

Ứng dụng CFD tính toán mô phỏng động lực học dòng chảy lỏng, dòng chảy khí trong lĩnh vực hàng hải và hàng không

■ PGS. TS. PHẠM KỶ QUANG

Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

TÓM TẮT: Dòng chảy đề cập trong bài báo là dòng chảy lỏng (không nén được), dòng chảy khí (có thể nén được) ứng dụng trong một số lĩnh vực hàng hải và hàng không. Động lực học dòng chảy là lĩnh vực nghiên cứu chuyên sâu và có tính chất đa ngành, ảnh hưởng rõ nét đến an toàn cũng như hiệu quả làm việc của đối tượng nghiên cứu. Bài báo sử dụng CFD để tính toán mô phỏng động lực học dòng chảy, từ đó đưa ra kết quả một số tham số cơ bản như: tốc độ dòng chảy, phân bố áp suất, hệ số áp suất, lực, mô-men... có thể ứng dụng trong hàng hải và hàng không.

TỪ KHÓA: Động lực học dòng chảy, dòng chảy khí, dòng chảy lỏng, CFD.

ABSTRACT: The flow mentioned in this paper is liquid (incompressible) and gas flow (compressible) applied in a number of maritime and aviation fields. Flow dynamics is an in-depth and multidisciplinary research field that clearly affects the safety and performance of research subjects. This paper used CFD to calculate the flow dynamics simulation, thereby giving the results of some basic parameters such as: flow rate, pressure distribution, pressure coefficient, force, moment... can be applied in marine and aviation.

KEYWORDS: Flow dynamics, gas flow, liquid flow, CFD.

1. CƠ SỞ TOÁN HỌC VÀ GIỚI HẠN ĐIỀU KIỆN BIÊN

- Cơ sở toán học: Liên quan đến vấn đề nghiên cứu, ứng dụng CFD tính toán mô phỏng động lực học dòng chảy lỏng và dòng chảy khí, đối với trạng thái dòng chảy khác nhau, thường là dòng chảy rối dựa theo số Reynold (ký hiệu là R_e), nhưng xoay quanh giải quyết các phương trình vi phân chủ đạo sau đây:

- Phương trình liên tục:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Trong đó: (u, v, w) - Thành phần hình chiếu của vector vận tốc \vec{v} ; r - Khối lượng riêng chất lỏng.

Chất lỏng không nén được ($r = \text{const}$) phương trình có dạng:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

- Phương trình vi phân chuyển động của chất lỏng:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad}p + \nu \Delta \vec{v} + \text{rot}(\text{div} \vec{v}) \quad (3)$$

Trong đó: \vec{F} - Lực khối đơn vị; ν - Hệ số nhớt động học với các toán tử sau:

$$\text{Grad}p \left(\frac{\partial p}{\partial x}; \frac{\partial p}{\partial y}; \frac{\partial p}{\partial z} \right), \text{Div} \vec{v} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z},$$

$$\Delta - \text{toán tử Laplace } (\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}),$$

$$\text{rot}(\vec{v}) = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ u & v & w \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \end{vmatrix}$$

Trong đó: $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ - Thứ tự là vector đơn vị trên hệ tọa độ oxyz.

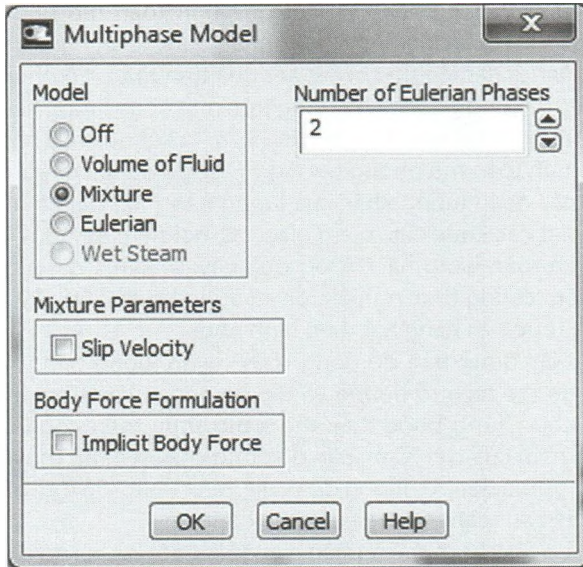
- Phương trình chủ đạo Navier-Stokes (viết tắt là N-S) kết hợp của hai phương trình bảo toàn khối lượng và động lượng.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

