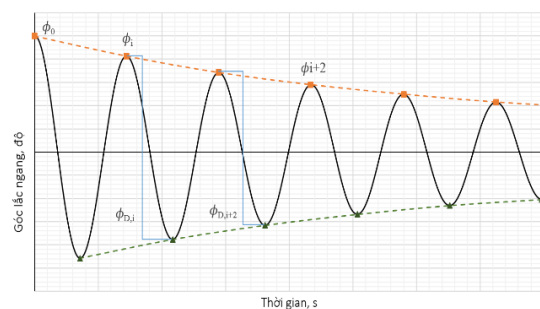
$$\ddot{\phi} + b_{1\phi}\dot{\phi} + b_{2\phi}\dot{\phi}|\dot{\phi}| + b_{3\phi}\dot{\phi}^3 + c(\phi)\phi = 0 \quad (5)$$

Trong tính toán lắc ngang, có thể sử dụng mô hình hệ số lực cản tuyến tính tương đương  $b_e(\phi)$ .

$$\ddot{\phi} + b_e(\phi)\dot{\phi} + c(\phi)\phi = 0 \quad (6)$$

Trong đó:

$$b_e(\phi) = b_{1\phi} + \frac{8}{3\pi}\omega_a\phi_a b_{2\phi} + \frac{3}{4\pi}\omega_a^2\phi_a^2 b_{3\phi} \quad (7)$$



Hình 1. Đồ thị lắc ngang của tàu

### 2.2. Phương pháp năng lượng Froude xác định hệ số lực cản lắc ngang

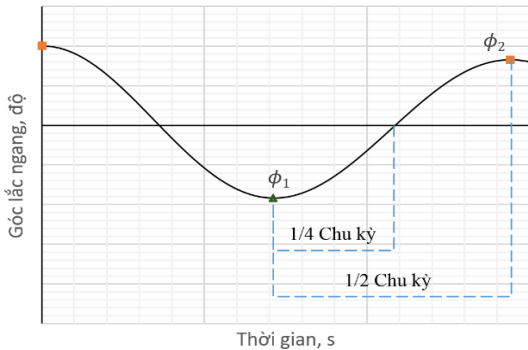
Phương pháp này dựa trên giả thiết rằng năng lượng tổn hao do lực cản trong một nửa chu kỳ bằng với năng lượng của mô-men hồi phục (Hình 2).

Lượng giảm biên độ lắc ngang của tàu sau mỗi nửa chu kỳ  $d\phi_a/dr$  được xấp xỉ bằng đường cong đa thức bậc ba như biểu thức (8), (9):

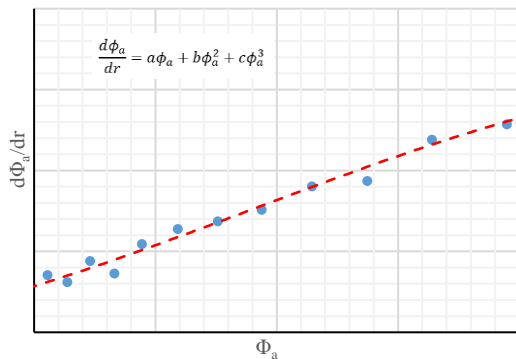
$$\frac{d\phi_a}{dr} = \frac{\pi b_{1\phi}}{2\omega_a} \phi_a + \frac{4}{3} b_{2\phi} \phi_a^2 + \frac{3}{8} \omega_a \pi b_{3\phi} \phi_a^3 \quad (8)$$

$$\frac{d\phi_a}{dr} = a\phi_a + b\phi_a^2 + c\phi_a^3 \quad (9)$$

Các hệ số  $a, b, c$  trong biểu thức (9) được xác định bằng phương pháp xấp xỉ. Hệ số lực cản lắc ngang tương ứng  $b_{1\phi}, b_{2\phi}, b_{3\phi}$  cũng như hệ số lực cản lắc ngang tuyến tính tương đương  $b_e$  xác định theo (7).



a)



b)

