

# NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG MẶT THOÁNG CHẤT LỎNG ĐẾN SỰ THAY ĐỔI CÁC THÔNG SỐ THỦY ĐỘNG CỦA CHONG CHÓNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP CFD

## NUMERICAL INVESTIGATION OF FREE SURFACE EFFECTS ON PROPELLER PERFORMANCE USING CFD METHOD

TRẦN NGỌC TÚ\*, NGUYỄN THỊ HẢI HÀ

Khoa Đóng tàu, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

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

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.835>

### Tóm tắt

Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của mặt thoáng chất lỏng đến các thông số thủy động (TSTD) của chong chóng tàu thủy bằng phương pháp mô phỏng CFD. Trước tiên, mô hình tính toán được kiểm chứng tại độ sâu  $h/D=2,0$  bằng cách so sánh với dữ liệu thực nghiệm. Tiếp đó, bài báo tiến hành đánh giá ảnh hưởng của mặt thoáng đến các TSTD của chong chóng ở bốn độ sâu khác nhau tại năm giá trị bước tiến tương đối. Kết quả tính toán cho thấy mặt thoáng làm giảm đáng kể lực đẩy, mô men và hiệu suất của chong chóng, đặc biệt khi chong chóng hoạt động gần mặt thoáng và ở bước tiến tương đối nhỏ. Ngoài ra, qua việc phân tích dòng chảy bao quanh chong chóng đã chỉ ra tương tác mạnh giữa hai pha khí-lỏng từ đó dẫn và sự biến động dòng chảy sau chong chóng tăng mạnh ở vùng gần mặt thoáng, dẫn đến dao động lực và mô men theo thời gian. Biên độ dao động của chúng càng lớn khi chong chóng hoạt động càng gần mặt thoáng và ngược lại.

**Từ khóa:** Mặt thoáng, CFD, chong chóng, thông số thủy động.

### Abstract

This study investigates the influence of the free surface on the hydrodynamic characteristics of a marine propeller using CFD method. Firstly, the numerical model is verified at a submergence depth ratio of  $h/D=2.0$  by comparing simulation results with experimental data. Then, the effects of the free surface on the propeller's thrust, torque, and efficiency are evaluated at four different submergence depths and five advance ratios. The results indicate that, the free surface significantly reduces thrust, torque, and overall efficiency, particularly when the propeller operates near the water surface and at low advance ratios.

Furthermore, flow field analysis reveals strong air-water phase interactions, which intensify flow unsteadiness in the near-surface region and result in greater fluctuations in thrust and torque in real time. The amplitude of these fluctuations is greater when the propeller operates closer to the free surface and vice versa.

**Keywords:** Free surface, CFD, propeller, hydrodynamic characteristics.

### 1. Mở đầu

Trong bài toán thiết kế chong chóng, người thiết kế thường sẽ tính toán thiết kế chong chóng trong điều kiện không chịu ảnh hưởng của mặt thoáng chất lỏng. Tuy nhiên, trong thực tế khai thác tàu có thể chạy ở chế độ khác với chế độ thiết kế như: Chế độ không đầy tải, chế độ ballast hoặc chạy trên sóng... khi đó, chong chóng của tàu sẽ hoạt động ở khoảng cách rất gần mặt thoáng chất lỏng. Trong trường hợp này, sẽ xảy ra tương tác thủy động giữa chong chóng với mặt thoáng chất lỏng từ đó có thể dẫn đến làm giảm hiệu suất chong chóng, làm tăng chấn động và độ ồn [1]. Vì thế, mối quan hệ giữa công suất máy, tốc độ tàu và vòng quay của chong chóng sẽ có sự thay đổi. Để đánh giá được mức độ thay đổi này, cần phải nghiên cứu ảnh hưởng của mặt thoáng chất lỏng đến sự thay đổi các TSTD của chong chóng.

Trên thế giới, đã có một số các nghiên cứu liên quan đến vấn đề này [1], [2], [3], [4], [5]. Các nghiên cứu đều chỉ ra mặt thoáng chất lỏng có ảnh hưởng đến các TSTD của chong chóng, và mức độ ảnh hưởng phụ thuộc vào độ sâu làm việc và các thông số hình học của chong chóng. Phương pháp nghiên cứu được các tác giả sử dụng là thực nghiệm để kiểm chứng mô hình tính bằng CFD, sau đó áp dụng mô hình tính CFD đã được kiểm chứng vào trong đánh giá ảnh hưởng của mặt thoáng đến các TSTD của chong chóng.

