

TÍNH LỰC NÂNG CỦA HỆ THỐNG CÁNH NGẦM

GIỚI THIỆU

Tàu cánh ngầm có tỉ số lực nâng/lực cản cao nhất trong số các loại tàu thủy. Công nghệ cánh ngầm gây chú ý ở nửa sau của thế kỷ 20, và từ đó hàng ngàn tàu cánh ngầm đã được chế tạo. Tuy nhiên hiện nay vị trí áp đảo trong thị trường tàu khách cao tốc của tàu cánh ngầm đã bị thay thế bởi các tàu hai thân (đơn giản trong bảo dưỡng, chi phí thấp) nhất là với các tàu có kích thước tương đối lớn. Công nghệ tàu cánh ngầm đang trải qua quá trình tái khẳng định. Việc trang bị cánh ngầm cho các tàu hai thân hiện hữu và đóng mới tàu nhiều thân có trang bị cánh ngầm đang là hiện tượng bùng nổ. Các tàu cánh ngầm đã cải thiện đáng kể hiệu suất của dòng tàu cao tốc. Hệ thống cánh ngầm được áp dụng thành công trong mục tiêu làm êm chuyển động của các tàu cao tốc cỡ lớn và cho thấy triển vọng tốt của đội tàu cánh ngầm biển. Mặc dù tàu cánh ngầm tiết kiệm khoảng 50% nhiên liệu tiêu thụ và tính đi biển được cải thiện đáng kể, nhưng công nghệ tàu cánh ngầm vẫn chưa được phổ biến rộng rãi. Một trong những nguyên nhân cản trở là quá trình nâng cao hiệu suất phức tạp.

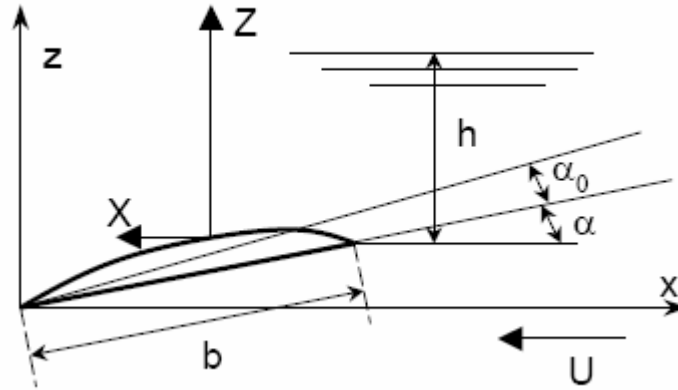
Có nhiều tài liệu chuyên về mô hình hoá cánh ngầm. Một trong những nghiên cứu trước đây sử dụng cách tiếp cận đơn giản (Sakic 1981, Latorre 1992...), trong đó bỏ qua nhiều nhân tố quan trọng như ảnh hưởng của quá trình chuyển động và tương tác giữa các hệ thống cánh. Bên cạnh đó, các công cụ động lực học chất lỏng tính toán được phát triển gần đây có thể mô phỏng một cách chính xác hệ thống cánh ngầm (Walree 1999, Migeotte 2002...). Tuy nhiên các công cụ này đòi hỏi nhiều về tính toán và phần nào đó còn dựa vào kiến thức kinh nghiệm.

Tài liệu này mô tả phương pháp xây dựng công cụ khá đơn giản nhằm tính toán thiết kế thủy động hệ thống cánh ngầm và tàu thuyền. Trên cơ sở các lực thủy động được xây dựng từ những lý thuyết cơ bản, bổ sung thêm các hệ số hiệu chuẩn để tính đến ảnh hưởng của điều kiện thực tế. Các hệ số này đạt được hoặc từ các mô hình toán học khác, hoặc từ kinh nghiệm (Ogilvie 1958; Egorov 1965...)