**Hình 2. Xác định các thông số tính toán lực cản lắc ngang theo phương pháp năng lượng Froude**

### 2.3. Lý thuyết CFD

Trong báo cáo này, nhóm tác giả sử dụng phương trình RANS hay được gọi là phương trình Navier-Stokes với số Reynolds trung bình. Việc tách các phương trình Navier-Stokes thành các phương trình RANS cho phép mô phỏng các dòng chảy giống với trong thực tế [21]. Chất lỏng được giả thiết là không nén và các phương trình được biểu diễn dưới dạng ứng suất trong hệ tọa độ Descartes như sau:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j + \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j) \quad (11)$$

$$= \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i$$

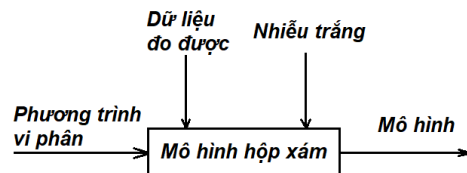
Trong đó:  $\bar{\tau}_{ij}$  - Là thành phần ứng suất nhớt,  $\bar{p}$  - Là áp suất,  $\partial(\bar{u}_i)$  - Là thành phần tọa độ của véc tơ vận tốc,  $\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j$  là ứng suất Reynolds,  $\rho$  - Khối lượng riêng của chất lỏng,  $\mu$  - Độ nhớt động học,  $f_i$  - Ngoại lực.

Các phương trình trên được giải sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn, bằng cách phân chia miền chất lỏng thành các phần tử, sau đó giải phương trình chuyển động và các định luật bảo toàn trong mỗi phần tử lưới. Kết quả là các phương trình vi phân đạo hàm riêng này được rời rạc hóa thành một hệ phương trình đại số tuyến tính đơn giản hơn.

### 2.4. Mô hình hộp xám

Mô hình hộp xám là phương pháp trong lĩnh vực nhận dạng hệ thống. Nó là sự kết hợp của phương pháp hộp trắng và phương pháp hộp đen cho phép sử dụng thông tin biết trước là mô hình toán học của hệ (phương pháp hộp trắng) và thông tin đầu ra từ kết quả đo (phương pháp hộp đen).

Giản đồ minh họa của phương pháp hộp xám được thể hiện trong Hình 3.



**Hình 3. Giản đồ phương pháp hộp xám**

Biểu diễn tổng quát của bài toán xác định tham số bằng mô hình hộp xám có dạng sau:

$$\begin{aligned} v_t &= f(v, u, p) + e \\ y &= h(v, p) + \omega \end{aligned} \quad (12)$$

Trong đó:  $v$  - Vector trạng thái,  $u$  - Đầu vào biết trước,  $p$  - Tập hợp các tham số,  $y$  - Thông số đầu ra,  $e$  và  $\omega$  - Tương ứng là nhiễu trắng liên tục và gián đoạn,  $f$  và  $h$  là hai hàm phi tuyến bất kỳ.

Trong nghiên cứu này, phương pháp hộp xám của MATLAB (System Identification Toolbox) được sử dụng để xác định giá trị của các biến là các hệ số lực cản, hệ số mô-men khối lượng nước kèm của tàu khi lắc ngang với phương trình chuyển động được mô tả bằng phương trình vi phân thường bậc hai theo (5).

Phương trình dao động lắc ngang tự do của tàu được viết ở dạng không gian trạng thái như sau:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -b_{1\phi}x_2 - b_{2\phi}x_2|x_2| - b_{3\phi}x_2^3 - c(\phi)x \end{aligned} \quad (13)$$

với:  $x_1 = \phi$ ,  $x_2 = \dot{\phi}$ .

Các tham số của mô hình (13) được xác định bằng các phương pháp tìm kiếm như: ước lượng hợp lý cực đại MLE, tối thiểu hóa sai số dự đoán PEM.