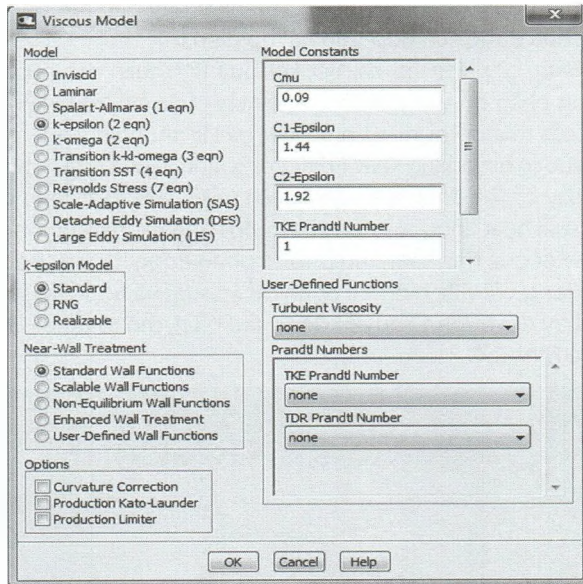
$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (5)$$

Trong đó: u_i - Thành phần vận tốc theo 3 phương x, y, z ; P - Áp suất; ν - Hệ số nhớt động học.

CFD tính toán mô phỏng động lực học dòng chảy lỏng và dòng chảy khí, có khả năng thích ứng rộng với các thuật giải là khác nhau, tùy vào bài toán cụ thể và điều kiện biên. Hình 1.1 minh họa sự lựa chọn pha (pha nước, pha lỏng riêng biệt hoặc đồng thời) như: Volume of Fluid, mixture..., một số kỹ thuật giải như: K-epsilon; K-omega; LES, RANS...



a)



b)

Hình 1.1: Cửa sổ tính toán mô phỏng từ CFD: a) Lựa chọn pha; b) Lựa chọn kỹ thuật giải

- Giới hạn điều kiện biên: Khi giải các phương trình vi phân, thường mắc phải các hằng số tích phân. Để xác định được các hằng số này, cần dựa vào điều kiện biên của mỗi bài toán cụ thể:

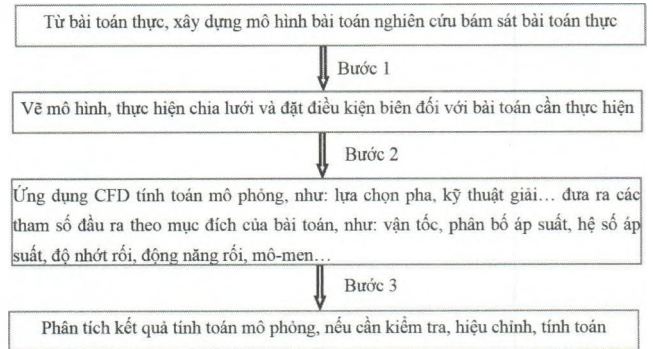
- Đối với dòng chảy lỏng: Áp dụng tuyến lưỡng hàng hải Hải Phòng, với các điều kiện về đặc điểm tuyến lưỡng đã biết và sử dụng một số mặt cắt tuyến lưỡng bằng CFD, áp dụng đối với một số tốc độ tàu quy đổi theo tiêu chuẩn đồng dạng Froude: $V_t = \{4,5; 5,5; 6,5; 7,5\}$ (m/s).

- Đối với dòng chảy khí: Áp dụng trong các rãnh/kênh dẫn khí của máy nén khí, máy bơm, cánh tubin khí... ứng dụng trong hàng hải, hàng không, với tham số theo mẫu của NASA Stage 37.

Một số kết quả tính toán mô phỏng đầu ra: độ mịn của lưới chia, tốc độ dòng chảy, phân bố áp suất, hệ số áp suất, mô-men...