Một trong những mục tiêu của phương pháp này là giảm chi phí và công cụ đủ đơn giản để có thể dễ sử dụng trong thiết kế thực tế. Do đó một vài khác biệt giữa kết quả thử nghiệm mô hình và thử nghiệm thực tế có thể được bỏ qua. Thiết kế tàu cánh ngầm và các phương tiện thủy tiên tiến khác không hề dễ thực hiện như thiết kế các tàu thông thường. **Thử nghiệm mô hình là điều rất cần thiết khi thiết kế loại hình này.** Các mẫu có tỷ lệ trung gian cũng rất hữu dụng để giảm sự sai khác giữa mô hình và tàu thật, giúp đạt được hiệu năng tối ưu ở tàu thật. Công cụ đang xây dựng không thể thay thế cho thử nghiệm, nhưng được xem như là phương tiện để tối ưu thiết kế tàu và giảm thời gian tính toán.

Các hiện tượng vật lý then chốt đối với thiết kế hệ thống cánh ngầm hiệu năng cao được thể hiện trong những phần sau. Đặc biệt, tài liệu giới thiệu công thức tổng quát về lực nâng của mặt cắt ngang cánh, và tổng quát hóa công thức này cho những hệ thống cánh phức tạp. Tài liệu cũng đề cập đến tương tác của cánh dạng tandem (bố trí kiểu trước – sau), phương pháp thuận tiện để tính các lực thủy động không đều, và phát triển mô phỏng chuyển động 6D cho tàu cánh ngầm. Hệ số hiệu chuẩn và các hàm không được giới thiệu chi tiết ở đây do giới hạn khuôn khổ bài báo, và do tính bản quyền.

CÁC LỰC THUỶ ĐỘNG ĐỀU



Hình 1: Sơ đồ cánh ngàm tổng quát

Lực nâng do cánh tạo nên (hình 1) xác định theo biểu thức:

$$Z = C_z \frac{\rho U^2}{2} S ; \quad (1)$$

với C_z là hệ số nâng; ρ là mật độ nước; U là tốc độ dòng chảy so với cánh, α là góc tấn; S là diện tích một mặt cánh.

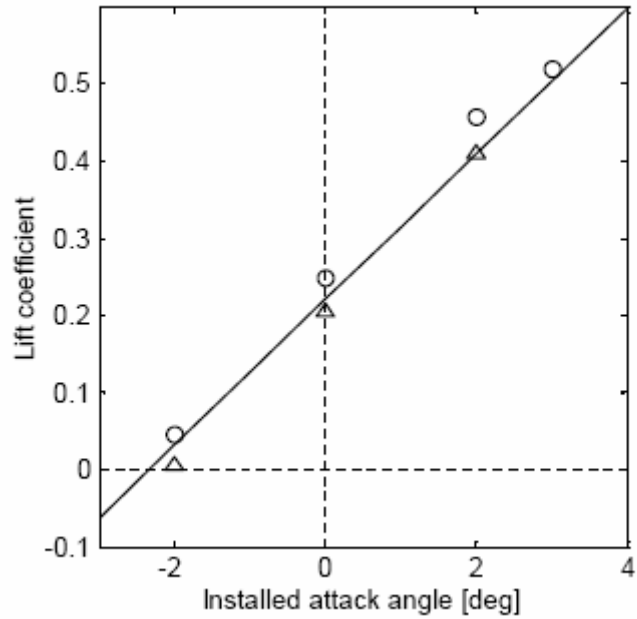
$S = \lambda b^2$, với λ là tỉ số mặt cánh; b là chiều dài dây cung.

Hệ số lực nâng của cánh có tỉ số mặt hữu hạn, di chuyển bên dưới bề mặt nước tự do được tính theo biểu thức:

$$C_z = \frac{k_\varphi \left(\frac{\partial C_z}{\partial \alpha} \right)_0 (\alpha + \alpha_0 - \Delta\alpha)}{1 + \left(\frac{\partial C_z}{\partial \alpha} \right)_0 \frac{k_\varphi}{\pi \lambda} \frac{1 + \tau}{\zeta + \theta}} \quad (2)$$