### 3. Mô phỏng dao động lắc ngang tự do của tàu bằng CFD

#### 3.1. Thông số mô hình tàu

Mô phỏng chuyển động lắc ngang được thực hiện với mô hình tàu DTMB 5512 tỷ lệ 1:46,6 (Hình 4) [22]. Các thông số kích thước của tàu DTMB 5512 được đưa ra trong Bảng 1.

**Bảng 1. Thông số mô hình tàu**

Thông số	Mô hình 5512 (1:46,6)
Chiều dài giữa hai đường vuông góc ( $L_{pp}$ , m)	3,048
Chiều rộng (B, m)	0,405
Mớn nước *T, m)	0,132
Diện tích mặt ướt ( $S_w$ ) (m <sup>2</sup> )	1,459
Hệ số béo ( $C_B$ )	0,506
Số Froude ( $F_n$ )	0,41

#### 3.2. Thiết lập mô phỏng

Nghiên cứu thực hiện cho trường hợp tàu được thiết lập đứng yên và trường hợp tàu chạy với vận tốc

ứng với  $F_n = 0,41$ . Góc nghiêng ban đầu được thiết lập lần lượt là  $5^\circ$ ,  $7,5^\circ$  và  $10^\circ$ . Trường hợp riêng, tàu được gắn thêm vây giảm lắc, đứng yên và với góc lắc ban đầu là  $10^\circ$ .

##### 3.2.1. Thiết lập bề thử ảo

Bề thử ảo được thiết lập với kích thước đủ rộng với mục đích tránh được phản xạ của nước từ thành bể tác động đến mô hình tàu làm ảnh hưởng đến kết quả tính toán. Kích thước của bề thử ảo như mô tả trong Hình 5.

##### 3.2.2. Thiết lập lưới

Ba mô hình lưới được lựa chọn là: lưới bề mặt (surface remesher), lưới giao (trimmer mesh) và lưới lăng trụ (prism layer).

Nghiên cứu này sử dụng phương pháp lưới chồng (overset) để rời rạc hóa miền tính toán với các lưới chồng lên nhau cho phép mô phỏng chuyển động lắc ngang ở góc lắc ban đầu lớn với độ chính xác khá cao. Miền tính toán được chia thành hai miền chính là background bao quanh miền tính toán và overset. Miền overset được thiết lập chuyển động lắc ngang cùng với mô hình. Các miền tính toán và các biên được chỉ ra trong Hình 6. Hình ảnh lưới được thể hiện trong Hình 7.

##### 3.2.3. Điều kiện biên

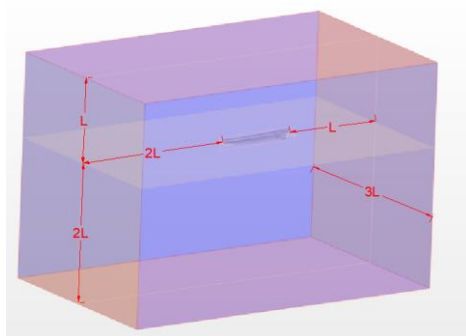
Điều kiện biên được thiết lập cho các thành của bề thử ảo và thân tàu được mô tả trong [20].

##### 3.2.4. Mô hình vật lý và mô hình dòng rối

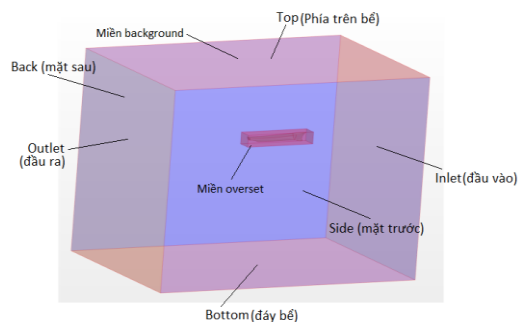
Mô hình vật lý được sử dụng ở đây là chất lỏng thực và phương pháp thể tích chất lỏng (VOF) cho bài toán hai hoặc nhiều pha. Mô hình dòng rối k-ε được sử dụng do có tính hội tụ tốt và thời gian tính toán nhanh.