2. XÂY DỰNG QUY TRÌNH TÍNH TOÁN MÔ PHỎNG ĐỘNG LỰC HỌC DÒNG CHẢY BẰNG CFD

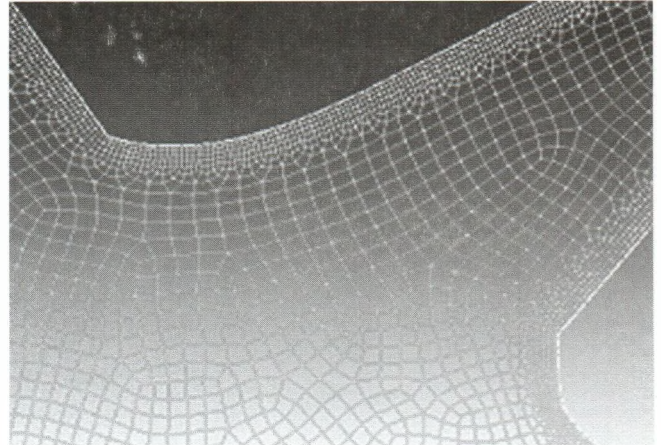
Thực hiện tính toán mô phỏng động lực học dòng chảy bằng CFD, có thể thực hiện quy trình chung theo Hình 2.1 thông qua các bước, tuy nhiên căn cứ thực tế bài toán cụ thể có thể bổ sung hoặc ghép bước thực hiện để đảm bảo đạt mục đích nghiên cứu.



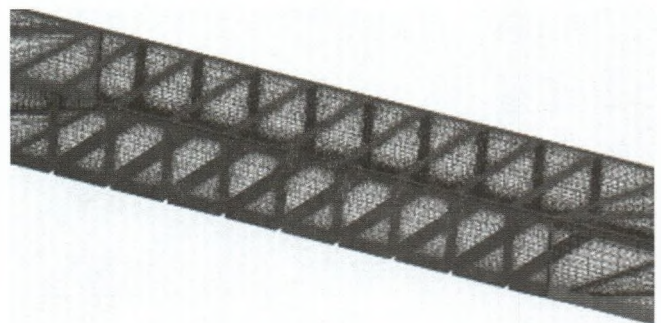
Hình 2.1: Quy trình chung tính toán mô phỏng động lực học dòng chảy bằng CFD

3. PHÂN TÍCH VÀ ỨNG DỤNG MỘT SỐ KẾT QUẢ TÍNH TOÁN MÔ PHỎNG

- Sau khi xây mô hình bài toán nghiên cứu bám sát bài toán thực xây, thực hiện tính toán mô phỏng bằng CFD về chia lưới của dòng chảy lỏng và dòng chảy khí, kết quả cụ thể theo Hình 3.1:



a)



b)

Hình 3.1: Kết quả tính toán mô phỏng lưới chia bằng CFD: a) Dòng chảy lỏng; b) Dòng chảy khí

Từ Hình 3.1, phân tích kết quả tính toán mô phỏng bằng CFD với lưới chia, nhận được:

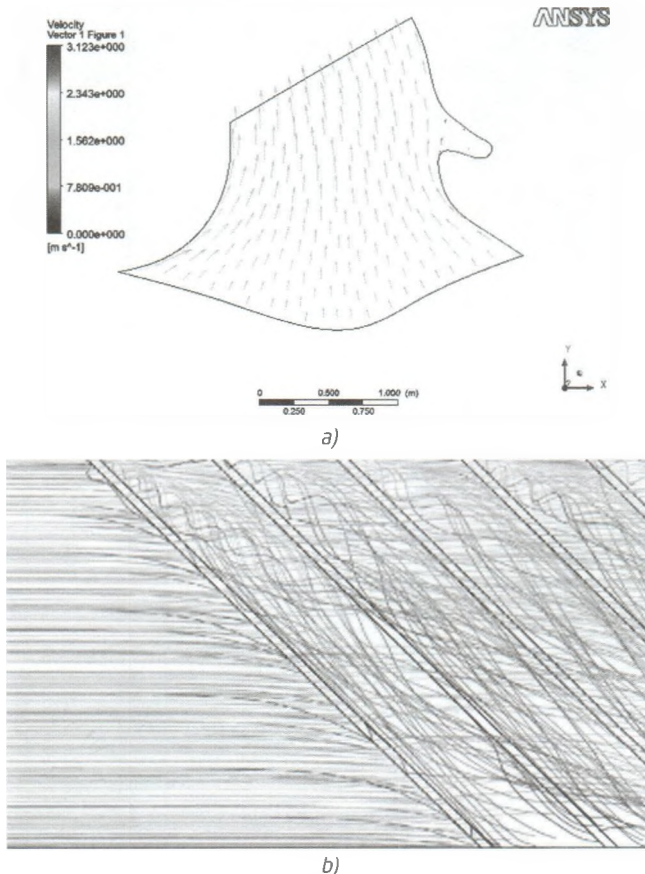
Hình 3.1a hiển thị với dạng lưới chia hình tam giác, có độ mau và thưa khác nhau, lưới khá mịn, tổng số nút lưới là hơn 1,5 triệu và thông tin về lưới chia theo Bảng 3.1, với tốc độ trung bình $V_{tb} = 1,2$ m/s trên một đoạn luồng hàng hải Hải Phòng.

Bảng 3.1. Thông tin chi tiết về lưới chia dạng tam giác

| Miền không gian | Số nút lưới | Số phần tử lưới | Số phần tử lưới Polyhedra |
|-----------------|-------------|-----------------|---------------------------|
| Pha khí | 747309 | 122673 | 122673 |
| Pha nước | 765411 | 142550 | 142550 |
| Tổng | 1512720 | 265223 | 265223 |

Hình 3.1b hiển thị với dạng lưới chia dòng chảy khí trong rãnh/kênh của tuabin khí, ứng dụng trong hàng hải, hàng không. Kết quả nhận được các mắt lưới có cấu trúc chữ Y, cải thiện chất lượng lưới, với tốc độ dòng chảy được đưa ra ở đầu vào theo các số Reynold tương ứng nằm trong khoảng từ 10095 đến 53697 và cường độ nhiễu loạn 5% được đưa ra ở đầu vào. Việc chia lưới đảm bảo độ mịn là một trong những điều kiện quan trọng đảm bảo kết quả tính toán mô phỏng chính xác và tin cậy của bài toán nghiên cứu.

- Kết quả tính toán mô phỏng tốc độ dòng chảy lỏng và dòng chảy khí với đối tượng và giới hạn nghiên cứu trong mục 1, mô tả chi tiết theo Hình 3.2.



Hình 3.2: Kết quả tính toán mô phỏng tốc độ:
a) - Dòng chảy lỏng; b) - Dòng chảy khí

Từ Hình 3.2, phân tích kết quả tính toán mô phỏng bằng CFD với tốc độ dòng chảy, nhận được:

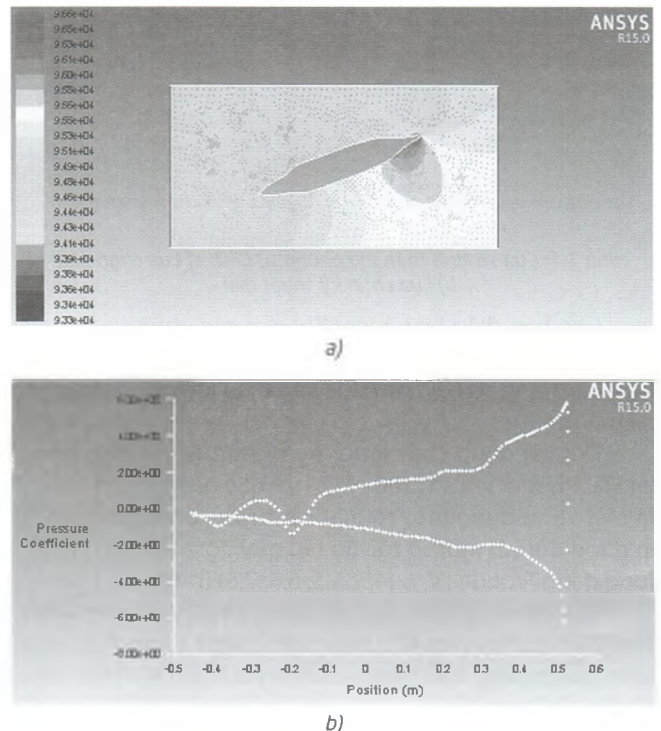
Hình 3.2a hiển thị chi tiết kết quả tính toán mô phỏng hướng và tốc độ dòng chảy lỏng trên một đoạn luồng hàng hải Hải Phòng ở bên trái của Hình 3.2a. Từ kết quả này hoàn toàn tính toán mô phỏng hướng và tốc độ dòng chảy lỏng trên các đoạn luồng khác của luồng hàng hải Hải Phòng, đặc biệt các khúc cua, điểm giao cắt, nơi tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn hàng hải. Từ kết quả này, so sánh, đánh giá và kiểm chứng thực nghiệm để sử dụng bộ dữ liệu này áp dụng thực tiễn hàng hải, điển hình như:

- Xây dựng bản đồ dòng chảy tuyến luồng hàng hải trên đó thể hiện rõ hướng và tốc độ dòng chảy theo thời gian thực, từng bước thay thế bằng thủy triều công bố hàng năm của Việt Nam. Bản đồ dòng chảy sẽ giúp thuyền trưởng, hoa tiêu có những đánh giá, biện pháp kịp thời dẫn tàu biển an toàn trên tuyến luồng hàng hải.

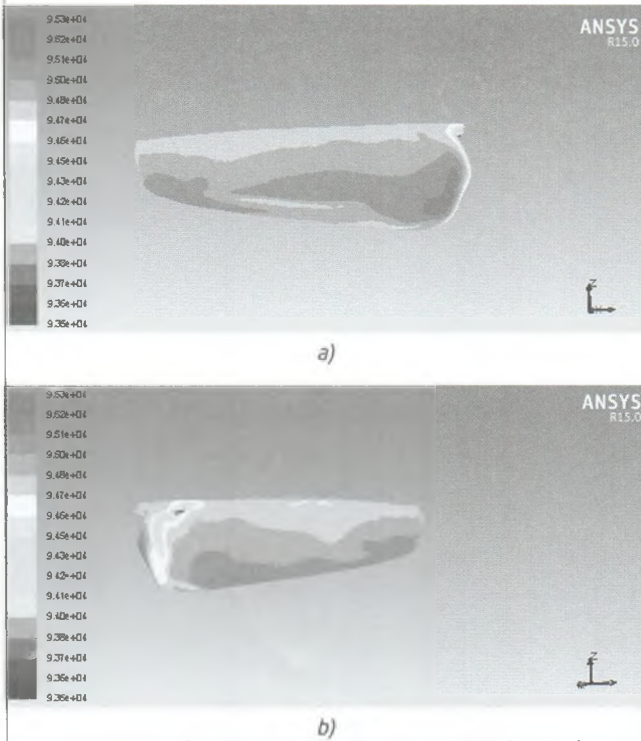
- Bộ dữ liệu có thể nghiên cứu để kết nối với hải đồ điện tử, trên đó cũng hiển thị rõ giá trị tốc độ và hướng dòng chảy liên tục của tuyến luồng, mà hiện nay hầu hết giá trị này chưa được tích hợp trên hải đồ điện tử.

Hình 3.2b hiển thị chi tiết kết quả tính toán mô phỏng trường phân bố vận tốc dòng chảy khí phân bố trong kênh/rãnh của tuabin khí, máy bơm..., đặc biệt là những nơi giao cắt, khu vực có hình dạng khác nhau trong rãnh. Từ kết quả nghiên cứu này có thể đánh giá việc truyền nhiệt, làm mát động cơ, hiệu suất hoạt động của động cơ trong hàng hải, hàng không...

- Kết quả tính toán mô phỏng phân động lực học dòng chảy lỏng với việc hiển thị phân bố áp suất và hệ số áp suất khi thay đổi hướng chuyển động tàu biển, mô tả theo Hình 3.3 và Hình 3.4.