Ở trong nước, các nghiên cứu về ảnh hưởng của mặt thoáng chất lỏng đến sự thay đổi các TSTD của

chong chóng vẫn còn hạn chế. Do đó, bài báo này, trên cơ sở kế thừa các kết quả nghiên cứu đi trước trên thế giới, sẽ tiến hành mô phỏng tính toán mô phỏng tính toán sự thay đổi các TSTĐ của chong chóng ở bốn độ sâu khác nhau tại năm giá trị bước tiến tương đối. Phương pháp được sử dụng ở đây là phương pháp CFD. Mô hình tính CFD được kiểm chứng tại độ sâu  $h/D=2,0$  bằng cách so sánh với dữ liệu thực nghiệm. Đối tượng nghiên cứu được lựa chọn trong nghiên cứu này là chong chóng Potsdam ở dạng tỷ lệ mô hình.

## 2. Giới thiệu chong chóng Potsdam

Trong nghiên cứu này, chong chóng Potsdam được lựa chọn làm đối tượng khảo sát, do mô hình 3D cùng với dữ liệu thử nghiệm trong điều kiện không chịu tác động của mặt thoáng chất lỏng được công bố và cho phép tải xuống miễn phí trên mạng [6, 7]. Chong chóng này có 5 cánh với đường kính là 0,25m, tỷ số đĩa là 0,789, tỷ số bước tại giá trị bán kính 0,75R là 1,635, tốc độ vòng quay là 15 vòng/giây.



Hình 1. Mô hình 3D của chong chóng Potsdam

## 3. Các trường hợp tính

Để đánh giá ảnh hưởng của mặt thoáng chất lỏng đến sự thay đổi tính chất dòng chảy bao quanh chong chóng và các TSTĐ của chúng, nghiên cứu này sẽ giới hạn cũng như thực hiện các trường hợp tính toán sau:

- Chong chóng hoạt động ở chế độ tự do;
- Việc tính toán được thực hiện ở 04 độ sâu khác nhau gồm:  $h/D=0,75$ ;  $1,0$ ;  $1,5$  và  $2,0$ . Ở đây  $h$  là khoảng cách từ tâm trục chong chóng đến mặt thoáng,  $D$  là đường kính chong chóng.

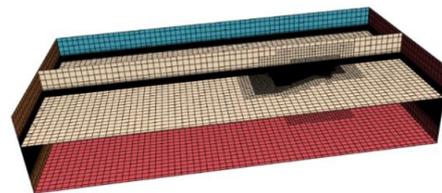
- Tại mỗi trường hợp độ sâu khác nhau sẽ thực hiện tính toán tại 05 bước tiến tương đối gồm:  $J=0,4$ ;  $0,6$ ;  $0,8$ ;  $0,1$  và  $1,2$ . Việc thay đổi  $J$  được thực hiện giống như thực nghiệm trong bể thử đó là thay đổi vận tốc dòng chảy đến chong chóng còn vòng quay chong chóng được giữ không đổi là  $n=15$  vòng/giây.

## 4. Thiết lập mô phỏng

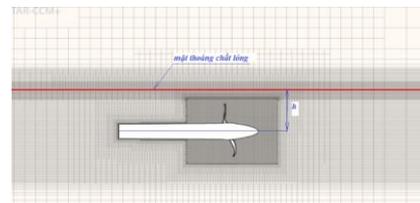
Trong mô phỏng bài toán ảnh hưởng của mặt thoáng đến sự thay đổi tính chất dòng chảy bao quanh

chong chóng và TSTĐ của chúng, miền tính toán được chia thành hai miền gồm: Miền tĩnh và miền chong chóng quay, trong đó miền tĩnh bao quanh toàn bộ miền chong chóng quay, hai miền này được liên kết với nhau qua bề mặt lưới trượt. Miền tĩnh có hình dáng là hình hộp chữ nhật, miền chong chóng quay có dạng hình lăng trụ. Miền tĩnh có kích thước như sau: Theo chiều dài, phía trước và phía sau cách đĩa chong chóng một đoạn lần lượt là 10D và 25D; theo chiều cao, phía trên và phía dưới cách tâm trục chong chóng một đoạn lần lượt là 4D và 6D; theo chiều rộng, hai mặt bên cách tâm trục chong chóng một đoạn 6D. Miền quay có hình lăng trụ với đường kính bằng 1,2D và chiều cao 1,5D.