**Hình 4. Mô hình tàu DTMB 5512**



**Hình 5. Kích thước bề thử ảo**

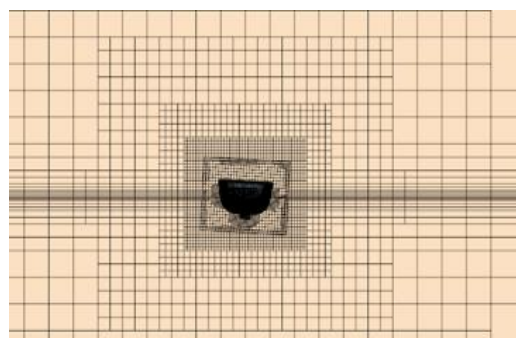


**Hình 6. Miền tính toán và các điều kiện biên**



Bảng 2. Điều kiện biên

Biên	Điều kiện biên	
Miền Background	Inlet	Velocity Inlet
	Outlet	Pressure Outlet
	Top	Velocity Inlet
	Bottom	Velocity Inlet
	Back	Wall
Miền Overset	Side	Wall
	Deck	Wall
	Hull	Wall
	Overset	Overset mesh



Hình 7. Mô hình chia lưới dùng trong mô phỏng

### 3.2.5. Bước thời gian

Bước thời gian được lựa chọn theo khuyến cáo của ITTC [23], được thiết lập là  $\Delta t = 0,01s$  ứng với 1/150 chu kỳ lắc ngang.

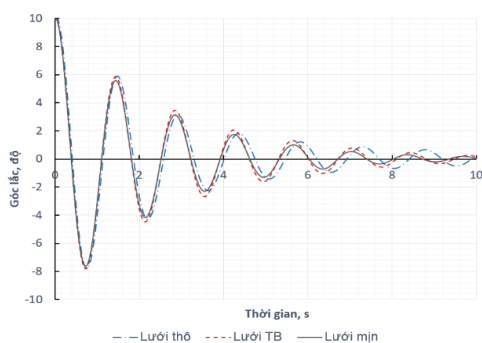
## 4. Kết quả và thảo luận

Các trường hợp tính mô phỏng được đặt tên và cho trong Bảng 4.

### 4.1. Kiểm tra hội tụ lưới

Bảng 3. Chu kỳ lắc ngang với các kích thước lưới

Kích thước lưới	Chu kỳ lắc ngang, s
Lưới thô	1,45
Lưới trung bình	1,43
Lưới mịn	1,43



Hình 8. Kết quả hội tụ lưới với  $\phi = 10^0$  và  $Fn = 0,41$

Ba kích thước lưới cho tính toán: lưới thô (410.164 phần tử), lưới trung bình (988.498 phần tử) và lưới mịn (1.394.932 phần tử). Mô phỏng được thực hiện cho trường hợp tàu có vận tốc ứng với  $Fn = 0,41$ .

$$Fn = V / \sqrt{gL}$$

Trong đó:  $V$  - Vận tốc tàu, (m/s);  $g$  - Gia tốc trọng trường, ( $m/s^2$ );  $L$  - Chiều dài tàu, (m).

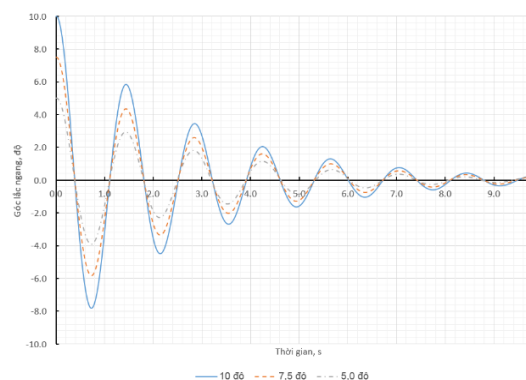
Từ Bảng 3 và công bố [24], lưới trung bình được lựa chọn để chạy mô phỏng cho tất cả các trường hợp.