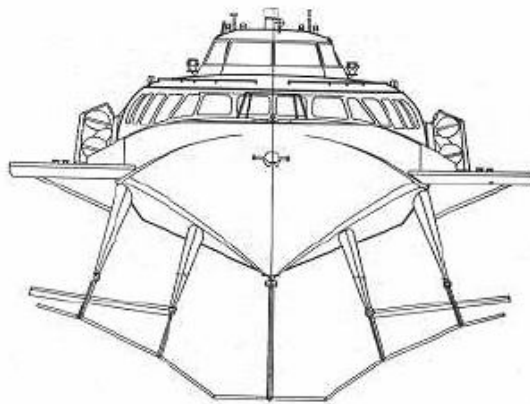
Đạo hàm của hệ số lực nâng theo góc tấn $\left(\frac{\partial C_z}{\partial \alpha} \right)_0$ được tính đối với cánh có tỉ số mặt vô

hạn, ngập sâu trong nước. Với chất lỏng lý tưởng và profile cánh mỏng, hệ số này (C_z) bằng 2π . Giá trị hiệu chỉnh đối với hệ số này phụ thuộc vào tỉ số chiều dày profile/dây cung, số Reynolds và góc của mép theo phải được dùng để tính ảnh hưởng này (Martin, 1963). Góc tấn biểu kiến α là góc giữa đường nối của cạnh theo và cạnh dẫn và mặt phẳng nằm ngang. Góc tấn ban đầu là α_0 . Góc này là hàm của độ khum cánh, số Reynolds và góc đóng của mép theo. Chương trình XFOIL (Drela 1989) là một phương pháp để xác định ảnh hưởng của độ nhớt đến góc tấn ban đầu. Những thảo luận về ảnh hưởng của số Reynolds có thể tìm thấy trong các tài liệu (Walree, 1999) và (Migeotte, 2002). Trạng thái gần bề mặt tự do được tính đến bởi sự hiệu chuẩn $\Delta\alpha_0$ và k_φ theo góc tấn và đạo hàm của hệ số lực nâng, theo thứ tự đó. Chúng là các hàm của tỉ số dây cung/chiều dày và dây cung/chiều chìm cánh. Mẫu số trong phương trình 2 là đúng với tỉ số mặt hữu hạn λ , τ là hiệu chuẩn Glauert. Ảnh hưởng của chiều rộng cánh gây tác động đến dòng theo được tính đến bởi ζ , và ảnh hưởng của các thanh giằng được tính bởi θ (Egorov và Sokolov 1965). Đây là hàm của vị trí thanh giằng, chiều chìm cánh và tỉ số mặt.



Hình 2: Hệ số lực nâng của dạng cánh YS-920. O, Δ là dữ liệu thực nghiệm ứng với bề mặt bóng và bề mặt nhám. Đường liền là kết quả tính toán mô hình;

Hình 2 so sánh kết quả tính từ phương trình 2 và dữ liệu thực nghiệm của hệ số lực nâng ở một mặt cắt ngang của cánh và số Reynold là 1.5×10^6 .

