

KHOA HỌC - CÔNG NGHỆ

MÔ PHỎNG TÍNH TOÁN GIẢM XÂM THỰC CHONG CHÓNG
ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ LỖ HỔNG ÁP SUẤT
NUMERICAL SIMULATION ON CAVITATION REDUCTION OF PROPELLER
BY EMPLOYING PRESSUREPORES TECHNOLOGY

HOÀNG THỊ MAI LINH*,
LÊ THANH BÌNH, BÙI THANH DANH
Khoa Đóng tàu, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
*Email liên hệ: linhhtm.dt@vamaru.edu.vn

Tóm tắt

Bài báo dự đoán kết quả giảm xâm thực ứng dụng công nghệ lỗ hồng áp suất và ảnh hưởng của việc khoan lỗ trên cánh đến sự thay đổi hiệu suất của chong chóng tàu biển bằng phương pháp CFD. Mô hình chong chóng được sử dụng trong nghiên cứu là Potsdam Propeller Test Case (PPTC). Từ kết quả thu được, bài báo phân tích những thay đổi trong phân bố áp suất, độ nhớt rối và cấu trúc xoáy xung quanh cánh chong chóng trước và sau sửa mô hình nhằm làm rõ nguyên nhân giảm xâm thực cũng như sự thay đổi hiệu suất chong chóng.

Từ khóa: Chong chóng, giảm xâm thực, hiệu suất, lỗ hồng áp suất, phương pháp số.

Abstract

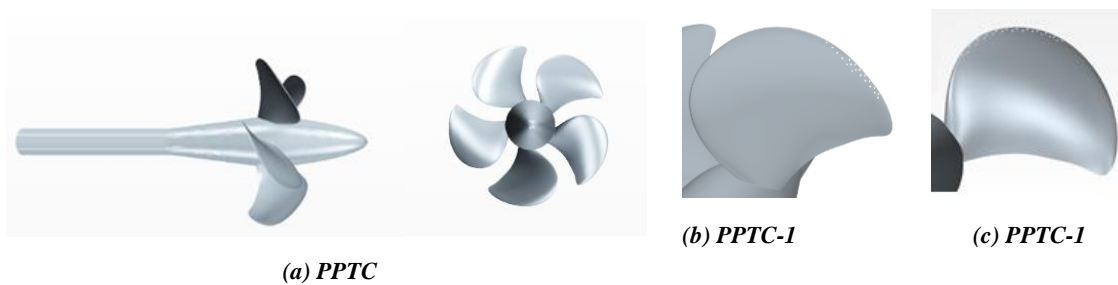
This paper predicts the mitigation of marine propeller cavitation by employing PressurePores technology and the effects on its performance by CFD method. The propeller model used in the research is Potsdam Propeller Test Case (PPTC). Based on the received results, this paper analyses the changes in pressure distribution, turbulent viscosity, and vorticity around propeller blades of original and modified models to clarify the causes of the decrease in cavitation and the difference in the propeller efficiency.

Keywords: Propeller, cavitation production, performance, PressurePores, numerical method.

1. Mở đầu

Yêu cầu trong việc thiết kế chong chóng tàu biển có xu hướng ngày càng tăng cả về số lượng và chất lượng. Bên cạnh mục tiêu nâng cao hiệu quả thủy động lực học của chong chóng, yêu cầu giảm xâm thực và những tác động xấu của nó đến hoạt động của tàu biển và môi trường sinh thái biển cũng

