

# NGHIÊN CỨU TÍNH TOÁN XÂM THỰC CHONG CHÓNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP CFD

## NUMERICAL INVESTIGATION ON PROPELLER CAVITATION BY CFD METHOD

HOÀNG THỊ MAI LINH\*,  
NGUYỄN THỊ HẢI HÀ, NGUYỄN THỊ HÀ PHƯƠNG

Khoa Đóng tàu, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

\*Email liên hệ: linhhtm.dt@vimaru.edu.vn

### Tóm tắt

Mục đích của nghiên cứu là dự đoán các đặc tính thủy động lực học của chong chóng khi bị xâm thực và mô phỏng hình ảnh xâm thực trên bề mặt cánh chong chóng sử dụng phương pháp thủy động lực học tính toán (CFD). Bài báo trình bày kết quả tính toán và mô phỏng hiện tượng xâm thực của mô hình chong chóng Potsdam Propeller Test Case (PPTC) ở 3 điều kiện làm việc khác nhau. Kết quả thu được của nghiên cứu rất gần với kết quả thử mô hình đã được công bố, qua đó khẳng định độ tin cậy của kết quả tính toán và mô phỏng.

**Từ khóa:** Xâm thực, chong chóng, CFD.

### Abstract

The main purpose of the study is to predict propeller performance in cavitating condition and simulated features of cavitation on the blades using Computational Fluid Dynamics (CFD) methods. The paper presents the results of cavitation modelling for Potsdam Propeller Test Case (PPTC) in 3 different working points. Received results in this research agreed with the experimental results fairly well, thereby confirming the reliability of calculation and simulation results.

**Keywords:** Cavitation, propeller, CFD.

## 1. Mở đầu

Xâm thực là hiện tượng phức tạp, gây ra một số vấn đề cho hoạt động của chong chóng tàu thủy như: làm ảnh hưởng đến hiệu suất chong chóng, ăn mòn cánh chong chóng, tạo rung động và tiếng ồn [1]. Để giảm thiểu những tác động tiêu cực của xâm thực đến hiệu suất chong chóng và tốc độ tàu, trong quá trình thiết kế có thể tính toán và dự báo xâm thực ở một số chế độ làm việc.

Ngày nay, với tốc độ phát triển mạnh mẽ của công nghệ máy tính, nghiên cứu xâm thực bằng phương pháp số không chỉ đảm bảo độ tin cậy kết quả mà còn khẳng định được những ưu điểm vượt trội như tiết kiệm thời gian, giảm chi phí thiết kế, thử nghiệm và chế tạo. Trong nghiên cứu hiện tượng xâm thực bằng CFD, các nhà khoa học sử dụng nhiều phương pháp khác nhau như phương pháp phần tử biên (BEM), phương pháp Reynolds - Averaged Navier-Stokes (RANS), phương pháp Detached Eddy Simulations (DES) và phương pháp Large Eddy Simulations (LES). Trong nghiên cứu của các tác giả: Young và Kinnas [2], Vaz và Bosschers [3] sử dụng phương pháp BEM mô phỏng xâm thực dạng tấm trên cánh chong chóng. Nghiên cứu của Stefano Gaggero và cộng sự [4] kết hợp cả 2 phương pháp BEM và RANS tính toán hiệu suất chong chóng, xác định phân bố áp suất vùng xung quanh chong chóng, mô phỏng xâm thực chong chóng nhằm mục đích tối ưu hóa thiết kế chong chóng tàu cao tốc làm tăng hiệu suất và giảm xâm thực. Để tính toán hiệu suất chong chóng và mô hình hóa xâm thực dạng tấm và mút cánh Naz Yilmaz và cộng sự [1], [5] sử dụng DES, trong khi Xin Chang và cộng sự [6] sử dụng phương pháp LES. Trong nghiên cứu của Artur K. Lidtke và cộng sự [7] kết quả mô phỏng xâm thực dạng tấm và đám mây của chong chóng thu được bằng phương pháp RANS; mô phỏng xâm thực của cánh thủy lực sử dụng phương pháp LES. Tuy nhiên kết quả của những nghiên cứu này vẫn còn những hạn chế như: Sai số lớn giữa kết quả CFD và thử mô hình, cụ thể 8,5%-10,9% [4]; 9%-28% [5]; chỉ đưa ra kết quả tại một điều kiện làm việc của chong chóng [4, 5, 7], một vài nghiên cứu không so sánh kết quả CFD với kết quả thử nghiệm [6], chưa đề cập đến việc đánh giá chất lượng lưới tại lớp biên của bề mặt chong chóng. Trong khi đó, tại Việt Nam nghiên cứu về xâm thực chong chóng còn rất hạn chế. Nghiên cứu của TS. Vũ Văn Duy [8] sử dụng BEM mô phỏng xâm thực trên cánh thủy lực, kết quả mô phỏng xâm thực không được so sánh với kết quả thử nghiệm. Trong