Bảng 4. Các trường hợp tính toán

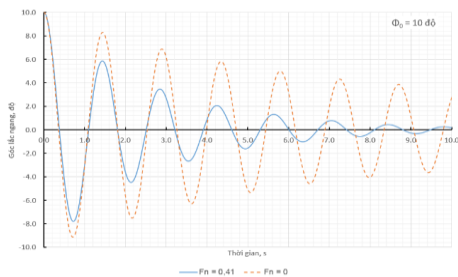
Trường hợp tính	$Fn$	Vây giảm lắc	Góc nghiêng ban đầu $\phi_0$ , độ
TT01	0	Không	5,0
TT02	0	Không	7,5
TT03	0	Không	10,0
TT04	0	Có	10,0
TT05	0,41	Không	5,0
TT06	0,41	Không	7,5
TT07	0,41	Không	10,0

Bảng 5. Chu kỳ lắc ngang của tàu

Trường hợp tính	Chu kỳ lắc CFD, s	Chu kỳ lắc EFD, s	Sai số, %
TT01	1,45	-	-
TT02	1,45	-	-
TT03	1,45	-	-
TT04	1,40	-	-
TT05	1,40	-	-
TT06	1,40	-	-
TT07	1,40	1,46	-



Hình 9. Lắc ngang với các góc nghiêng ban đầu khác nhau ( $Fn=0,41$ )



Hình 10. Lắc ngang tại  $F_n=0$  và  $F_n=0,41$

#### 4.2. Ảnh hưởng của góc lắc ban đầu và vận tốc

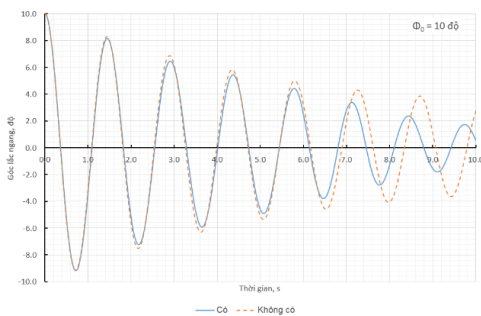
Kết quả mô phỏng với các góc nghiêng ban đầu khác nhau được đưa ra trong Hình 9.

Hình 10 so sánh dao động lắc ngang trong trường hợp tàu đứng yên và khi tàu chạy với  $F_n=0,41$ . Kết quả tính chu kỳ lắc ngang ở các góc lắc ban đầu và vận tốc tới khác nhau được đưa ra trong Bảng 5.

Hình 9 và Bảng 5 cho thấy chu kỳ lắc ngang tự nhiên của tàu có thể coi là không phụ thuộc vào giá trị góc lắc ban đầu nhỏ và phù hợp với kết quả của các nghiên cứu khác. Đồng thời cho thấy, tàu có vận tốc thì chu kỳ lắc ngang của tàu nhỏ hơn so với trường hợp tàu đứng yên và dao động lắc ngang bị dập tắt nhanh hơn.

#### 4.3. Ảnh hưởng của vây giảm lắc

Kết quả mô phỏng được so sánh cho trường hợp tàu không gắn phần nhô được thể hiện trên Hình 11. Hình 12 thể hiện hình ảnh xoáy nước quanh thân tàu khi đứng yên tại thời điểm giữa chu kỳ (chu kỳ lắc thứ 5) của mô hình tàu không có và có gắn vây giảm lắc.

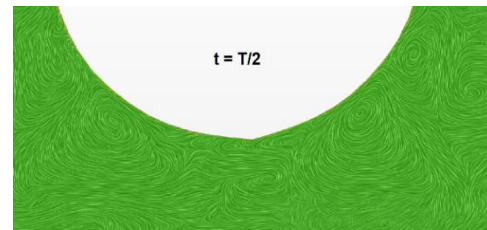


Hình 11. Lắc ngang của tàu có gắn và không gắn vây giảm lắc ( $F_n=0$ )

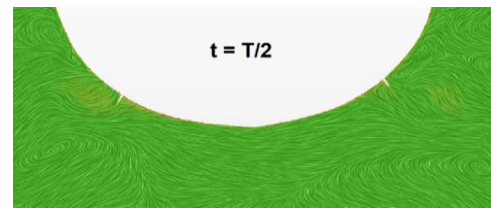
Cường độ xoáy nước tại vị trí vây giảm lắc lớn hơn nhiều so với trường hợp tàu không lắp vây giảm lắc. Điều này giải thích cho việc lực cản lắc ngang trong trường hợp có vây giảm lắc lớn hơn góp phần làm dao động lắc ngang của tàu giảm nhanh và chu kỳ lắc cũng nhỏ hơn so với trường hợp tàu không có vây giảm lắc.