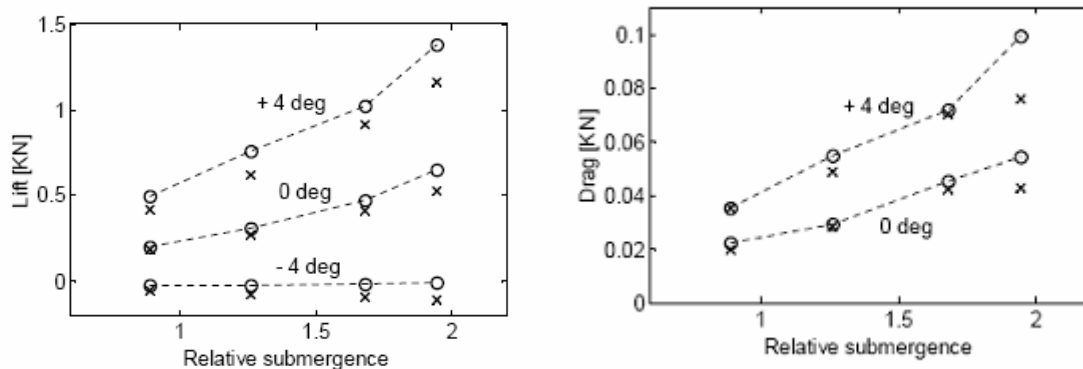


Hình 3: Tàu cánh ngầm cao tốc lớp Olympia

Sức cản thủy động của hệ thống cánh bao gồm các thành phần hình dáng, cảm ứng và tạo sóng. Các thanh giằng có sức cản hình dáng, sức cản tóe nước và đôi khi có cả thành phần sức cản bọt khí (chính là năng lượng mất mát do sự hình thành bọt khí). Các tiết diện cánh cắt ngang mặt nước cũng có thể tạo sức cản tóe nước. Các tấm chắn chuyên dùng thường được lắp đặt trên cánh và mặt cắt ngang thanh giằng gần đường nước vận hành để giảm tối đa thành phần sức cản này và để tránh sự tiếp xúc với không khí của cánh ngầm. Các tàu cánh ngầm hiệu năng cao thường hoạt động ở chế độ cận sủi bọt. Biên của miền cận sủi bọt của một biên dạng cánh cụ thể là hàm của hệ số lực nâng, tỉ số chiều dày cánh/dây cung và số sủi bọt.

Để tính toán các lực thủy động của hệ cánh có bề mặt cắt sóng phức tạp, như trường hợp tàu cánh ngầm trên hình 3, có thể áp dụng phương pháp chuỗi ngang. Sải cánh được chia thành một số đoạn và hệ số nâng cục bộ được tính cho mỗi đoạn có tính đến biên dạng cánh cục bộ, đặc tính dòng chảy cục bộ và toàn bộ sải cánh của hệ thống cánh ngầm.

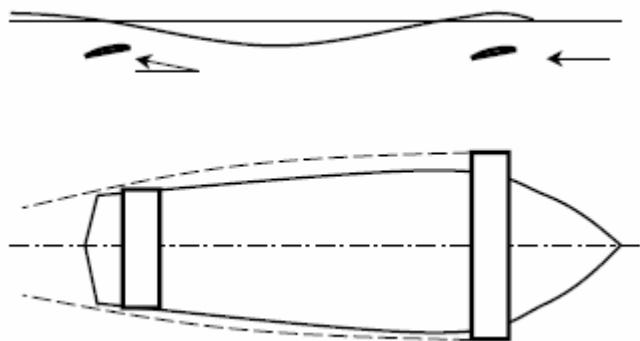
Một trong số các biến thể ban đầu của hệ thống cánh mũi của lớp tàu Olympia (hình 3) được thử nghiệm trên mô hình có tỉ lệ chiều dài dây cung - số Raynold là $5,5 - 8 \times 10^5$. Giá trị đo của lực nâng và sức cản được cho trên hình 4 bởi các dấu tròn (O). Giá trị tính các đại lượng này theo lý thuyết giới thiệu trong tài liệu này được biểu thị bởi các dấu gạch chéo (x). Hình 4 cho thấy sự phù hợp đáng kể giữa lý thuyết và thử nghiệm mô hình



Hình 4: Lực nâng và lực cản hình thành trên mô hình hệ thống cánh ngầm phía mũi của một biến thể tàu cánh ngầm lớp Olympic. O: dữ liệu thực nghiệm, X: kết quả lý thuyết.

trong phạm vi góc tấn vận hành và chiều chìm tương đối. Việc chọn giá trị thấp đối với lực nâng nhằm mục đích giảm ảnh hưởng của độ nhớt đến đạo hàm lực nâng và góc tấn ban đầu (góc tấn zero) trong vùng phụ cận mặt nước tự do (Migeotte 2002). Một nhân tố quan trọng khác là sự phân bố không đều lực nâng dọc theo sải cánh. Trên một cánh đơn có góc nhị diện bằng zero (góc tạo bởi hai sải cánh), mặt cắt ở giữa thường chịu tải lớn hơn các mặt cắt nằm gần mút cánh. Do đó tàu cánh ngầm có chiều chìm của phần giữa cánh sâu hơn thường tạo ra lực nâng cao hơn so với tính toán theo phương pháp gần đúng, mặc dù ảnh hưởng của thanh giằng sẽ làm giảm bớt một phần hiệu quả này. Sự hiệu chỉnh theo kinh nghiệm sẽ được áp dụng để tính đến các hiện tượng như vậy khi thiết kế kỹ thuật hệ thống cánh ngầm.