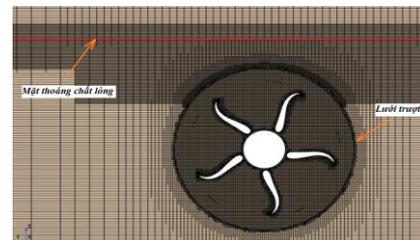
Về mô hình vật lý: Phương trình RANSE được chọn để giải bài toán dòng chảy rối không nén. Mô hình dòng rối SST K-omega được sử dụng để đóng phương trình RANSE. Mặt thoáng chất lỏng được mô phỏng thông qua việc sử dụng mô hình thể tích chất lỏng đa pha.



a) Hình ảnh toàn bộ miền tính toán



b) Hình ảnh mặt cắt dọc tại vị trí Y=0



c) Hình ảnh mặt cắt ngang tại vị trí X=0

## Hình 2. Kết quả chia lưới

Loại lưới khối được sử dụng là lưới trimmed phi cấu trúc. Lưới prism layer được sử dụng để giải lớp biên bao quanh bề mặt cánh chong chóng. Khoảng cách từ lớp lưới prism layer đầu tiên đến tường được xác định trên cơ sở đảm bảo cho giá trị  $Y+$  trung bình nhỏ hơn 5 [8]. Lưới được làm mịn tại các khu vực quan trọng như gần chong chóng đặc biệt là tại mép

cánh, tại mặt thoát chất lỏng để bắt được chính xác dòng chảy quanh chong chóng và tương tác giữa chong chóng với mặt thoát chất lỏng. Cấu trúc lưới sau khi chia được thể hiện trên Hình 2.

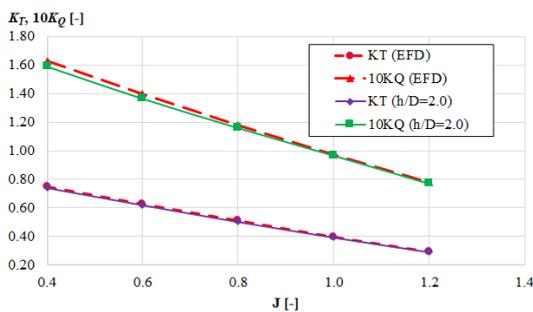
## 5. Thiết lập mô phỏng

### 5.1. So sánh kết quả mô phỏng và thực nghiệm

Do không có kết quả thực nghiệm của chong chóng hoạt động ở các độ sâu khác nhau. Vì vậy, trong nghiên cứu này sẽ so sánh kết quả mô phỏng tính toán các TSTĐ của chong chóng khi hoạt động ở độ sâu  $h/D=2,0$  với kết quả thực nghiệm trong bể thử (EFD) ngập sâu hoàn toàn (không có sự ảnh hưởng của mặt thoát). Sở dĩ có thể chọn độ sâu  $h/D=2,0$  để so sánh được là bởi độ sâu này đã vượt quá yêu cầu tối thiểu của của Hiệp hội bể thử quốc tế ITTC về quy trình thử chong chóng hoạt động ở chế độ tự do, để tránh ảnh hưởng của mặt thoát đến các TSTĐ của chong chóng [9]. Các kết quả so sánh giữa mô phỏng và thực nghiệm về giá trị hệ số lực đẩy (KT) và hệ số mô men (KQ) được trình bày trên Bảng 1 và Hình 3.

**Bảng 1. So sánh giá trị  $K_T$  và  $K_Q$  giữa EFD và CFD tại độ sâu  $h/D=2,0$**

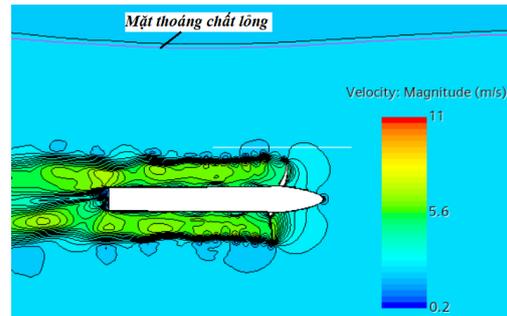
$J$	$K_T$ [-]			$10K_Q$ [-]		
	CFD	EFD[7]	E%D	CFD	EFD[7]	E%D
0,4	0,741	0,751	-1,33	1,591	1,629	-2,33
0,6	0,621	0,629	-1,27	1,366	1,396	-2,15
0,8	0,504	0,510	-1,17	1,161	1,178	-1,44
1,0	0,395	0,399	-1,00	0,968	0,975	-0,72
1,2	0,293	0,295	-0,68	0,771	0,776	-0,64



**Hình 3. So sánh giá trị  $K_T$  và  $K_Q$  giữa EFD và CFD tại độ sâu  $h/D=2,0$**

Kết quả so sánh giữa thực nghiệm (không có ảnh hưởng của mặt thoát) và mô phỏng bằng CFD (tính đến ảnh hưởng của mặt thoát tại  $h/D=2,0$ ) cho kết quả khác nhau chỉ dưới 3% đối với cả KT và KQ. Trong đó kết quả mô phỏng bằng CFD nhỏ hơn so với kết quả đo trong bể thử ở tất cả các bước tiến xem xét.