Kết quả áp dụng mô hình hộp xám cho các dữ liệu

mô phỏng lắc ngang tự do của tàu trong 10 giây được thể hiện trong Bảng 6.



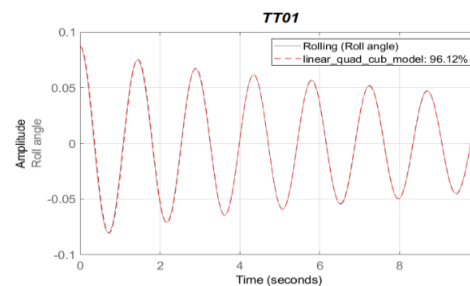
a)



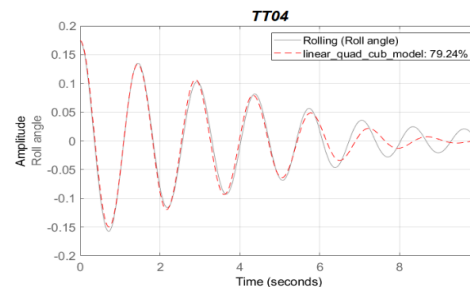
b)

Hình 12. Xoáy nước quanh thân tàu khi không gắn (a) và có gắn (b) vây giảm lắc tại thời điểm giữa chu kỳ

Phương pháp xấp xỉ bằng mô hình hộp xám cho kết quả độ chính xác cao. Trường hợp TT04 kết quả độ chính xác xấp xỉ đạt được gần 80% và kết quả xác định hệ số lực cản lắc ngang có sự khác biệt lớn so với phương pháp năng lượng Froude. Sai số này cho thấy mô hình biểu diễn lực cản lắc ngang của tàu ở dạng đa thức có thể không hoạt động tốt trong trường hợp tàu có vây giảm lắc như nhận định của nghiên cứu [9], [10].



Hình 13. So sánh mô phỏng lắc ngang của tàu theo phương pháp năng lượng Froude và mô hình hộp xám



Hình 14. Kết quả xấp xỉ bằng phương pháp hộp xám với dữ liệu mô phỏng CFD

**Bảng 6. Hệ số lực cản lức ngang và mô-men quán tính khối lượng nước kèm bằng phương pháp mô hình hộp xám**

Trường hợp tính	$I_{xx} + A_{\Phi}$	$B_{1\Phi}$	$B_{2\Phi}$	$B_{3\Phi}$	Độ chính xác xấp xỉ, %
TT01	1,8561	0,8365	-6,1764	14,8513	96,12
TT02	1,8492	-0,6042	4,7514	-5,2392	94,88
TT03	1,8467	-0,2435	2,7721	-2,5464	94,83
TT04	1,8421	3,3273	-11,8705	12,2091	79,24
TT05	1,7453	1,4627	-2,9042	8,0549	95,62
TT06	1,7509	1,1727	0,8634	-1,1640	95,76
TT07	1,7539	1,1069	1,3345	-1,7102	95,77

