

NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG CHUYỂN ĐỘNG CỦA TÀU TỰ HÀNH DƯỚI NƯỚC

NUMERICAL STUDY OF AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE MOVEMENT

Lê Thanh Long¹, Trần Ngọc Huy²

¹Khoa Cơ khí, PTN Trọng điểm Quốc gia ĐKS và KTHT (DCSELab), ltlong@hcmut.edu.vn

²Khoa Điện-Điện tử, tnhuy@hcmut.edu.vn
Đại học Bách khoa Thành phố Hồ Chí Minh

Tóm tắt: Ngày nay, phương tiện tự hành dưới nước được ứng dụng rộng rãi trên toàn thế giới. Phương tiện tự hành dưới nước được ứng dụng trong lĩnh vực viễn thám, nghiên cứu hải dương học, kiểm soát môi trường, bảo vệ lãnh hải,... Khả năng tự động điều khiển và phản ứng linh hoạt của phương tiện tự hành đã được khẳng định trong vai trò mũi nhọn phát triển của ngành tàu ngầm. Trong xu thế đó, bài báo này nghiên cứu chuyên sâu vào việc mô phỏng ảnh hưởng của dòng lưu chất tác dụng lên biên dạng của tàu tự hành bằng phương pháp tính toán động lực học dòng chảy. Kết quả mô phỏng cho thấy biên dạng của tàu tự hành ảnh hưởng đáng kể bởi lực cản tàu và đồng thời các điểm ứng suất nguy hiểm sẽ xuất hiện ở phần mũi tàu khi nó chuyển động. Ngoài ra, ảnh hưởng của biên dạng cánh lái đến lực cản và góc xoay của tàu cũng được tìm hiểu trong nghiên cứu này.

Từ khóa: Cánh tàu lặn, lực cản, phương tiện tự hành, tính toán động lực học dòng chảy.

Chỉ số phân loại: 2.1

Abstract: Nowadays, the autonomous underwater vehicle is applied worldwide. It can be applied in the field of remote sensing, oceanographic research, environmental control, territorial protection. The ability to automatically control and flexibly react to the autonomous underwater vehicle has been affirmed in the role of submarine industrial base development. In this trend, the study investigates on simulating the effect of fluid flow on the profile of an autonomous underwater vehicle by computational fluid dynamics method. The numerical results indicate that an autonomous underwater vehicle profile determines the drag and the largest stress occurs at the head of autonomous underwater vehicle when it moves. In addition, the effect of the wing profile on the drag and rotation angle of the autonomous underwater vehicle is also explored in this study.

Keywords: AUV wing, drag, autonomous underwater vehicle, computational fluid dynamics.

Classification number: 2.1

1. Giới thiệu

Nghiên cứu về phương tiện tự hành dưới nước (Autonomous Underwater Vehicle - AUV) được tiến hành từ rất sớm. Năm 1930 những nỗ lực của Otis Barton và William Beebe đã giúp con người lặn xuống và quan sát đại dương ở độ sâu hơn 500m [1]. Thời gian gần đây, rất nhiều nghiên cứu về phương tiện tự hành dưới nước được chú ý. Một trong những động lực lớn nhất cho việc phát triển thiết bị lặn không người lái (Unmanned underwater vehicle - UUV) là khi độ sâu ngành công nghiệp dầu mỏ đã vượt qua giới hạn của thợ lặn và các lựa chọn thay thế là không còn. Đối với thiết bị lặn không người lái người ta thường chia thành hai dạng đó là thiết bị lặn điều khiển từ xa (Remotely Operated Underwater Vehicle - ROV) hoặc là thiết bị lặn tự hành (AUV). Do

kỹ thuật ban đầu còn kém, các cảm biến chưa được tinh gọn, hệ thống năng lượng chưa thể lưu trữ được nhiều nên hầu như thiết bị lặn tự hành chưa được phát triển.