cần được nghiên cứu và đánh giá. Xâm thực làm giảm hiệu suất chong chóng, gây ra ăn mòn, tạo rung động và tiếng ồn. Vì vậy các giải pháp giảm xâm thực đã và đang được quan tâm nghiên cứu tại nhiều nước trên thế giới nói chung và Việt Nam nói riêng. Trong những năm gần đây, đã có rất nhiều nghiên cứu về giải pháp giảm xâm thực chong chóng, được thực hiện chủ yếu bằng hai phương pháp thử nghiệm và mô phỏng số. Nhằm mục đích giảm xâm thực, ngoài các giải pháp thay đổi hình dáng chong chóng (nhóm 1) bao gồm thay đổi số cánh, diện tích cánh, góc quắm, bước chong chóng, dạng mép cánh và tiết diện cánh,... Các nghiên cứu còn đề xuất những công nghệ và thiết bị khác nhau (nhóm 2) như công nghệ phun tia nước, tạo lỗ hồng áp suất, tạo độ nhám trên bề mặt cánh, sử dụng mũ chong chóng,... Các nghiên cứu [1-3] sử dụng phương pháp số và thử nghiệm, đánh giá hiệu quả giảm xâm thực khi tăng độ quắm của chong chóng. Một hệ các thông số của chong chóng, bao gồm bước chong chóng, dạng mép cánh và mặt cắt cánh được thay đổi trong nghiên cứu của S. Gaggero và cộng sự [4, 5]. Kết quả thu được bằng phương pháp CFD cho thấy xâm thực trên bề mặt cánh giảm khoảng 60%-80%, đồng thời hiệu suất chong chóng tăng 0,5%-3% [5]. Trong nhóm giải pháp thứ 2, sử dụng phương pháp số, K. Mizzi và cộng sự [6] thực hiện tối ưu hóa thiết kế chong chóng gắn mũ, kết quả đã giảm xâm thực của chong chóng và cải thiện hiệu suất khoảng 1,3%. Giảm xâm thực của chong chóng bằng “Công nghệ lỗ hồng áp suất” (PressurePores technology) là sản phẩm của dự án cùng tên được thực hiện bởi Đại học Strathclyde và Công ty TNHH Oscar Propulsion. Tham gia vào dự án này, Aktas và cộng sự [7] nghiên cứu mô hình chong chóng của tàu “The Princess Royal”, kết quả tính toán mô phỏng và thử nghiệm thu được xâm thực chong chóng giảm khoảng 20% và hiệu suất chong chóng giảm từ 2%-6%.



Hình 1. Hình học chong chóng

Bài báo ứng dụng công nghệ lỗ hồng áp suất cho mô hình chong chóng PPTC nhằm đánh giá hiệu quả giảm xâm thực và ảnh hưởng của giải pháp này đến đặc trưng thủy động lực học chong chóng đối với hai vị trí lỗ hồng khác nhau trên cánh bằng phương pháp CFD (computational fluid dynamic) với sự hỗ trợ của phần mềm thương mại STAR-CCM+. Ngoài ra, nghiên cứu cũng phân tích sự thay đổi của phân bố áp suất, độ nhớt rối và cường độ xoáy xung quanh chong chóng trước và sau khi sửa mô hình, để giải thích rõ hơn cho các kết quả thu được.

2. Mô hình chong chóng và các điều kiện tính toán

2.1. Đặc điểm mô hình chong chóng

Nghiên cứu sử dụng mô hình chong chóng Potsdam Propeller Test Case (PPTC). Mô hình PPTC được sản xuất và thử nghiệm tại bể thử Potsdam, Hà Lan. Nhóm tác giả lựa chọn chong chóng này bởi PPTC là mô hình chong chóng tiêu chuẩn dùng tham chiếu các kết quả nghiên cứu, để kiểm tra và đánh giá độ tin cậy của các mô phỏng số. Mô hình chong chóng PPTC có 5 cánh, đường kính $D = 0,25\text{m}$ và có chiều quay phải. Các thông số chính của mô hình và kết quả thử nghiệm đã được công bố tại hội thảo chế tạo chong chóng - Hội nghị quốc tế lần thứ 2 về chong chóng tàu biển năm 2011 [8]. Hình dáng của chong chóng PPTC được thể hiện ở Hình 1(a).

2.2. Các trường hợp tính toán

Nhóm tác giả ứng dụng công nghệ lỗ hồng áp suất nhằm giảm xâm thực của chong chóng PPTC. Hai vị trí lỗ hồng khác nhau được thực hiện trong nghiên cứu, bao gồm các vị trí gắn mút cánh (PPTC-1) và gắn mép đập (PPTC-2) như biểu diễn ở Hình 1.(b) và (c). Tại mỗi vị trí, trên bề mặt cánh sẽ khoan 20 lỗ hồng hình trụ có đường kính 1mm.