TƯƠNG TÁC CÁNH

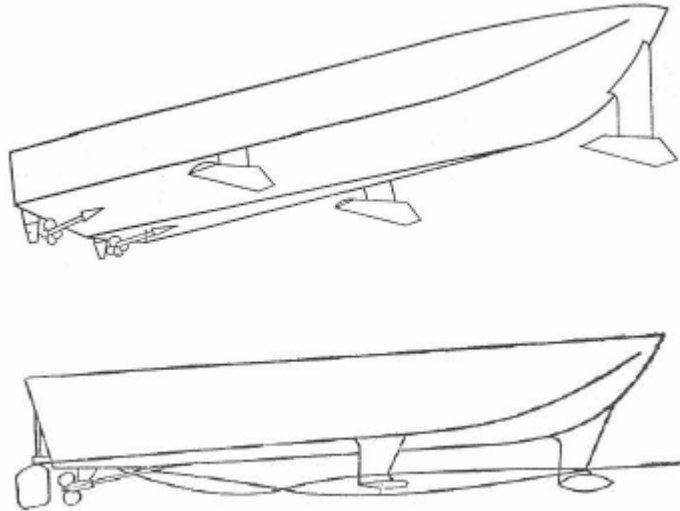


Hình 5: Hõm (đáy) sóng phía sau cánh ngầm và sự bố trí cánh dạng tandem (trước sau);

Khi di chuyển trong vùng phụ cận của mặt nước tự do, tàu cánh ngầm sẽ tạo nên hệ thống sóng phía sau nó (hình 5). Nếu cánh ngầm khác đặt trong vùng vữa của hệ thống sóng này thì lực nâng do nó sinh ra sẽ có xu hướng chuyển thành lực đẩy. Chiều dài vùng hõm sóng xấp xỉ tỷ lệ với tốc độ và căn bậc hai của sai cánh trước. Khoảng cách từ mặt nước đến vùng không rời phụ thuộc đặc điểm hình học của cánh trước, vào chiều chìm của nó, vào lực nâng và tốc độ tàu. Các biểu thức tính các đại lượng này hiện rất phổ biến (Kolyzaev, Kosorukov, Litvinenko 1980; Baiki 1981; Voitkunsky 1985). Bên cạnh ảnh hưởng của sự biến dạng của bề mặt nước, còn có sự ảnh hưởng đến cánh phía lái do dòng xoáy từ cánh trước tạo nên. Với các tàu cánh ngầm hoạt động trong vùng nước nông, cần tính tác động của bề mặt nước tự do đến ảnh hưởng này (Voitkunsky, 1985).

Hệ thống cánh dạng Tandem (bố trí kiểu trước – sau thẳng hàng) được sử dụng rộng rãi trong nửa sau thế kỷ 20. Tuy nhiên sự phức tạp trong quá trình phát triển và sản xuất là rào cản lớn khi thiết kế và chế tạo những lớp tàu mới. Ngoài ra dạng cánh này yêu cầu được bảo dưỡng chuyên biệt. Các tàu hoạt động theo nguyên lý chỉ một phần trọng lượng được hỗ trợ bởi các thiết bị nâng, đang trở nên phổ biến hơn. Các tàu đó sử dụng hệ thống thiết bị nâng đơn giản hơn, và một phần thân tàu luôn tiếp xúc với mặt nước, việc bố trí hệ thống thiết bị này đơn giản hơn. Sự tương tác giữa thân và thiết bị nâng ở các tàu đó khá phức tạp, và việc tối ưu hoá sự hoạt động của dạng thể mới này yêu cầu tính toán công phu hoặc cần phải thử nghiệm tỉ mỉ.