Điều này có thể giải thích một thực tế đó khi chong chóng hoạt động ở độ sâu cách mặt thoát một đoạn  $h/D=2,0$  trên thực tế vẫn có sự tương tác với mặt thoát mặc dù mức độ tương tác là không đáng kể (xem Hình 4). Kết quả thu được này hoàn toàn trùng khớp về xu hướng với kết quả của nhóm tác giả Myeong-Jin Eom cùng các cộng sự khi tính toán đối với chong chóng KP458 [10].



**Hình 4. Cấu trúc dòng chảy sau chong chóng khi hoạt động ở độ sâu  $h/D=2,00$  tại bước tiến tương đối  $J=0,6$**

### 5.2. Ảnh hưởng của mặt thoát chất lỏng đến các TSTĐ của chong chóng

Kết quả mô phỏng tính toán ảnh hưởng của mặt thoát chất lỏng đến các TSTĐ của chong chóng khi hoạt động ở các độ sâu khác nhau có so sánh với trường hợp ở  $h/D=2,0$  được trình bày trên Bảng 2 và các Hình từ 5 đến 9. Trong đó  $K_{T0}$ ,  $K_{Q0}$ ,  $\text{Eta}_0$  là hệ số lực đẩy, mô men và hiệu suất của chong chóng khi hoạt động ở độ sâu  $h/D=2,0$ . Từ kết quả thu được trên Bảng 2 và các Hình từ 5 đến 9, có thể đưa ra một số nhận xét và kết luận sau:

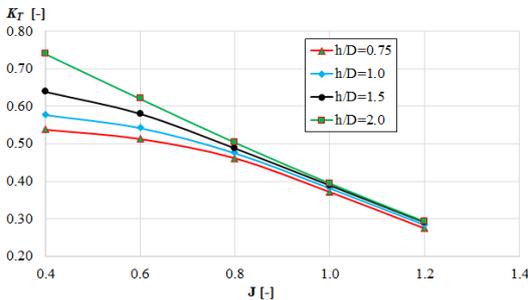
- Mặt thoát chất lỏng làm giảm các TSTĐ của chong chóng, mức giảm của chúng sẽ tăng dần đều khi chong chóng hoạt động càng gần mặt thoát chất lỏng và ngược lại. Ngoài ra, tại cùng một độ sâu hoạt động, khi bước tiến tương đối của chong chóng càng nhỏ (tức tải lên chong chóng tăng) thì mức độ ảnh hưởng của mặt thoát tăng và ngược lại. Kết quả nghiên cứu này hoàn toàn phù hợp về mặt định tính so với các kết quả nghiên cứu đi trước [2, 10], còn kết quả về định lượng thì có sự khác biệt ở các chong chóng có các thông số hình học khác nhau, cụ thể:

- Đối với chong chóng nghiên cứu, trong dải độ sâu hoạt động  $h/D$  từ 0,75 đến 1,5 và bước tiến tương đối  $J$  từ 0,40 đến 1,20 ứng với từng độ sâu hoạt động, hệ số lực đẩy của chong chóng giảm trong khoảng 27,4% đến 0,7% và hệ số mô men giảm trong khoảng 10,2% đến 0,6% so với trường hợp tham chiếu  $h/D = 2,0$ .

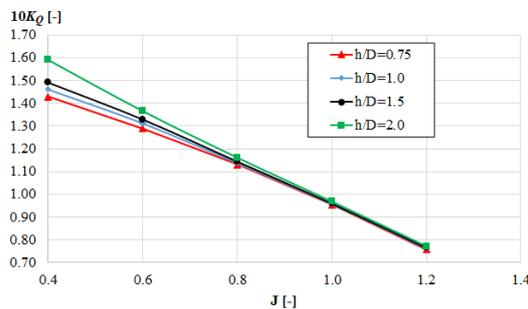
- Tại cùng một độ sâu hoạt động  $h/D$  và bước tiến

**Bảng 2. Ảnh hưởng của mật thoáng chất lỏng đến các TSTĐ của chong chóng khi hoạt động ở các độ sâu khác nhau có so sánh với trường hợp  $h/D=2,0$**

$J$	$K_T$	$K_T/K_{T0}$	$10K_Q$	$K_Q/K_{Q0}$	$Eta$	$Eta/Eta_0$ [-]
Trường hợp $h/D=0,75$						
0,40	0,538	0,726	1,428	0,898	0,240	0,809
0,60	0,5132	0,826	1,29	0,944	0,380	0,875
0,80	0,462	0,917	1,131	0,974	0,520	0,941
1,00	0,372	0,942	0,949	0,980	0,624	0,961
1,20	0,278	0,949	0,759	0,984	0,700	0,964
Trường hợp $h/D=1,0$						
0,40	0,578	0,780	1,462	0,919	0,252	0,849
0,60	0,543	0,874	1,313	0,961	0,395	0,910
0,80	0,476	0,944	1,136	0,978	0,534	0,965
1,00	0,379	0,959	0,952	0,983	0,634	0,976
1,20	0,284	0,969	0,761	0,987	0,713	0,982
Trường hợp $h/D=1,5$						
0,40	0,64	0,864	1,492	0,938	0,273	0,921
0,60	0,5812	0,936	1,333	0,976	0,416	0,959
0,80	0,489	0,970	1,139	0,981	0,547	0,989
1,00	0,388	0,982	0,96	0,992	0,643	0,990
1,20	0,291	0,993	0,766	0,994	0,726	1,000