**Bảng 1. Các thông số chính của mô hình PPTC**

Thông số	Kí hiệu	Kích thước	Đơn vị
Đường kính	$D$	0,25	m
Tỉ số bước tại $r/R=0,7$	$P_{0,7}/D$	1,635	-
Tỉ số đĩa	$A_E/A_0$	0,77896	-
Chiều rộng cánh tại $r/R=0,7$	$c_{0,7}$	0,10417	m
Tỉ lệ đường kính củ	$d_h/D$	0,3	-
Số cánh		5	-
Chiều quay		Phải	-
Loại chong chóng		Có bước thay đổi	-

**Bảng 2. Các trường hợp tính và mô phỏng**

Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Các trường hợp tính và mô phỏng		
			TH1	TH2	TH3
Bước tiến tương đối	J	-	1,019	1,269	1,408
Số vòng quay	n	vòng/s	24,987	24,986	25,014
Số xâm thực	$\sigma_n$	-	2,024	1,424	2,000
Khối lượng riêng của nước	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	997,44	997,44	997,37
Độ nhớt động học của nước	$\nu$	m <sup>2</sup> /s	$9,337 \cdot 10^{-7}$	$9,337 \cdot 10^{-7}$	$9,272 \cdot 10^{-7}$
Áp suất hơi bão hòa	$P_v$	Pa	2873	2873	2926

nghiên cứu của TS. Lê Thị Thái [9], đặc tính thủy động lực học của chong chóng xâm thực, phân bố áp suất trên mặt cánh được tính toán và xâm thực dạng tấm của chong chóng được mô phỏng bằng phương pháp RANS; phân bố áp suất và xâm thực trên cánh thủy lực được mô phỏng bằng cả 2 phương pháp RANS và LES. Trong nghiên cứu [9] kết quả mô phỏng xâm thực chong chóng bằng RANS được so sánh với kết quả thử mô hình, tuy nhiên sai số của kết quả còn khá lớn (trung bình khoảng 13%). Ngoài ra, những nghiên cứu này chưa đề cập đến chất lượng lưới tại lớp biên của bề mặt chong chóng sau khi thiết lập lưới, đồng thời chỉ tính toán mô phỏng cho một điều kiện làm việc của mô hình.

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sẽ tiến hành mô phỏng tính toán xâm thực của chong chóng bằng phương pháp CFD với sự hỗ trợ của phần mềm thương mại STAR-CCM+. Bài báo trình bày kết quả dự đoán đặc tính thủy động lực học chong chóng khi bị xâm thực và hình ảnh xâm thực trên bề mặt cánh ở 3 điều kiện làm việc khác nhau.

## 2. Mô phỏng chong chóng xâm thực

### 2.1. Đặc điểm của mô hình chong chóng nghiên cứu

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 mô hình

Potsdam, nhằm mục đích cung cấp số liệu thử nghiệm phục vụ cho việc kiểm tra và đánh giá các kết quả mô phỏng số. Kết quả thử mô hình chong chóng PPTC đã được công bố tại hội thảo chế tạo chong chóng của Hội nghị quốc tế lần thứ 2 về chong chóng tàu biển năm 2011 [10]. Hình 1 thể hiện hình dáng của chong chóng và Bảng 1 đưa ra các thông số chủ yếu của nó.