2.3. Điều kiện tính toán

Điều kiện tính toán mô phỏng xâm thực mô hình PPTC được thiết lập theo điều kiện hoạt động của chong chóng, bao gồm: Bước tương đối $J = 1,019$; số vòng quay $n = 24,987\text{vòng/s}$; số xâm thực $\sigma_n =$

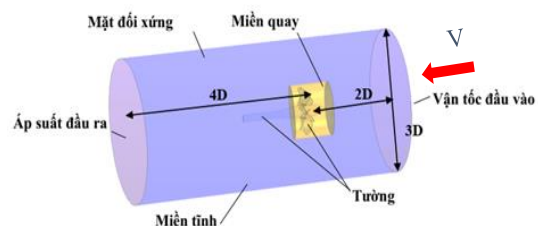
2,024; trọng lượng riêng và độ nhớt động học của nước lần lượt là $\rho_n = 997,44\text{kg/m}^3$ và $\nu_n = 9,337 \cdot 10^{-7}\text{m}^2/\text{s}$; trọng lượng riêng và độ nhớt động học của hơi nước lần lượt là $\rho_{hn} = 0,022\text{kg/m}^3$ và $\nu_{hn} = 9,81 \cdot 10^{-9}\text{m}^2/\text{s}$; áp suất hơi nước bão hòa $P_{sat} = 2873\text{ Pa}$ [8]. Áp suất trong ống thử xâm thực ảo P được tính toán và thiết lập theo công thức sau [9]:

$$P = P_{sat} + 0.5\sigma_n\rho(nD)^2 \quad (1)$$

3. Thiết lập mô phỏng tính toán

3.1. Kích thước miền tính toán và các điều kiện biên

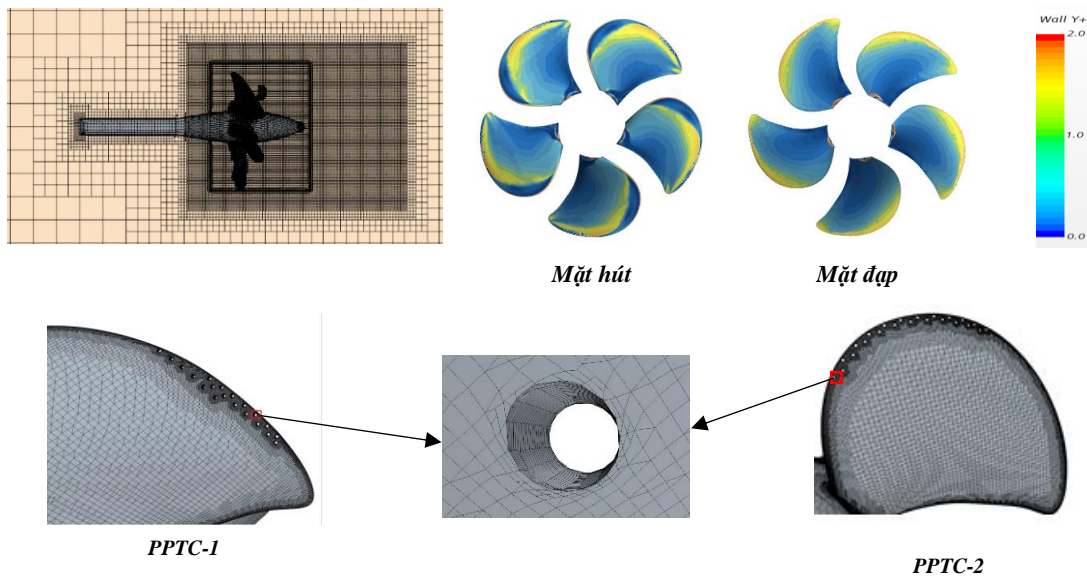
Miền tính toán trong mô phỏng xâm thực chong chóng là các lăng trụ tròn như biểu diễn ở Hình 2, bao gồm miền tính và miền quay có đường kính lần lượt là 3D và 1,12D. Chong chóng được đặt trong miền tính toán với vị trí được xác định như sau: khoảng cách từ tâm của chong chóng tới đầu vào và đầu ra của miền tính toán lần lượt là 2D và 4D theo khuyến nghị được đưa ra bởi ITTC [10]. Các điều kiện biên gồm có: Vận tốc tại đầu vào, áp suất tại đầu ra, mặt đối xứng cho thành ống thử ảo, tường không trượt đối với chong chóng. Kích thước miền tính toán và các điều kiện biên được thể hiện trong Hình 2.