**Hình 5. Ảnh hưởng của mật thoáng đến hệ số  $K_T$  của chong chóng ở các  $J$  khác nhau**

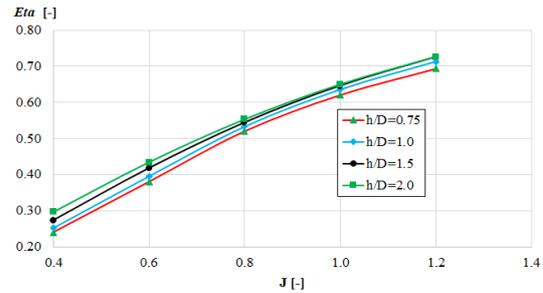


**Hình 6. Ảnh hưởng của  $h/D$  đến hệ số  $K_Q$  của chong chóng tại các  $J$  khác nhau**

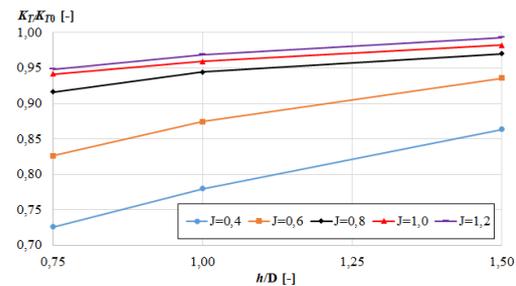
tương đối  $J$ , mức giảm hệ số lực đẩy lớn hơn so với hệ số mô men. Ví dụ, tại  $h/D=0,75$  và  $J=0,4$ , hệ số lực đẩy giảm 27,4% còn hệ số mô men chỉ giảm 10,2% so

với trường hợp tham chiếu  $h/D=2,0$ .

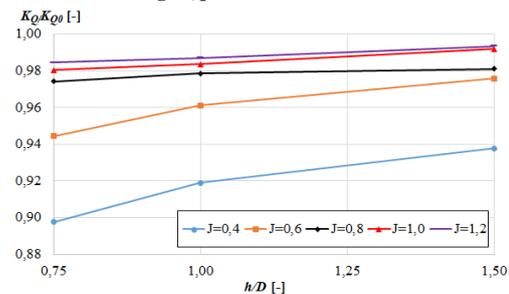
- Tại cùng độ sâu hoạt động, khi bước tiến tương đối giảm, mức độ ảnh hưởng của mật thoáng tăng lên rõ rệt (xem Hình 8 và 9). Cụ thể, ví dụ tại  $h/D=1,0$ , hệ số  $K_T$  và  $K_Q$  của chong chóng giảm so với trường hợp tham chiếu  $h/D=2,0$  lần lượt là 22,0% và 8,11% ở tại  $J=0,4$ , trong khi đó tại  $J=1,2$  giá trị hệ số  $K_T$  và  $K_Q$  chỉ giảm lần lượt là 4,1% và 1,3%.