**Hình 1. Hình dáng mô hình chong chóng PPTC**

### 2.2. Các trường hợp tính và mô phỏng

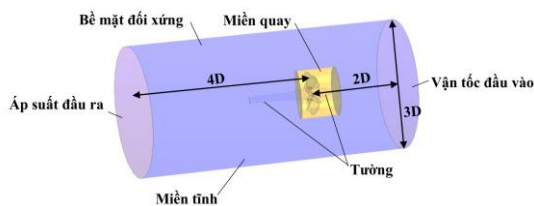
Bài báo tiến hành nghiên cứu xâm thực chong chóng ở 3 điều kiện làm việc khác nhau, tương ứng với 3 trường hợp tính toán mô phỏng được trình bày cụ thể trong Bảng 2.

Trong nghiên cứu này, bước thời gian tính toán được thiết lập bằng  $\Delta t = 10^{-4}$  s (chong chóng quay  $0,9^\circ$ /mỗi bước thời gian  $\Delta t$ ) theo khuyến nghị của ITTC [11], hệ số thể tích nước là  $\alpha_{nước} = 0,2$  và hệ số thể tích hơi nước bão hòa là  $\alpha_{hơi nước} = 0,8$ ; các thông số khác được thiết lập như trong Bảng 2.

### 2.3. Thiết lập tính và mô phỏng

#### 2.3.1. Kích thước miền tính toán và các điều kiện biên

Miền tính toán trong mô phỏng xâm thực chong chóng được thể hiện ở Hình 2. Miền tính toán được chia làm hai: Miền tĩnh và miền quay. Chong chóng được đặt đồng trục với lăng trụ miền tính toán, khoảng cách theo hướng trục từ đầu vào và đầu ra của miền tính toán tới tâm chong chóng lần lượt là 2D và 4D dựa theo khuyến nghị được đưa ra bởi ITTC [11]. Các điều kiện biên được thiết lập như sau: Vận tốc tại đầu vào, áp suất tại đầu ra, bề mặt miền chất lỏng tính toán là mặt đối xứng, bề mặt chong chóng, củ và trục chong chóng đều là tường không trượt. Miền tính toán và điều kiện biên được thể hiện cụ thể ở Hình 2.



Hình 2. Miền tính toán và điều kiện biên

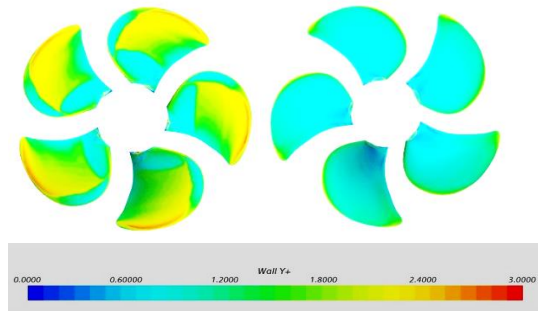
#### 2.3.2. Tạo lưới

Trong mô phỏng xâm thực chong chóng, nhóm tác giả sử dụng 3 loại lưới. Miền chất lỏng tính toán được chia ra thành các thể tích hữu hạn bằng loại lưới lục diện, lưới lăng trụ được sử dụng để giải lớp biên bao quanh chong chóng và lưới bề mặt dùng để chia bề mặt chong chóng thành các phần tử hữu hạn. Lưới của lớp biên gần bề mặt chong chóng được làm mịn với mức độ khác nhau, đặc biệt tại bề mặt cánh, chân cánh và mép cánh nhằm mục đích mô hình hóa chính xác dòng chảy tại đây. Số lớp lưới lăng trụ được thiết lập là 25 lớp, độ cao của lớp lưới lăng trụ đầu tiên tính từ bề mặt chong chóng được tính gần đúng là  $6 \cdot 10^{-7}$  m, giá trị  $y^+$  được đảm bảo nhỏ hơn 3 (xem Hình 3). Sau khi thiết lập lưới thu được tổng số phần tử lưới là 9,60 triệu phần tử. Hình 4 biểu diễn kết quả tạo lưới.