Một dạng bố trí kiểu tandem hiệu năng cao cho trên hình 6. Nó đặc biệt phù hợp khi tàu hoạt động trong vùng nước nông hoặc với các tàu có lượng chiếm nước lớn. Cánh phía trước tạo nên vùng hõm sóng ở phía sau nó và đáy phía sau dạng lướt với thiết bị đẩy được lắp trong miền dòng chảy hướng lên. Hệ thống cánh giữa bao gồm hai cánh riêng biệt lắp ở mạn tàu. Các cánh giữa này hoạt động bên ngoài vùng hõm sóng do cánh trước tạo nên. Vị trí của các cánh giữa được chọn để cung cấp sự tương tác thích hợp giữa cánh trước và cánh giữa. Các cánh giữa cũng có thể làm gai tốc dòng chảy hướng lên ở bề mặt lướt phía lái tàu. Do vậy tất cả những sự tương tác giữa các phần tử thủy động trong dạng bố trí này đều có tác dụng tích cực. Ưu điểm đáng kể khác của hệ thống này là cải thiện tính ổn định ngang, phân bố lực nâng thủy động dọc theo kết cấu tàu đều hơn, và tính đi biển tốt hơn.



Hình 6: Sơ đồ tàu cánh ngầm với ự tương tác hữu ích của các phần tử thủy động
(Matsimov và các cộng sự, 1975)

CÁC LỰC KHÔNG ĐỀU

Khi dự đoán chuyển động không đều của tàu thuyền, cần phải biết các lực thủy động không đều tác động trên thiết bị nâng. Nếu quá trình không đều đủ chậm (như trong sóng dài...) có thể áp dụng để tính các lực này theo các phương trình 1 và 2. Nếu sự nhiễu loạn bé và có tính chu kỳ thì các lực (kể cả biên độ và pha) sẽ phụ thuộc vào số Strouhal (hoặc tần số). Với các bài toán thực sự không đều, cần phải áp dụng phương pháp không đều để tính các lực này. Các phương pháp lưới đã được sử dụng cho các tàu cánh ngầm (theo Walree 1999), nhưng sự phức tạp của phương pháp này gây bất tiện đối với việc thiết kế hệ thống cánh ngầm đa thành phần. Phương pháp gần đúng trình bày trong tài liệu này là áp dụng các kết quả giải tích có được từ các bài toán đơn giản, bổ sung thêm hệ số hiệu chỉnh kinh nghiệm đối với các ảnh hưởng thực tế. Chẳng hạn như, theo Egorov, dạng tổng quát của lực nâng thủy động không đều tác động lên cánh ngầm có thể được biểu diễn như sau:

$$Y = Y_{qs} + Y_{am} + Y_{vw} \quad (3)$$

Lực gần đều Y_{qs} được tính theo phương trình (1) nhưng với góc tấn hiệu dụng là

$$\alpha_{ef} = (-V_1 + b\omega/4)/U$$

trong đó ω là vận tốc góc quanh trục ngang;

$$V_1 = V_y - U\alpha ;$$

V_y là vận tốc thẳng đứng của cánh, α là góc tấn biểu kiến;

$$Y_{am} = -\frac{d(\Delta m V_1)}{dt} \quad (4)$$

là lực có bản chất như lực quán tính, phụ thuộc lượng nước kèm. Với cánh hình chữ nhật, lượng nước kèm được tính gần đúng như đối với tấm phẳng với sự hiệu chỉnh của tỉ số mặt và chiều chìm tương đối :

$$\Delta m = \rho \pi (b/2)^2 b \lambda k(\lambda) f_1(h/b)$$

Thành phần lực thứ 3 trong (3) phụ thuộc vào cường độ xoáy dòng chảy :

$$Y_{sv} = -\frac{1}{2} \rho b^2 \lambda U f_1(h/b) \int_0^{s_1} \frac{\gamma_s d(s)}{\sqrt{(s-s_1-b/2)^2 - (b/2)^2}} \quad (5)$$

với $\gamma(s)$ là mật độ lưu số trong dòng theo ở tọa độ ngang s , và s_1 là tọa độ mép theo của cánh ngầm. Với một vài trường hợp kinh điển (như biến điều hòa, gia tốc đều...) và biên dạng cánh lý tưởng, cường độ có thể xác định theo phương pháp giải tích. Trong các trường hợp khác, có thể xác định bằng phương pháp từng phần. Phương pháp này dùng để tính lực nâng thủy động không đều, và cho kết quả phù hợp với dữ liệu thực nghiệm (Egorov và Sokolov, 1965).