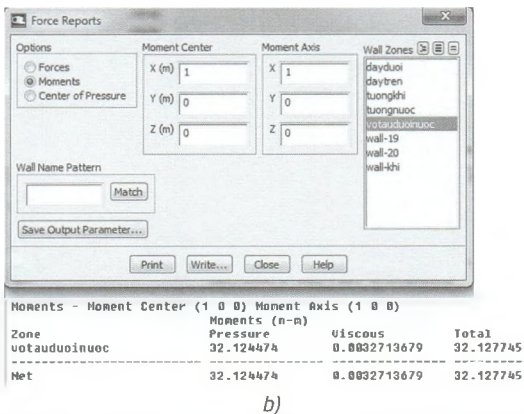
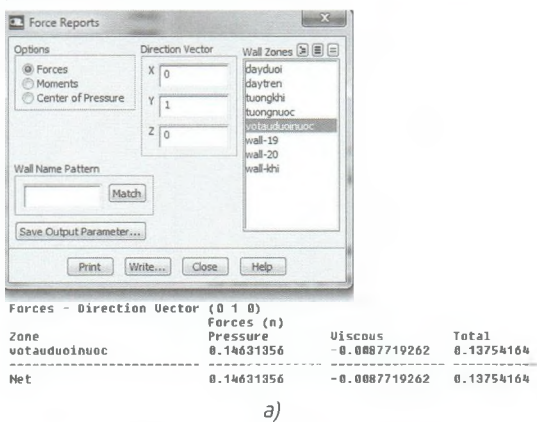


Hình 3.3: Kết quả tính toán mô phỏng khi $V_t = 7,5$ m/s, hướng tàu biển thay đổi $HT = 020^\circ$:
a) - Phân bố áp suất
b) - Phân bố hệ số áp suất



Hình 3.4: Kết quả tính toán mô phỏng phân bố áp suất phần vỏ tàu chìm dưới nước, khi thay đổi hướng tàu biển $HT = 020^\circ$, $V_t = 7,5 \text{ m/s}$: a) - Mạn phải; b) - Mạn trái

Sau khi có kết quả phân bố áp suất này xác định lực tác động gia thêm và mô-men tác động, theo các phương khác nhau, mô tả chi tiết theo Hình 3.5.



Hình 3.5: Kết quả tính toán mô phỏng: a) - Lực tác động lên vỏ tàu; b) - Mô-men tác động lên vỏ tàu

Từ Hình 3.3, Hình 3.4 và Hình 3.5, phân tích kết quả tính toán mô phỏng, nhận xét rằng: Khi thay đổi hướng đi, đặc biệt là hướng đi lớn (khi góc bề lái lớn) thì độ chênh lệch áp suất giữa hai mạn tàu là rõ rệt, nguy cơ mất an toàn hàng hải tăng lên, do xuất hiện của lực gia thêm, mô-men gia thêm. Trên cơ sở này, thực tiễn quá trình điều động tàu, việc thay đổi hướng đi tàu, tiến hành từng bước phù hợp điều kiện thực tế để tránh nguy cơ rủi ro này. Như vậy, việc tính toán mô phỏng trước bài toán giả định này sẽ góp phần minh chứng một cách tường minh nguy cơ mất an toàn hàng hải, có thể gây lật tàu do tác động của lực gia thêm lên tàu thủy khi thay đổi hướng chuyển động.

4. KẾT LUẬN

Bài báo xây dựng cơ sở toán học và quy trình chung thực hiện tính toán mô phỏng động lực học dòng chảy lỏng, dòng chảy khí ứng dụng trong hàng hải và hàng không bằng CFD. Trên cơ sở kết quả tính toán mô phỏng chi tiết, tin cậy cụ thể về độ mịn chia lưới, phân bố áp suất, hệ số áp suất, tốc độ dòng chảy..., từ đó áp dụng cụ thể vào đối tượng nghiên cứu và mở rộng đối tượng nghiên cứu, góp phần ứng dụng trong thực tiễn khoa học chuyên ngành.