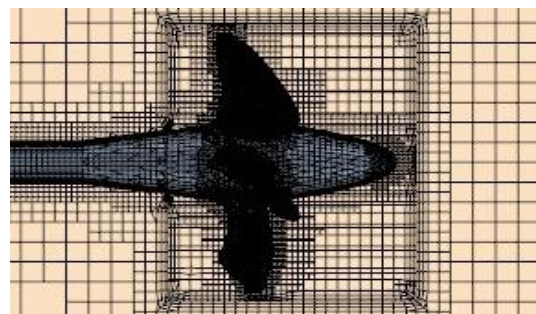
#### 2.3.3. Lựa chọn mô hình vật lý

Nghiên cứu sử dụng phương pháp CFD dựa trên phương trình RANS cho dòng chảy không ổn định để tính toán dòng chảy bao quanh chong chóng ứng dụng phần mềm STAR-CCM+. Ứng suất Reynold được giải bằng mô hình SST K-Omega (Shear Stress Transport K-Omega) bởi theo [12] mô hình SST K-Omega giải lớp biên hiệu quả hơn mô hình K-Epsilon. Trong tính toán mô phỏng lựa chọn mô hình xâm thực Schnerr-Sauer, áp dụng mô hình đa pha đồng nhất và phương pháp thể tích chất lỏng (VOF) để mô phỏng pha nước và hơi nước trong dòng chảy xâm thực. Phương trình

toán học của các mô hình vật lý nêu trên được trình bày chi tiết trong tài liệu phần mềm STAR-CCM+ [13].



Hình 3. Giá trị  $y^+$



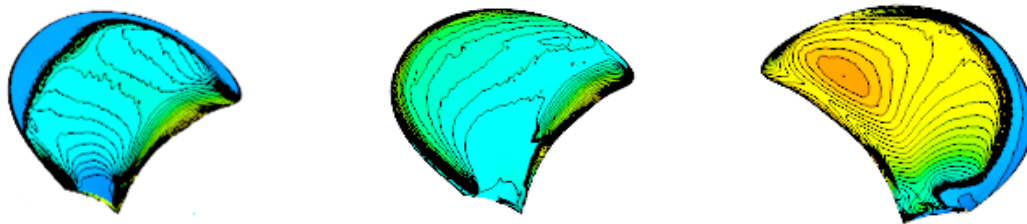
Hình 4. Kết quả tạo lưới

## 3. Kết quả tính và mô phỏng

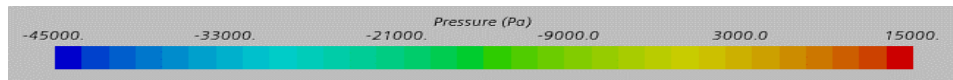
Kết quả tính toán đặc tính thủy động lực học của mô hình chong chóng PPTC ở điều kiện xâm thực sử dụng phương pháp CFD cho từng trường hợp tính và mô phỏng được đưa ra ở Bảng 3, trong đó kết quả tính bằng CFD được so sánh với kết quả thử mô hình. Bảng 3 cho thấy, kết quả tính toán bằng CFD tương đối phù hợp với kết quả thử mô hình. Sai lệch giữa kết quả CFD và kết quả thử nghiệm không quá 6%. So sánh với kết quả tính toán mô hình chong chóng PPTC bằng phương pháp số trong nghiên cứu của Naz Yilmaz và cộng sự [5], sai số tính được nằm trong khoảng 9% - 28%. Như vậy, các giá trị thu được từ nghiên cứu này có sai số thấp hơn, hay nói cách khác kết quả tính toán của nhóm tác giả đưa ra ở đây đáng tin cậy hơn.