Trên thế giới, AUV rất được quan tâm. Vào cuối thế kỷ trước, AUVs đã dần dần chuyển từ môi trường học thuật điều khiển đến những viễn cảnh đầy thách thức, bao gồm các ứng dụng khoa học, thương mại và quân sự. Cụ thể, từ năm 2000 đến 2010, là giai đoạn phát triển thị trường thương mại của AUV. Việc sử dụng công nghệ AUV vào các ứng dụng thương mại trở nên khá rõ ràng. Các chương trình sử dụng AUV được xây dựng và đưa vào hoạt động. Các thị trường AUV được xác định và đánh giá như một thị trường độc lập. Đây là một thập kỷ mà công nghệ AUV chuyển từ nghiên cứu môi trường, học thuật sang các ngành công

nghiệp, thương mại đại dương [2]. Tại Việt Nam, AUV hiện chỉ mới đạt những bước đầu, và chưa có nhiều kết quả. Những thông tin có thể tìm được, hầu hết tập trung dạng thiết bị tiền AUV, do những nhóm nghiên cứu robot phát triển, với cấu trúc cũng khá đơn giản [3].

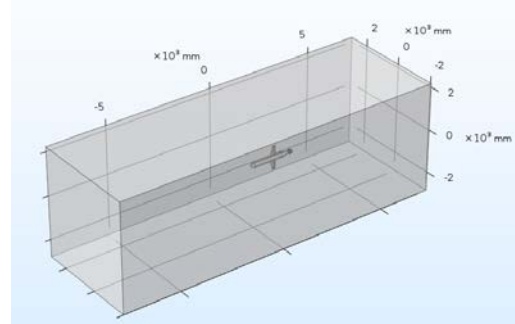
Tuy nhiên, hầu hết các loại AUV hiện có đều là bán tự động, cấu tạo thường thấy là dạng khối với phần dây nối trực tiếp tới tàu mẹ, bên trong chứa các sợi dây cáp điện, cáp quang truyền dữ liệu,... Cấu tạo này tuy dễ gia công nhưng sẽ khó đạt hiệu suất cao trong việc di chuyển. Do hoạt động nhiều dưới nước, nên dòng chảy quanh AUV sẽ ảnh hưởng rất nhiều tới hoạt động và tốc độ của nó. Để khắc phục vấn đề đó, chúng ta có thể ứng dụng phương pháp tính toán động lực học lưu chất để nghiên cứu tính chất dòng chảy của lưu chất quanh AUV, tính toán động lực học dòng chảy tác dụng lên AUV. Từ đó sẽ có cơ sở khoa học trong việc hoàn thiện thiết kế thực tế cho AUV.

Cơ học chất lưu và thủy - khí động lực học tính toán (CFD – Computational Fluid Dynamics), hay thường gọi ngắn gọn là khí động lực học tính toán hoặc đơn giản hơn là tính toán khí động. Lĩnh vực thuộc ngành phát triển sớm, nhanh, rộng rãi, ngày càng nhanh và đạt nhiều thành tựu vô cùng to lớn trên lý thuyết cũng như thực tế. Việc nghiên cứu AUV dựa trên CFD đã đạt được nhiều thành tựu nhất định. Trong thời gian gần đây, CFD đã được ứng dụng nghiên cứu các thiết bị thủy động gắn với AUV. CFD được ứng dụng để nghiên cứu lực cản lên thân thuyền [4], kiểm tra độ bền của vỏ tàu dưới các vận tốc khác nhau [5]. Các nghiên cứu CFD tập trung vào AUV cũng đã được thực hiện, nhưng chưa phổ biến. Các kết quả tiêu biểu có thể kể đến như việc xác định mối tương quan giữa biên dạng AUV và lực cản, hoặc nghiên cứu các vùng chảy rối quanh AUV [6, 7]. Bằng cách áp dụng phương pháp tính toán động lực học dòng chảy, bài báo nghiên cứu tác dụng của áp suất lên các tàu AUV ở các quá trình hoạt động khác nhau. Bên cạnh đó, bài báo cũng phân tích lực đẩy của động cơ cho trường hợp có nhiều. Ngoài

ra, khả năng bù góc xoay dọc trục của hệ thống cánh bên cũng được khảo sát.