**Hình 7. Ảnh hưởng của  $h/D$  đến hiệu suất của chong chóng tại các  $J$  khác nhau**

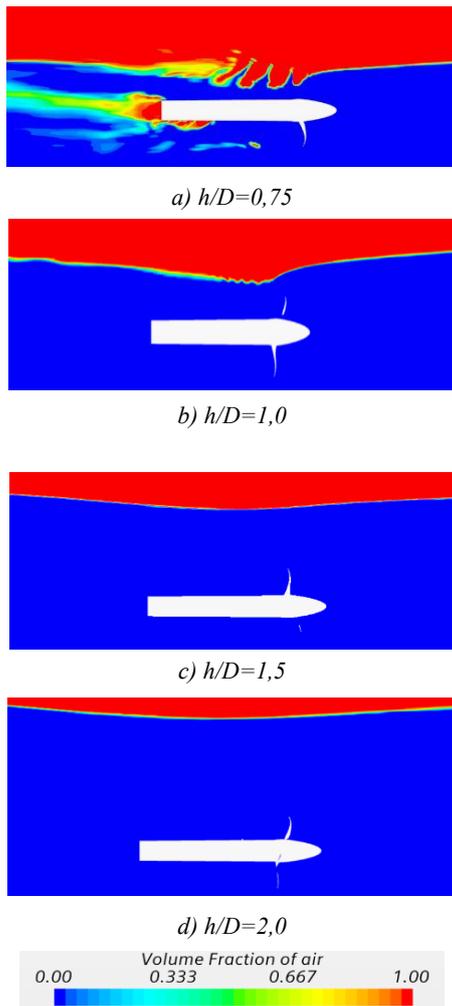


**Hình 8. Mức giảm hệ số  $K_T$  của chong chóng so với trường hợp tham chiếu  $h/D=2,0$**

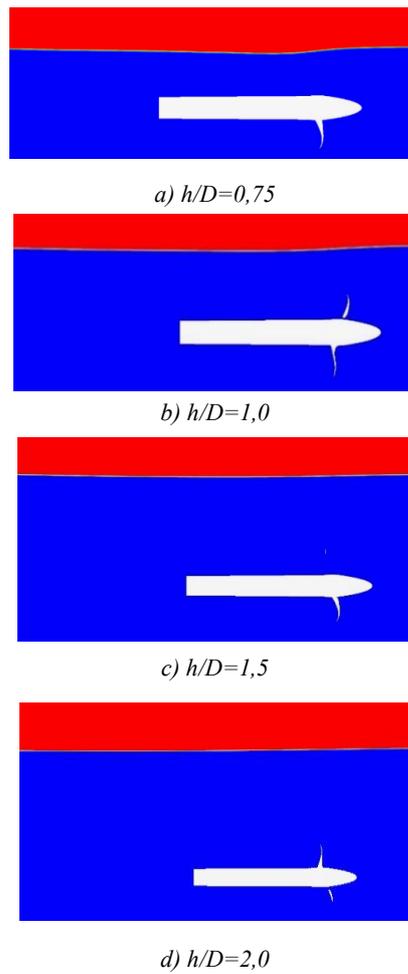


**Hình 9. Mức giảm hệ số  $K_Q$  của chong chóng so với trường hợp tham chiếu  $h/D=2,0$**

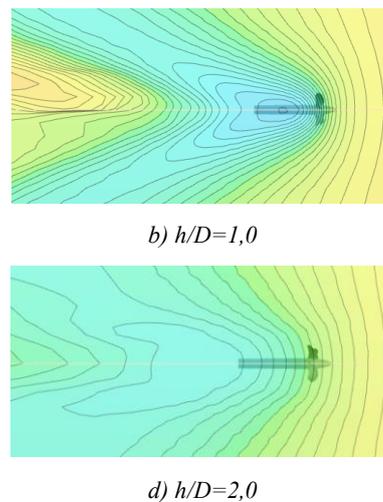
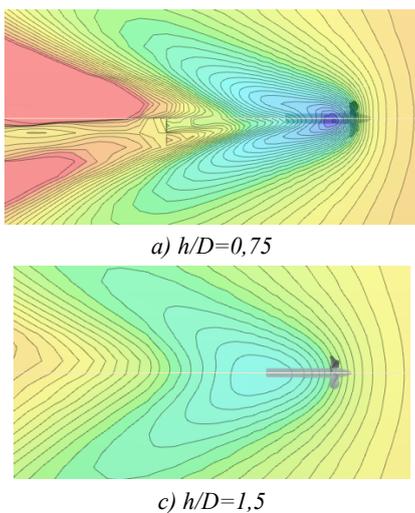
Sự thay đổi các TSTĐ của chong chóng khi hoạt động gần mật thoáng có thể được giải thích bởi sự xuất hiện của tương tác qua lại giữa chúng, được thể hiện thông qua sự thay đổi dòng chảy bao quanh chong chóng khi hoạt động ở các độ sâu khác nhau (xem Hình từ 10 đến 13). Trên Hình 10 và Hình 11 ta có thể quan sát thấy, sự tương tác giữa hai pha khí và lỏng tăng dần khi khoảng cách giữa chong chóng hoạt động càng gần



**Hình 10.** Tương tác giữa 2 pha khí và lỏng khi chong chóng hoạt động ở các độ sâu khác nhau tại  $J=0,6$



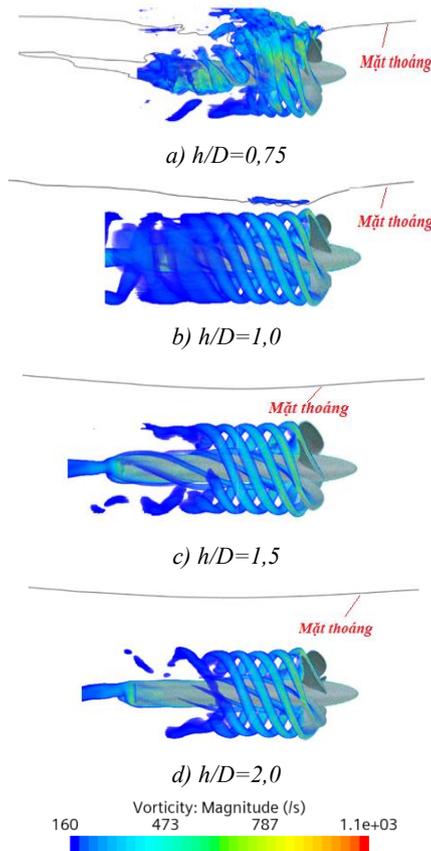
**Hình 11.** Tương tác giữa 2 pha khí và lỏng khi chong chóng hoạt động ở các độ sâu khác nhau tại  $J=1,0$