Hình 2. Kích thước miền tính toán và các điều kiện biên

3.2. Tạo lưới

Trong mô phỏng này, lưới của miền tính toán được tạo nên từ 3 loại lưới khác nhau, bao gồm lưới bề mặt để chia bề mặt chong chóng thành các bề mặt hữu hạn, lưới lục diện để chia nhỏ miền chất lỏng thành các phần tử hữu hạn và lưới lăng trụ mô phỏng sự phát triển của lớp biên gần bề mặt chong chóng. Thiết lập



Hình 3. Kết quả tạo lưới và giá trị Y^+

Bảng 1. So sánh đặc trưng thủy động lực học của các chong chóng đã thay đổi với chong chóng ban đầu

Đặc trưng thủy động lực học	PPTC [11] (1)	PPTC-1 (2)	PPTC-2 (3)	Sai khác giữa (1) và (2) %	Sai khác giữa (1) và (3) %
K_T	0,387	0,375	0,373	- 3,1	-3,6
$10K_Q$	0,966	0,958	0,950	- 0,8	-1,6
η_o	0,649	0,634	0,637	- 2,3	-1,8

kích thước phần tử lưới nhỏ tại các vị trí bề mặt cánh, chân cánh, mút cánh và các lỗ hồng giúp giảm tổng số phần tử lưới, đồng thời đảm bảo độ tin cậy của kết quả. Lưới thể tích được tạo ra có gần 17 triệu phần tử lưới, giá trị y^+ được đảm bảo nhỏ hơn 2 (xem Hình 3).

3.3. Lựa chọn các mô hình vật lý và bước thời gian tính toán

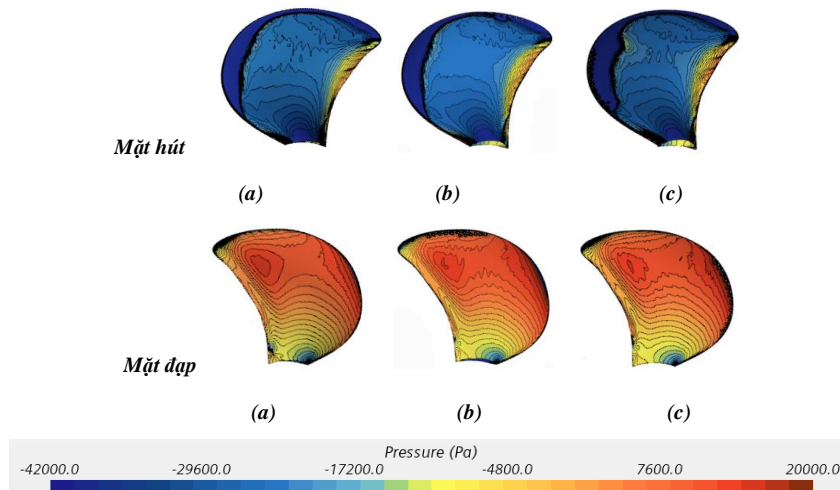
Tính toán mô phỏng xâm thực chong chóng trong dòng chảy không ổn định được thực hiện bằng phương pháp RANS (Reynolds - Averaged Navier-Stokes). Bài báo sử dụng mô hình SST K - Omega (Shear Stress Transport K - Omega) để giải ứng suất Reynold đối với dòng chảy rối, áp dụng phương pháp thể tích chất lỏng, mô hình đa pha đồng nhất và mô hình xâm thực Schnerr - Sauer để mô phỏng pha nước và hơi nước trong dòng chảy xâm thực [11]. Các đặc trưng của pha nước và hơi nước đã được trình bày trong mục 2.2. Trong nghiên cứu này, hệ số thể tích nước và hơi nước lần lượt là 0,2 và 0,8; bước thời gian tính toán được thiết lập $\Delta t = 2 \cdot 10^{-4}$ s [12].