2. Mô hình vật lý và phương pháp số

Mô hình nghiên cứu là tàu lặn AUV có biên dạng Myring như hình 1 [8]. Mô hình biên dạng này được xây dựng phù hợp với sản phẩm thực tế. Tính chất vật lý của nước biển và vật liệu vỏ tàu lặn (nhôm) được trình bày trong bảng 1.



Hình 1. Mô hình tàu tự hành dưới nước.

Bảng 1. Tính chất vật lý của nước và nhôm.

Tính chất	Giá trị	Đơn vị
T	20	$^{\circ}\text{C}$
$P_{\text{nước biển}}$	1030	Kg/m^3
η	0,00099	
$P_{\text{nhôm}}$	2700	Kg/m^3
ε	68.9	GPa

Trong đó, T là nhiệt độ của nước, $P_{\text{nước biển}}$ là khối lượng riêng của nước biển, $P_{\text{nhôm}}$ là khối lượng riêng của nhôm, η là độ nhớt của nước biển, ε là modul đàn hồi của nhôm 6061. Phương trình toán học mô tả quá trình chuyển động của tàu lặn AUV dưới nước bao gồm [9]:

Phương trình liên tục:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

Phương trình động lượng (Phương trình Navier - Stock):

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u + F_x \quad (2)$$

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} \right] = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v + F_y \quad (3)$$

$$\rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(uw)}{\partial x} + \frac{\partial(vw)}{\partial y} + \frac{\partial(w^2)}{\partial z} \right] = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 w + F_z \quad (4)$$

Ngoài phần Inlet, Outlet và biên dạng tàu được định nghĩa theo cách thông thường, bốn bên còn lại của hình lập phương được đặt ở dạng Symmetry. Điều kiện biên của các

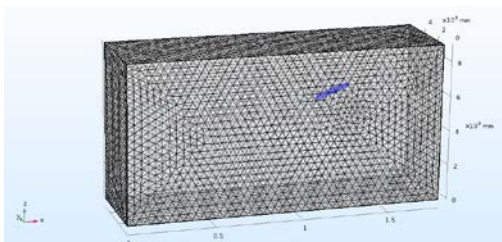
bề mặt mô hình vật lý được thể hiện trong bảng 2.

Bảng 2. Điều kiện biên ở các tiết diện.

Dạng bề mặt	Phương trình toán
Inlet	$u = -U_0 n$
Outlet	$[-pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)]n = -\hat{p}_0 n$
Moving wall	$u = u_0$
Symmetry	$\kappa - (\kappa \cdot n)n = 0, \kappa = [\mu(\nabla u + (\nabla u)^T)]n$

Trong nghiên cứu này, phần mềm Comsol Mutiphysics được dùng để mô phỏng chuyển động của AUV dưới nước. Phần mềm này chia mô hình mô phỏng thành các phần tử (element) với kích thước lưới nhỏ và các phương trình toán đã đề cập ở trên được biến đổi thành dạng ma trận tuyến tính có thể giải được bằng phương pháp số (hình 2). Do bài toán đặt ra cần phải mô phỏng được sự di chuyển của AUV, vì thế cần phải sử dụng phương pháp Moving Mesh, cho phép ta biến lưới tĩnh được chia lúc đầu thành lưới động. Nền tảng của Moving Mesh dựa trên phương pháp ALE - Arbitrary Lagrangian Eulerian. Để điều khiển biến dạng của từng mắt lưới, ta sử dụng phương pháp Windslow, với công thức:

$$\frac{\delta^2 X}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 Y}{\delta y^2} = 0 \quad (5)$$



Hình 2. Mô hình lưới của tàu lặn.