Phân bố áp suất trên bề mặt cánh chong chóng được thể hiện ở Hình 5. Đối với trường hợp 1, vùng áp suất thấp trên bề mặt cánh tập trung tại chân cánh và mép đập. Ở trường hợp 2, áp suất thấp phát triển từ chân cánh tới giữa cánh. Còn trong trường hợp 3, áp suất thấp phân bố tại 1 phần chân cánh và mép đập.

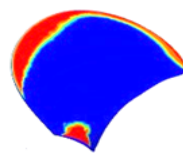
Hình 6 so sánh kết quả mô phỏng hình ảnh xâm thực trên bề mặt cánh chong chóng PPTC bằng phương pháp số với kết quả thử mô hình đối với 3



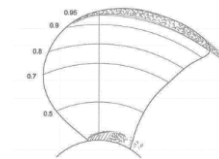
Trường hợp 1:  $J = 1,019$ ;  $\sigma_n = 2,024$     Trường hợp 2:  $J = 1,269$ ;  $\sigma_n = 1,424$     Trường hợp 3:  $J = 1,408$ ;  $\sigma_n = 2,000$



**Hình 5. Phân bố áp suất trên bề mặt cánh**

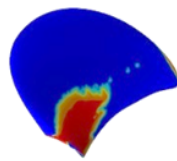


a)

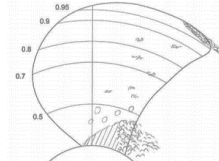


b)

Trường hợp 1:  $J = 1,019$ ;  $\sigma_n = 2,024$

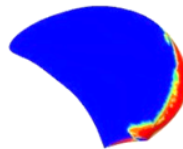


a)

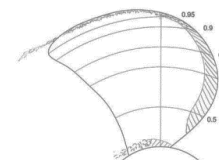


b)

Trường hợp 2:  $J = 1,269$ ;  $\sigma_n = 1,424$



a)



b)

Trường hợp 3:  $J = 1,408$ ;  $\sigma_n = 2,000$



**Hình 6. So sánh hình ảnh xâm thực giữa kết quả mô phỏng bằng CFD và kết quả thử mô hình**

a) Mô phỏng bằng CFD, b) Kết quả thử mô hình [14]

trường hợp mô phỏng nêu trên. Kết quả so sánh cho thấy sự tương đồng giữa các vị trí xuất hiện xâm thực, cụ thể tại mép cánh và chân cánh; xu hướng phát triển của xâm thực đều giống nhau giữa mô phỏng và thử nghiệm. Trong trường hợp 1 ( $J=1,019$ ,  $\sigma_n=2,024$ ) hình ảnh xâm thực tại chân cánh thu được từ mô phỏng có nhiều tương đồng với kết quả thử, trong khi xâm thực tại mép đập kết quả mô phỏng vượt mức so với kết quả thử. Với  $J=1,269$ ,  $\sigma_n = 1,424$  trong

trường hợp 2, kết quả mô phỏng xâm thực tại mút cánh và chân cánh hoàn toàn giống với kết quả thử; đồng thời mô phỏng được một phần xâm thực dạng bong bóng, tuy nhiên không phát triển rộng khắp trên mặt cánh như kết quả thử nghiệm. Ở trường hợp 3 ( $J=1,408$ ;  $\sigma_n=2,000$ ), mô phỏng thu được hình ảnh xâm thực tại chân cánh phù hợp với kết quả thử; mô phỏng xâm thực tại mép đập không phát triển đến gần mút cánh như kết quả thử mô hình.