4. Kết quả và thảo luận

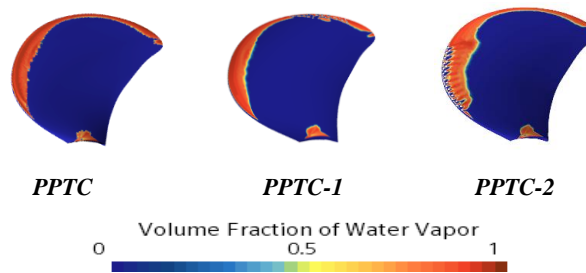
Kết quả tính toán mô phỏng xâm thực chong chóng PPTC-1 và PPTC-2 bằng phương pháp CFD được so sánh với mô hình PPTC ban đầu. Đặc trưng thủy động lực học bao gồm hệ số lực đẩy K_T , hệ số mô men K_Q và hệ số hiệu suất η_o của chong chóng trước và sau thay đổi tại điều kiện hoạt động ứng với bước tương đối $J = 1,019$ được trình bày trong Bảng 1. Các thông số thủy động lực học của chong chóng PPTC-1 và PPTC-2 đều giảm so với mô hình PPTC nguyên mẫu. Trong đó, hiệu suất chong chóng giảm 2,3% đối với PPTC-1 và 1,8% đối với PPTC-2. Hình 4 thể hiện phân bố áp suất trên mặt hút và mặt đập của các chong chóng. Áp suất trên mặt hút của hai mô hình chong chóng sau sửa đổi tăng, ngược lại trên mặt đập áp suất giảm so với chong chóng ban đầu. Phân bố áp suất trên bề mặt cánh của mô hình PPTC-1 và PPTC-2 có khác biệt nhỏ do vị trí khoan lỗ trên cánh khác nhau. Sự giảm chênh lệch áp suất giữa mặt hút và mặt đập của chong chóng PPTC-1 và PPTC-2 dẫn đến giảm

hiệu suất của chúng so với chong chóng ban đầu. Xâm thực trên bề mặt cánh của các chong chóng trước và sau sửa đổi được so sánh ở Hình 5. So với chong chóng ban đầu, xâm thực trên cánh chong chóng PPTC-1 thay đổi

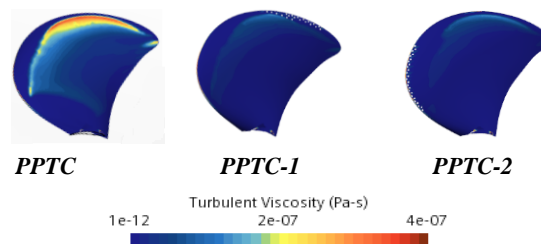
không đáng kể, trong khi đó xâm thực trên bề mặt cánh mô hình PPTC-2 tăng lên tại mép đập (khu vực khoan các lỗ hồng). Hình 6 cho thấy các lỗ hồng làm giảm mạnh độ nhớt rối trên mặt hút chong chóng PPTC-1 và PPTC-2



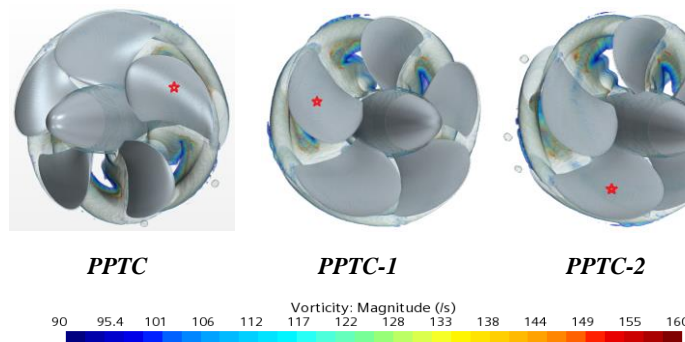
Hình 4. So sánh phân bố áp suất trên bề mặt cánh chong chóng: (a)PPTC [11], (b)PPTC-1, (c)PPTC-2



Hình 5. So sánh xâm thực trên cánh chong chóng



Hình 6. So sánh độ nhớt rối trên cánh chong chóng



Hình 7. So sánh cường độ xoáy xung quanh cánh chong chóng

so với mô hình PPTC ban đầu. Phân bố nhót rói trên mặt hút chong chóng PPTC-1 và PPTC-2 có sự khác biệt nhỏ do vị trí khoan lỗ trên cánh khác nhau. Độ nhót rói giảm tạo điều kiện cho dòng chảy phát triển, từ đó hình thành các cấu trúc xoáy. Các cấu trúc xoáy được tạo ra góp phần hạn chế xoáy mút cánh, tuy nhiên chúng cũng làm tăng xâm thực trên bề mặt cánh (xem Hình 5). Hình 7 biểu diễn cường độ xoáy xung quanh các chong chóng. Các mô hình PPTC-1 và PPTC-2 có cường độ xoáy nhỏ hơn chong chóng ban đầu, cho thấy xâm thực xoáy mút cánh của chong chóng đã giảm. Phân bố cường độ xoáy xung quanh chong chóng PPTC-1 và PPTC-2 có rất ít sự khác biệt.