Khi AUV di chuyển với vận tốc lớn, lưới sẽ bị biến dạng nhiều, gây ra lỗi Inverted Mesh, quá trình mô phỏng sẽ không thể hội tụ. Để khắc phục hiện tượng này, ta sẽ chia lại lưới theo phương trình:

$$\delta M > 2 \quad (6)$$

Trong đó, δM là tỉ số thể tích của mắt lưới sau và trước biến dạng. Sau khi giải ra được trường áp suất và vận tốc của mô hình, ta tiến hành phân tích lực. Để tính lực trong bài toán mô phỏng ta sử dụng công thức sau [10]:

$$F = \iint_S [\vec{n} \cdot \vec{\Pi}]_{\text{surface}} dS \quad (7)$$

Trong đó dS là vi phân diện tích tàu, n là vector đơn vị, vuông góc với dS , Π là tensor ứng suất. Trong phần mềm Comsol Multiphysics, tích của tensor ứng suất và n được thể hiện bởi công thức sau:

$$T = [\vec{n} \cdot \vec{\Pi}]_{\text{surface}} = \begin{pmatrix} \text{spf.T_stressx} \\ \text{spf.T_stressy} \\ \text{spf.T_stressz} \end{pmatrix}_{xyz} \quad (8)$$

Từ ấy, công thức tính lực dọc trục tàu (trục x), sẽ được rút gọn thành:

$$F_x = \iint_S (\text{spf.T_stressx}) dS \quad (9)$$

Tương tự ta có công thức tính lực cho thành phần vuông góc (trục y):

$$F_y = \iint_S (\text{spf.T_stressy}) dS \quad (10)$$

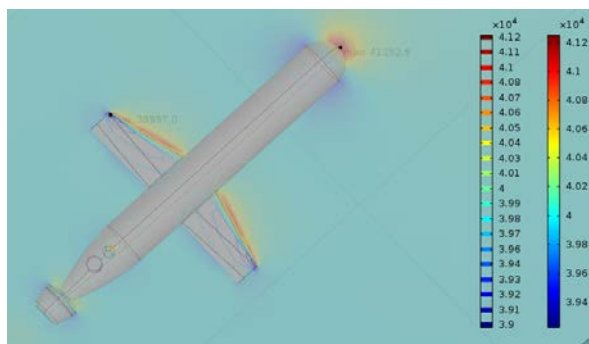
Tương tự ta có công thức tính lực cho thành phần tiếp tuyến (trục z):

$$F_z = \iint_S (\text{spf.T_stressz}) dS \quad (11)$$

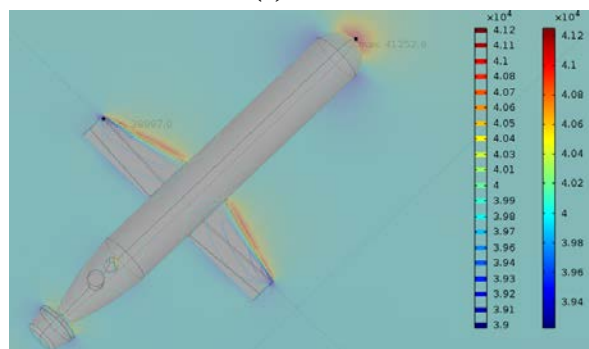
3. Đánh giá kết quả mô phỏng

Tàu được thiết để chạy ổn định ở tốc độ tối đa 2 m/s, độ sâu trung bình 4 m, độ sâu tối đa 50 m. Các điều kiện đầu vào cho quá trình mô phỏng tuân theo các yêu cầu thiết kế này. Hình 2 biểu thị phân bố áp suất trên thân tàu ở độ sâu 4 m, ở tốc độ lần lượt 1 m/s, 1.5 m/s, 2 m/s. Dựa vào kết quả mô phỏng, ta có thể thấy áp suất mũi tàu là lớn nhất trong trường hợp tàu chạy ngang. Vì thế ta cần tìm hiểu thêm về áp suất tại điểm này. Kết quả áp suất mũi tàu được mô tả ở hình 3.

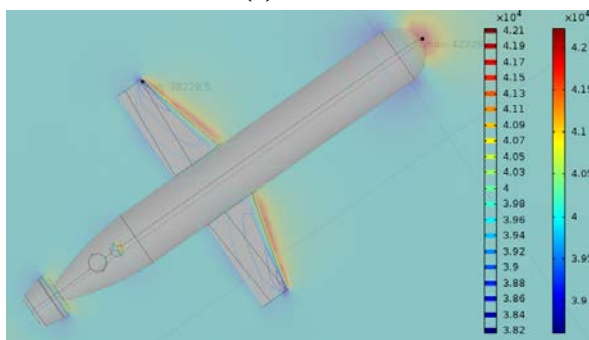
Áp suất mũi tàu khi hoạt động ổn định sẽ có một giá trị ổn định. Giá trị này đạt cực đại (421800Pa) khi tàu di chuyển với tốc độ 2m/s. Từ việc xác định trường áp suất ta có thể tính được lực cản của nước theo thời gian, dựa trên công thức đã được đề cập trong phần 2. Kết quả lực cản được thể hiện trong hình 4.