**Bảng 7. Hệ số lực cản lức ngang theo phương pháp năng lượng Froude và mô hình hộp xám**

Trường hợp tính	Phương pháp năng lượng Froude				Mô hình hộp xám			
	$b_{1\Phi}$	$b_{2\Phi}$	$b_{3\Phi}$	$b_e$	$b_{1\Phi}$	$b_{2\Phi}$	$b_{3\Phi}$	$b_e$
TT01	0,0428	0,0000	1,7193	0,2269	0,4507	-3,3276	8,0014	0,2402
TT02	-0,1600	1,5617	-1,4213	0,2488	-0,3267	2,5695	-2,8333	0,2268
TT03	-0,1451	1,5452	-1,4085	0,2428	-0,1319	1,5011	-1,3789	0,2405
TT04	0,7249	-1,6882	1,5349	0,3082	1,8063	-6,4440	6,6279	0,5684
TT05	0,6273	1,2460	-3,0293	0,7025	0,8381	-1,6640	4,6151	0,7986
TT06	0,5361	1,7150	-2,8067	0,6619	0,6698	0,4931	-0,6648	0,7431
TT07	0,5598	1,2262	-1,5799	0,6493	0,6311	0,7609	-0,9751	0,6890

Nhận thấy, không có sự ổn định trong xu hướng thay đổi về giá trị cũng như dấu của các hệ số lực cản thành phần trong mô hình phi tuyến được áp dụng. Đây là nhược điểm của mô hình lực cản lức ngang của tàu ở dạng đa thức do không cho phép xây dựng được một phương pháp tin cậy để xác định giá trị của các hệ số trong biểu thức (4).

Sự ổn định trong kết quả có thể được nhận thấy trong việc xác định hệ số mô-men quán tính khối lượng nước kèm  $A_{\Phi}$  và phù hợp theo lý thuyết ( $I_{xx}$  không đổi đối với trạng thái tải trọng tính toán). Theo đó, hệ số  $A_{\Phi}$  liên quan trực tiếp với chu kỳ lắc ngang của tàu, có thể coi là không phụ thuộc vào biên độ lắc.

Trong các phương pháp xác định hệ số lực cản lức ngang, phương pháp năng lượng Froude không có hạn chế về độ lớn của lực cản cũng như các thành phần phi tuyến của nó cũng như không đòi hỏi nhiều dữ liệu của các điểm đỉnh hoặc đáy của góc lắc ngang. Do vậy, các kết quả tính toán bằng phương pháp mô hình hộp xám được so sánh với phương pháp năng lượng Froude (Bảng 7).

## 5. Kết luận

Nghiên cứu đã áp dụng thành công phương pháp CFD và kỹ thuật lưới chồng (overset mesh) trong mô phỏng dao động lắc ngang tự do của tàu cho cả hai trường hợp tàu đứng yên và tàu có vận tốc. Tính chính

xác của phương pháp mô phỏng được xác nhận thông qua việc so sánh với dữ liệu thử đối với tàu DTMB5512.

Kết hợp giữa mô phỏng CFD và mô hình hộp xám cho phép ứng dụng trong việc xác định hệ số lực cản phi tuyến lức ngang, thay thế phương pháp thử mô hình với độ chính xác cao. Ngoài ra, phương pháp còn trực tiếp cho phép xác định hệ số mô-men quán tính khối lượng nước kèm  $A_{\Phi}$ .

Kết quả xác định hệ số lực cản lức ngang tương đương  $b_e$  bằng mô hình hộp xám phù hợp với các kết quả xác định bằng phương pháp năng lượng Froude. Tính ứng dụng của phương pháp hộp xám trong trường hợp tàu có vây giảm lắc là hướng cần nghiên cứu tiếp tục của nhóm tác giả.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] IMO, MSC.1/Circ.1200. *Interim Guidelines for Alternative Assessment of the Weather Criterion*, 2006.
- [2] IMO. *The international Code on Intact Stability 2008 (2008 IS Code)*. London, UK. 2009.
- [3] IMO. SDC 7/WP.6. *Finalization of Second Generation Intact Stability Criteria; Report of the Drafting Group on Intact Stability*. London, UK. 2019.
- [4] Froude, W. *On the influence of resistance upon the*