**Bảng 3. So sánh kết quả đặc tính thủy động lực học của chong chóng xâm thực giữa tính toán CFD và kết quả thử mô hình**

TH	J		Kết quả CFD	Kết quả thử mô hình [10]	Sai số, %
1	1,019	KT	0,388	0,374	4
		10KQ	0,973	0,970	0
		$\eta_0$	0,647	0,625	3
2	1,269	KT	0,207	0,206	0
		10KQ	0,614	0,631	-3
		$\eta_0$	0,683	0,660	3
3	1,408	KT	0,144	0,136	6
		10KQ	0,482	0,489	-1
		$\eta_0$	0,656	0,624	5

#### 4. Kết luận

Nghiên cứu đã áp dụng thành công phương pháp CFD vào tính toán hiệu suất chong chóng xâm thực và mô hình hóa được xâm thực trên bề mặt cánh. Kết quả tính bằng CFD thu được rất gần với kết quả thử nghiệm (sai số dao động trong khoảng từ 0% đến 6%). Kết quả mô phỏng hình ảnh xâm thực trên mặt cánh chong chóng khá phù hợp với kết quả thử mô hình. So với một số kết quả nghiên cứu khác về xâm thực mô hình PPTC bằng CFD, kết quả trong nghiên cứu này chính xác hơn do sai số so với kết quả thử nghiệm nhỏ hơn.

Kết quả nghiên cứu được áp dụng để tính toán và dự đoán xâm thực của chong chóng; đồng thời là cơ sở để nhóm tác giả tiếp tục nghiên cứu về xâm thực, ăn mòn, rung động và tiếng ồn sinh ra do xâm thực chong chóng.

#### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT21-22.23**.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] 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.
- [2] Young Y.L., Kinnas S.A. (2001), *A BEM for the prediction of unsteady midchord face and/or back propeller cavitation*, Journal Fluid Engineering, Vol.123(2), pp.311-319.
- [3] Vaz G., Bosschers J. (2006), *Three dimensional sheet cavitation on marine propellers using a boundary element method*, Sixth International

Symposium on Cavitation CAV2006, Wageningen, The Netherlands.

- [4] Stefano Gaggero, Giorgio Tani, Diego Villa, Michele Viviani, Pierluigi Ausonio, Piero Travi, Giovanni Bizzarri, Francesco Serra (2017), *Efficient and multi-objective cavitating propeller optimization: An application to a high-speed craft*, Journal Ocean Research, Vol.64, pp.31-57.
- [5] Naz Yilmaz, Mahdi Khorasanchi, Mehmet Atlar (2017), *An Investigation into Computational Modelling of Cavitation in a Propeller's Slipstream*, Fifth International Symposium on Marine Propulsion smp'17, Espoo, Finland.
- [6] Xin Chang, Jian Hu, Yingzhu Wang, Weipeng Zhang (2019), Wang Zhao, *Tip vortex prediction for contra-rotating propeller using large eddy simulation*, Journal Ocean Engineering, Vol.194.
- [7] Artur K. Lidtke, Victor F. Humphrey, Stephen R. Turnock (2015), *Feasibility study into a computational approach for marine propeller noise and cavitation modelling*, Journal Ocean Engineering.
- [8] Vũ Văn Duy (2014), *Nghiên cứu tính bất ổn định của xâm thực cục bộ trên profile cánh*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 40, tr.19-23.
- [9] Lê Thị Thái (2013), *Nghiên cứu hiện tượng xâm thực bao quanh chân vịt tàu thủy*, Luận án Tiến sĩ cơ học chất lỏng, Mã số: 62442201, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.
- [10] Heinke, H.-J. (2011), *Potsdam Propeller Test Case (PPTC), Cavitation Tests with the Model Propeller VPI304, Report 3753*, Potsdam.
- [11] ITTC (2014), *ITTC- Recommended Procedures and Guidelines*, 7.5-03-03-01.
- [12] Sebastian Kowalczyk, Judyta Felicjancik (2016), *Numerical and experimental propeller noise investigation*, Journal Ocean Engineering.
- [13] SIEMENS (2020), *Simcenter STAR-CCM+ Documentation*, Version 2020.2.
- [14] SMP'11 Workshop on Cavitation and Propeller Performance (2011), *Potsdam Propeller Test Case (PPTC), Cavitation Tests with the Model Propeller VPI304, Case 2.3*, Second International Symposium on Marine Propulsors, Hamburg, Germany.

Ngày nhận bài:	22/3/2022
Ngày nhận bản sửa:	10/4/2022
Ngày duyệt đăng:	16/4/2022