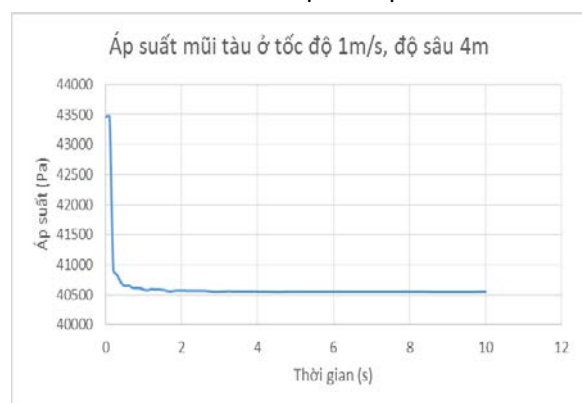
(a) 1m/s



(b) 1,5m/s



(c) 2m/s

Hình 3. Phân bố áp suất trên thân tàu ở các tốc độ lần lượt.

(a)



(b)



(c)

Hình 4. Áp suất mũi tàu theo thời gian.

(a)



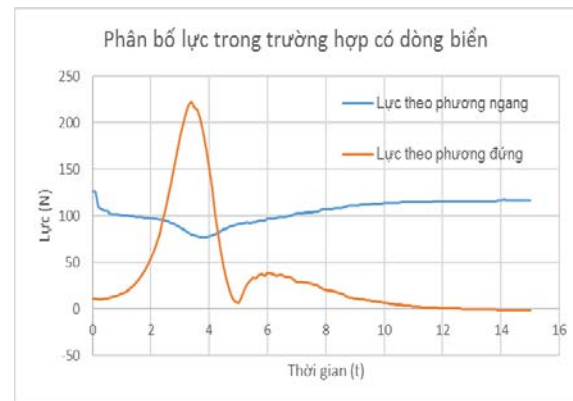
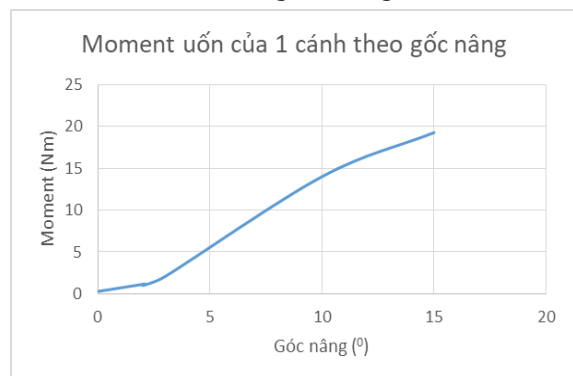
(b)



(c)

Hình 5. lực cản của nước theo thời gian.