**Hình 12.** Ảnh hưởng của mặt thoáng đến cấu trúc dòng chảy quanh chong chóng hoạt động ở các độ sâu khác nhau tại  $J=1,0$

nước, sự tương tác giữa hai pha khí và lỏng tăng lên khi  $J$  giảm và ngược lại. Ví dụ, tại  $h/D=0,75$ , khi  $J=0,6$  sự tương tác giữa chong chóng và mặt thoáng là rất lớn trong khi tại  $J=1,0$  sự biến dạng mặt thoáng là không đáng kể. Điều này lý giải cho nguyên nhân dẫn tới hệ số  $K_T$  và  $K_Q$  giảm nhiều ở  $J$  nhỏ và ngược lại khi chong chóng hoạt động tại cùng một độ sâu.

Trên Hình 12 ta có thể quan sát thấy, cấu trúc xoáy dòng chảy xoáy mép cánh bị hỗn loạn khi chong chóng hoạt động cách mặt thoáng tại  $h/D=0,75$  và giảm dần khi hoạt động cách xa mặt thoáng.

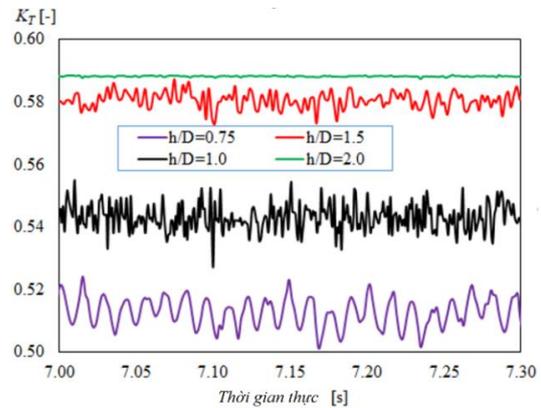


**Hình 13.** Ảnh hưởng của mặt thoáng đến cấu trúc dòng chảy quanh chong chóng hoạt động ở các độ sâu khác nhau tại  $J=0,6$

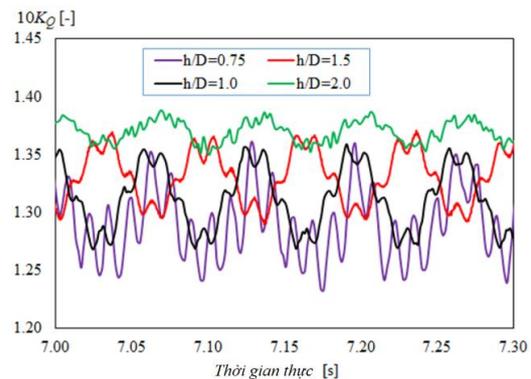
Khi chong chóng hoạt động gần mặt thoáng chất lỏng, sẽ tạo ra sóng bề mặt. Trên Hình 13 thể hiện hình ảnh sóng bề mặt do chong chóng tạo ra khi hoạt động ở các độ sâu khác nhau tại cùng một bước tiến tương đối  $J=1,0$ . Từ Hình 13 ta có thể quan sát thấy, cường độ sóng bề mặt do chong chóng tạo ra tăng dần khi chong chóng hoạt động gần mặt thoáng và ngược lại.

Khi chong chóng hoạt động gần mặt thoáng chất lỏng, tải tác dụng lên cánh chong chóng sẽ thay đổi theo thời gian, từ đó dẫn đến sự dao động của lực và

mô men theo thời gian, biên độ dao động của chúng càng lớn khi chong chóng hoạt động càng gần mặt thoáng và ngược lại (xem Hình 14 và 15). Số liệu về biên độ dao động của  $K_T$  và  $K_Q$  là thông số đầu vào trong tính toán dao động của hệ trục, tiếng ồn do chong chóng tạo ra khi hoạt động gần mặt thoáng.