Các kết quả thu được cho thấy mức độ giảm xâm thực xoáy mút cánh và giảm hiệu suất của 2 mô hình PPTC-1 và PPTC-2 gần bằng nhau. Tuy nhiên, xâm thực trên bề mặt cánh chong chóng PPTC-2 lớn hơn so với PPTC-1. Vì vậy, phương án lỗ hồng áp suất gần mút cánh (PPTC-1) hiệu quả hơn trong giảm xâm thực và đảm bảo hiệu suất chong chóng so với phương án lỗ hồng áp suất gần mép đập (PPTC-2).

5. Kết luận

Nghiên cứu đã áp dụng thành công giải pháp giảm xâm thực bằng công nghệ lỗ hồng áp suất cho mô hình PPTC. Bài báo sử dụng phương pháp CFD tính toán đặc trưng thủy động lực học chong chóng và mô phỏng thay đổi của phân bố áp suất, xâm thực, độ nhót rói và cường độ xoáy xung quanh chong chóng; từ đó đánh giá định tính xâm thực xoáy mút cánh của chong chóng đã giảm so với mô hình ban đầu, định lượng hiệu suất chong chóng giảm khoảng 2%.

Tuy nhiên, bài báo chưa mô phỏng được xâm thực xoáy mút cánh chong chóng. Trong các nghiên cứu tiếp theo, nhóm tác giả sẽ cải thiện lưới mịn hơn, nâng cao độ tin cậy của kết quả tính toán mô phỏng và phân tích định lượng mức giảm xâm thực xoáy mút cánh của chong chóng.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT22-23.28**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Chunyu Guo, Jian Hu, Weipeng Zhang, Chao Wang, Shili Sun (2021), *Impact of skew on propeller tip vortex cavitation*. Ocean Engineering, Vol.220.

[2] Zhu Z.F. (2013), *Numerical study of the effect of propellers skew on cavitation performance*. Advanced Materials Research, Vol.705, pp.405-409.

[3] Ji B., Luo X., Wu Y. (2014), *Unsteady cavitation characteristics and alleviation of pressure fluctuations around marine propellers with different skew angles*. J. Mech. Sci. Technol. Vol.28(4), pp.1339-1348.

[4] S. Gaggero, D. Bertetta, S. Brizzolara, M. Viviani, L. Savio (2012), *CPP propeller cavitation and noise optimization at different pitches with panel code and validation by cavitation tunnel measurements*. Ocean Engineering, Vol.53, pp.177-195.

[5] S. Gaggero, G. Vernengo, D. Villa, L. Bonfiglio (2019), *A reduced order approach for optimal design of efficient marine propellers*. Ship and Offshore Structures, Vol.14.

[6] K. Mizzi, Y. K. Demirel, C. Banks, O. Turan, P. Kaklis, M. Atlar (2017), *Design optimization of propeller boss cap fins for enhanced propeller performance*. J. Ocean Research, Vol. 62, pp.210-222.

[7] B. Aktas, N. Yilmaz, M. Atlar, N. Sasaki, P. Fitzsimmons, D. Taylor (2020), *Suppression of tip vortex cavitation noise of propellers using PressurePores™ technology*. J. Mar. Sci. and Eng. , Vol.158.

[8] Heinke, H.-J. (2011), *Potsdam Propeller Test Case (PPTC), Cavitation Tests with the Model Propeller VP1304, Report 3753*, Potsdam.

[9] Naz Yilmaz, Mehmet Atlar, Mahdi Khorasanchi (2019), *An improved Mesh Adaption and Refinement approach to Cavitation Simulation (MARCS) of propellers*, Journal Ocean Engineering, Vol.171, pp.139-150.

[10] ITTC (2014), *ITTC- Recommended Procedures and Guidelines*, 7.5-03-03-01.

[11] Hoàng Thị Mai Linh, Lê Thanh Bình (2022), *Mô phỏng tính toán ảnh hưởng của xâm thực đến hiệu suất chong chóng tàu thủy*, Tạp chí Cơ khí Việt Nam, Số 296, tr.682-689.

[12] Hoàng Thị Mai Linh, Nguyễn Thị Hải Hà, Nguyễn Thị Hà Phương (2022), *Nghiên cứu hiện tượng xâm thực của mô hình chong chóng PPTC sử dụng phần mềm STAR-CCM+*, Đề tài nghiên cứu khoa học cấp Trường năm học 2021-2022, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam.

Ngày nhận bài:	13/03/2023
Ngày nhận bản sửa:	06/04/2023
Ngày duyệt đăng:	16/04/2023