Lực cản tối đa của nước khi tàu hoạt động ở tốc độ 2 m/s là 113.2 N. Thông số lực cản này sẽ được sử dụng để thiết kế động cơ đẩy cho AUV. Khi AUV hoạt động, có thể có nhiều loại nhiễu xảy ra. Trong đó, độ nhiễu có ảnh hưởng lớn nhất là dòng biển. Tốc độ và hướng của dòng biển rất đa dạng. Ở đây, bài báo trình bày kết quả mô phỏng cho hai trường hợp: Tàu đi xiên xuống với vận tốc đứng 1 m/s, vận tốc ngang 1 m/s. Dòng biển di chuyển theo phương ngang với tốc độ 1 m/s, ngược chiều di chuyển của AUV. Kết quả lực cản của nước lên tàu được thể hiện ở hình 5. Dựa vào kết quả mô phỏng, ta có thể thấy trong trường hợp này lực cản rất lớn. Đặc biệt, lực cản theo phương đứng có thể lên tới 222N. Để AUV có thể di chuyển trong trường hợp này, cần có các thiết kế đặc biệt để thắng lực cản. Ngoài tìm hiểu về lực cản, bài báo còn tiến hành mô phỏng góc cánh AUV. Trong các loại AUV sử dụng một động cơ đẩy cần có góc cánh phù hợp để khử moment khiến tàu quay dọc trục. Mối liên hệ giữa góc cánh và moment sinh ra được thể hiện ở hình 6. Theo thiết kế ở tài liệu [11], moment cần thiết trong trường hợp này là 1.09N. Vì thế, ta nội suy góc cánh cần thiết theo biểu đồ trên là 2.01° . Moment do góc cánh này tạo ra theo thời gian được thể hiện ở hình 7. Kết quả mô phỏng cho thấy góc cánh tính toán phù hợp đến 93,57% yêu cầu thực tế. Vì vậy đây là một kết quả khả quan có thể tham khảo khi thiết kế.

**Hình 6.** Lực cản của nước khi có ảnh hưởng của dòng biển.**Hình 7.** Mối liên hệ giữa moment và góc nghiêng cánh.**Hình 8.** Moment quay do một cánh gây ra theo thời gian.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày kết quả mô phỏng chuyển động của tàu lặn dưới nước. Các kết quả mô phỏng về trường áp suất, lực cản cho thấy mũi tàu là phần chịu ứng suất lớn nhất trong quá trình tàu lặn AUV hoạt động. Về căn bản, các kết quả chỉ ra phù hợp với thực tế, đưa ra nhiều số liệu tham khảo có ích cho hoạt động thiết kế.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Hồ Chí Minh (VNU-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số B2018-20b-01.

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM; Phòng thí nghiệm Trọng điểm Quốc gia Điều khiển số và Kỹ thuật hệ thống (DCSELAB) - Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM; Phòng thí nghiệm Công nghệ thiết kế và Gia công tiên tiến - Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này □

Tài liệu tham khảo

- [1] **Vikrant P. Shah (2005)**, *Design Considerations for Engineering Autonomous Underwater Vehicles*, B.S thesis, The University of Texas at Austin;
- [2] **D. Richard Blidberg (2001)**, *The Development of Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*; A Brief Summary, Autonomous Undersea Systems Institute, Lee New Hampshire, USA;
- [3] **Phạm Thượng Cát**, *Xu thế phát triển Robot trên thế giới và tình hình nghiên cứu Robot ở Việt Nam hiện nay*, Tạp chí tự động hóa ngày nay, số 123 (2011);
- [4] **Mohammad Moonesun**, *CFD Analysis on the Bare Hull Form of Submarines for Minimizing the Resistance*, Int. J. Maritime Technology, Vol.3, pp 1-16 (2015);
- [5] **S. Carberry Mogan**, *CFD Study of an Autonomous Submarine in Extraterrestrial Seas*, Proceedings of the ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC2017) (2017);
- [6] **M. M. Karim**, *Computation of Turbulent Viscous Flow around Submarine Hull Using Unstructured Grid*;
- [7] **P.G. Marshallsay**, *Use of computational Fluid Dynamics as a Tool to Assess the Hydrodynamic Performance of a Submarine*, 18th Australasian Fluid Mechanics Conference (2012);
- [8] **D.F. Myring**, *A theoretical study of the effects of body shape and Mach number on the drag of bodies of revolution in subcritical axisymmetric flow*, Technical Report 81005 (1981);
- [9] **Trần Đình Thắng**, *Tổng quan về CFD*, Moscow Institute of Physics and Technology (2012);
- [10] **Faith Morrison**, *Calculating Fluid Force on Surfaces in COMSOL 5.1*, Michigan Technological University (2015);
- [11] **Đinh Quang Vinh (2015)**, *Phân tích và thiết kế robot lặn không người lái*.

Ngày nhận bài: 17/4/2020

Ngày chuyển phản biện: 22/4/2020

Ngày hoàn thành sửa bài: 13/5/2020

Ngày chấp nhận đăng: 20/5/2020