Tài liệu tham khảo

- [1]. PGS. TS. TTr. Phạm Kỳ Quang, TS. Vũ Văn Duy (chủ biên), ThS. TTr. Nguyễn Văn Cang, PGS. TS. TTr. Nguyễn Phùng Hưng, TS. Cổ Tấn Anh Vũ, TS. Đặng Đình Chiến, ThS. TTr. Phạm Nguyễn Đăng Khoa, ThS. Vũ Đăng Thái (02/2020), Sách chuyên khảo: "Ứng dụng CFD xây dựng bản đồ dòng chảy tuyến luồng hàng hải", NXB. Hàng hải, ISBN: 978-604-937-217-9.
- [2]. PGS. TS. TTr. Phạm Kỳ Quang (Chủ biên), TS. Vũ Văn Duy, ThS. Bùi Văn Cường, ThS. Cổ Tấn Anh Vũ, ThS. Nguyễn Thành Nhật Lai (2017), Sách chuyên khảo "Ứng dụng CFD trong khoa học hàng hải", NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
- [3]. PGS. TS. Phạm Kỳ Quang (Chủ nhiệm đề tài), ThS. NCS. Nguyễn Văn Cang và các thành viên khác (2018), Nghiên cứu xây dựng thử nghiệm bản đồ dòng chảy phục vụ công tác dẫn tàu an toàn trên tuyến luồng hàng hải - Thực hiện thí điểm trên tuyến luồng Hải Phòng, Đề tài Khoa học - Công nghệ cấp Bộ GTVT, mã số: DT183035.
- [4]. Cổ Tấn Anh Vũ (Chủ nhiệm), PGS. TS. Phạm Kỳ Quang, TS. Vũ Văn Duy, ThS. NCS. Nguyễn Thành Nhật Lai cùng các thành viên khác (2017), Xây dựng chương trình tính toán mô phỏng và thử nghiệm một số nguyên nhân cơ bản dẫn đến tai nạn hàng hải trên tuyến luồng Sài Gòn phục vụ công tác đào tạo và huấn luyện thuyền viên, Đề tài Khoa học - Công nghệ cấp Bộ GTVT, mã số: DT174030.
- [5]. Cổ Tấn Anh Vũ (2018), Nghiên cứu ảnh hưởng xâm thực bánh lái đến lực bề lái tàu thủy, Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam.
- [6]. Nguyễn Thành Nhật Lai (2020), Nghiên cứu ảnh hưởng động lực học dòng chảy bao đến lực cản tàu thủy trong quá trình thay đổi hướng chuyển động, Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Trường Đại học GTVT, TP. Hồ Chí Minh.

[7]. Phạm Kỳ Quang, Nguyễn Văn Cang và nhóm cộng sự, *Các số liệu khảo sát và nghiên cứu thực nghiệm tại thực địa trên tuyến luồng Hải Phòng, 2017 - 2020.*

[8]. Phạm Kỳ Quang and other authors (2020), *Parametric study on aerodynamic performance of a single-stage transonic axial compressor with recirculation-bleeding channels*, International Journal of Fluid Machinery and Systems, vol.13, no.2, pp.348-360.

[9]. Phạm Kỳ Quang and other authors (2020), *Effects of boot-shaped rib on heat transfer characteristics of internal cooling turbine blades*, Journal of Heat transfer - Transaction of the ASME, vol.142, Issue 10, pp.102-106.

[10]. Phạm Kỳ Quang and other authors (2020), *Effects of stator splitter blades on aerodynamic performance of a single-stage transonic axial compressor*, Journal of Mechanical Engineering and Sciences, vol.14, no.4, pp.7369-7378.

[11]. Prof. Dr. Luong Cong Nho, Prof. Dr. Phạm Kỳ Quang, Dr. Vu Van Duy, PhD. Student Bui Van Cuong, PhD. Student Co Tan Anh Vu, PhD, Student Nguyen Thanh Nhat Lai (26 - 29 October, 2016), *Calculation and simulation of the current effects on maritime safety in Haiphong fairway, Vietnam*, International Association of Maritime Universities (IAMU), 17th Annual General Assembly (AGA), Hai Phong, Vietnam, pp.170-179.

Ngày nhận bài: 27/4/2022

Ngày chấp nhận đăng: 21/5/2022

**Người phản biện: PGS. TS. Nguyễn Thái Dương
TS. Trịnh Xuân Tùng**