- rolling of ships*. Naval Science, 1: 411-429, 1872.
- [5] Himeno, Y. *Prediction of Ship Roll Damping - A State of the Art*; Technical Report; University of Michigan: Ann Arbor, MI, USA, 1981.
- [6] Kim, Y.; Park, M.J. *Identification of the nonlinear roll damping and restoring moment of a FPSO using Hilbert transform*. Ocean Eng. Vol.109, pp.381-388, 2015.
- [7] W. Froude. *The Papers of William Froude M.A. LL.D. F.R.S. 1810-1879*, chapter On the Rolling of Ships, pp.40-65. The Institution of Naval Architects, 1955.
- [8] ITTC (2011). Numerical Estimation of Roll Damping. Recommended Procedure 7.5-02-07-04.5.
- [9] Lewison, G. *Optimum Design of Passive Roll Stabilizer Tanks*. Naval Architect: pp.31-45, 1976.
- [10] Bulian, G., Francescutto, A., Fucile, F. *Determination of Relevant Parameters for the Alternative Assessment of Intact Stability Weather Criterion on Experimental Basis*. EU-funded Project HYD-III-CEH-5 (Integrated Infrastructure Initiative HYDRALAB III, Contract no. 022441 (RII3)), Department DINMA, University of Trieste, Trieste, Italy, 22 November 2009.
- [11] Ikeda, Yoshiho & Himeno, Yoji & Tanaka, Norio. *Components of Roll Damping of Ship at Forward Speed*. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*. Vol.143. pp.121-133, 1978.
- [12] Aarsæther, KG, Kristiansen, D, Su, B, & Lugni, C. *Modelling of Roll Damping Effects for a Fishing Vessel with Forward Speed*. Proceedings of the ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Volume 11: Prof. Robert F. Beck Honoring Symposium on Marine Hydrodynamics. St. John's, Newfoundland, Canada. May 31-June 5, 2015. V011T12A049. ASME.
- [13] Oortmerssen, G. v. *The Motions of a Moored Ship in Waves*. *Journal of Ship Research*, Vol.4(3). 1976.
- [14] Pinkster, J. A. *Low Frequency Second Order Wave Exciting Forces on Floating Structures*. PhD thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, 1980.
- [15] Huijsmans, R. H. M. *Motions and Drift Forces on Moored Vessels in Current*. PhD thesis, Delft University of Technology, The Netherlands. 1996.
- [16] Himeno, Y. *Prediction of Ship Roll Damping - State of the Art*. Report of Dept. of Naval Architecture & Marine engineering, the University of Michigan, No.239, 1981.
- [17] Ikeda, Y., Himeno, Y., Tanaka, N. *Components of Roll Damping of Ship at Forward Speed*. *Journal of the Society of Naval Architects, Japan* No.143, pp.121-133, 1978.
- [18] Kawahara, Y.,. *Characteristics of Roll Damping of Various Ship Types and a Simple Prediction Formula of Roll Damping on the Basis of Ikeda's Method*. The 4th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics, Taipei, pp.79-86, 2008.
- [19] Bekhit A., Popescu F. *URANSE-Based Numerical Prediction for the Free Roll Decay of the DTMB Ship Model*. *J. Mar. Sci. Eng.* 9, 452, 2021.
- [20] Kianejad S.S. *Numerical Assessment of Roll Motion Characteristics and Damping Coefficient of a Ship*. *J. Mar. Sci. Eng.* 2018.
- [21] Anthony F. Molland - Stephen R. Turnock - Dominic A. Hudson. *Ship Resistance and Propulsion*. Cambridge University Press, 2011.
- [22] [http://www.simman2008.dk/5512/5512\\_geometry.htm](http://www.simman2008.dk/5512/5512_geometry.htm).
- [23] Procedures, I.-R., Guidelines 7.5-03-02-03. *Practical Guidelines for Ship CFD Applications*, Revision, 2011.
- [24] Irvine Jr, M., et al.. *Forward Speed Calm Water Roll Decay for Surface Combatant 5512: Global and Local Flow Measurements*. *Journal of Ship Research* 57(4), 2013.

Ngày nhận bài:	30/6/2021
Ngày nhận bản sửa:	05/8/2021
Ngày duyệt đăng:	17/8/2021