**Hình 14.** Sự thay đổi hệ số  $K_T$  tại  $J=0,6$  theo thời gian thực



**Hình 15.** Sự thay đổi hệ số  $K_Q$  tại  $J=0,6$  theo thời gian thực

## 6. Kết luận

Trên cơ sở nghiên cứu ảnh hưởng của mặt thoáng đến sự thay đổi các TSTĐ của chong chóng, bài báo đã thu được các kết quả sau:

- Kết quả mô phỏng ở điều kiện chong chóng ngập sâu hoàn toàn ( $h/D=2,0$ ) cho sai số chỉ dưới 2,5% so với kết quả thử trong bể thử, điều này khẳng định mô hình thiết lập tính toán đưa ra là tin cậy.

- Khi chong chóng hoạt động càng gần mặt thoáng, lực đẩy, mô men và hiệu suất đều giảm. Đối với chong chóng nghiên cứu, trong dải độ sâu hoạt động  $h/D$  từ 0,75 đến 1,5 và bước tiến tương đối  $J$  từ 0,40 đến 1,20 ứng với từng độ sâu hoạt động, hệ số lực đẩy của chong chóng giảm trong khoảng 27,4% đến 0,7% và

hệ số mô men giảm trong khoảng 10,2% đến 0,6% so với trường hợp tham chiếu  $h/D = 2,0$ .

- Tại cùng một độ sâu hoạt động  $h/D$  và bước tiến tương đối  $J$ , mức giảm hệ số lực đẩy lớn hơn so với hệ số mô men. Cụ thể, tại  $h/D=0,75$  và  $J=0,4$ , hệ số lực đẩy giảm 27,4% còn hệ số mô men chỉ giảm 10,2% so với trường hợp tham chiếu  $h/D=2,0$ .

- Tại cùng độ sâu, khi bước tiến tương đối giảm (tải tác dụng lên chong chóng tăng), mức độ ảnh hưởng của mặt thoáng tăng lên rõ rệt. Cụ thể, tại  $h/D=1,0$ , hệ số  $K_T$  và  $K_Q$  của chong chóng giảm so với trường hợp tham chiếu  $h/D=2,0$  lần lượt là 22,0% và 8,11% ở tại  $J=0,4$ , trong khi đó tại  $J=1,2$  giá trị hệ số  $K_T$  và  $K_Q$  chỉ giảm lần lượt là 4,1% và 1,3%.

- Kết quả mô phỏng CFD cũng chỉ ra rằng sự tương tác giữa hai pha khí - lỏng và sự biến động dòng chảy sau chong chóng tăng mạnh ở vùng gần mặt thoáng, dẫn đến dao động lực và mô men theo thời gian. Biên độ dao động của chúng càng lớn khi chong chóng hoạt động càng gần mặt thoáng và ngược lại. Các kết quả thu được về biên độ dao động của các TSTĐ chong chóng theo thời gian thực này là dữ liệu đầu vào cho các nghiên cứu tiếp theo về rung động, tiếng ồn của hệ trục chong chóng trong điều kiện hoạt động gần mặt thoáng.

### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT25-26.34**.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] D. Yu, Y. Yu, and S. Yang (2024), *Influence of Free Surface on the Hydrodynamic and Acoustic Characteristics of a Highly Skewed Propeller*, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.12, p. 2208.

[2] K. J. Paik (2017), *Numerical study on the hydrodynamic characteristics of a propeller operating beneath a free surface*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol.9, No.6, pp.655-667.

[3] A. Di Mascio, G. Dubbioso, and R. Muscari (2022), *Vortex structures in the wake of a marine propeller operating close to a free surface*, Journal of Fluid Mechanics, Vol.949, p. A33.

[4] A. Lungu (2020), *Overall performances of a propeller operating near the free surface*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol.916, No.1, p. 012054.

[5] Y. Li, E. Martin, T. Michael, and P. M. Carrica (2015), *A Study of Propeller Operation Near a Free Surface*, Journal of Ship Research, Vol.59, No.4, pp.190-200.

[6] M. Morgut et al. (2015), *Numerical predictions of the PPTC model propeller in oblique flow*, in Proceedings of the Second Workshop on Cavitation and Propeller Performance, The Fourth International Symposium on Marine Propulsors (SMP'15).

[7] SVA Potsdam (n.d.), *ITTC Benchmark Data*. [Online]. Available: <https://www.sva-potsdam.de/en/itc-benchmark/>.

[8] T. N. Tu (2019), *Numerical simulation of propeller open water characteristics using RANSE method*, Alexandria Engineering Journal, Vol.58, No.2, pp.531-537.

[9] ITTC (2021), *Recommended Procedures and Guidelines: Open Water Test*, 7.5-02-03-02.1.

[10] M. J. Eom, Y. H. Jang, and K. J. Paik (2021), *A study on the propeller open water performance due to immersion depth and regular wave*, Ocean Engineering, Vol.219, p. 108265.

Ngày nhận bài:	03/11/2025
Ngày nhận bản sửa:	28/11/2025
Ngày duyệt đăng:	11/12/2025