ĐỘNG LỰC HỌC THÂN TÀU

Mục đích sau cùng của mô hình đang xây dựng là dự đoán chuyển động của tàu cánh ngầm trong nước tĩnh và cả trong sóng. Mô phỏng chuyển động bằng cách tích hợp các phương trình động lực tàu với các biểu thức tính lực tác dụng như trình bày ở phần trên. Khi thực hiện việc mô hình hóa như vậy, có thể cần nhiều hơn 2 hệ tọa độ. Chẳng hạn như phương trình chuyển động được viết theo hệ tọa độ gắn liền với tàu, khi đó mô men quán tính không đổi. Quỹ đạo của chuyển động được xây dựng trong hệ tọa độ không gian cố định. Khi hiện tượng rối bé, các phương trình có thể có dạng đơn giản, đôi khi bài toán thu gọn lại thành chuyển động trong hệ tọa độ phụ, như chuyển động thẳng đứng (nhồi, lắc dọc...) khi di chuyển ngược hoặc xuôi sóng. Hoặc chuyển động ngang (đu đưa, lắc ngang...) khi vận hành. Công cụ sử dụng trong tài liệu này kết hợp chặt chẽ tất cả các bậc tự do, với khả năng giảm thiểu bậc của bài toán.

Phương trình động lực tổng quát có dạng :

$$(M + \Delta M)\ddot{\underline{x}} = \underline{F}(\underline{x}, \dot{\underline{x}}; \text{history}; \text{waves}; \text{control}) \quad (6)$$

với M là ma trận quán tính, ΔM là ma trận lượng nước kèm, \underline{x} là véc tơ của sáu tọa độ. Véc tơ lực tổng quát ở phía phải của phương trình 6 phụ thuộc vào vị trí và vận tốc tàu, vào quá trình chuyển động, sóng biển và hoạt động của hệ thống điều khiển (như các tâm điều khiển trên cánh). Bên cạnh các lực tác động lên cánh, cần phải tính đến các lực sinh ra trên các phần phụ, thiết bị đẩy, các lực cản do gió và không khí.

Một hiện tượng thú vị trong động lực học tàu cánh ngầm là sự tương tác không đều giữa cánh trước và cánh sau. Trong các phương pháp CFD (động lực học chất lỏng) hoàn chỉnh, các tương tác này được tính đối với tốc độ dòng chảy từ cánh và sóng được tạo bởi cánh trước. Phương pháp của tài liệu này chỉ tính đến tương tác không đều do sự biến dạng của bề mặt nước. Cơ chế này chiếm ưu thế với các tàu cánh ngầm có dạng cắt sóng và tàu hoạt động trong vùng nước nông. Sự biến đổi của biến dạng bề mặt được tạo bởi cánh trước sẽ tác động đến cánh sau qua một thời gian trễ $\tau = L/U$, với L là khoảng cách giữa các cánh. Phương pháp gần đúng này có thể áp dụng trong các bài toán kỹ thuật.

Hệ thống động lực minh họa ở đây được áp dụng cho các mô phỏng chuyển động thẳng đứng trong sóng của một trong các phiên bản của tàu cánh ngầm lớp Olympia. Các hệ số lực nâng và lực cản đều (là hàm của góc tấn và chiều chìm) thu được từ thực nghiệm được sử dụng có bổ sung các lực không đều, các lực do sóng và tương tác giữa cánh trước với

cánh sau. Bảng 1 so sánh biên độ tính của lắc đứng và lắc dọc trong sóng theo với dữ liệu thực nghiệm và với kết quả đạt được từ lý thuyết đơn giản hơn (nhưng vẫn ở dạng phi tuyến) trong đó bỏ qua xoáy của dòng theo và tương tác giữa cánh trước với cánh sau. Sóng theo thường ngược với hướng chuyển động tàu. Cần lưu ý rằng phiên bản tối ưu mới nhất của tàu cánh ngầm lớp Olympia, trong đó có bổ sung các tấm điều khiển, có khả năng chuyển động trong sóng cao hơn gấp 2-10 lần so với phiên bản của hệ tàu cánh ngầm nghiên cứu ở đây. Muốn có được độ chính xác cao giữa dữ liệu test mô hình và kết quả thực tế theo yêu cầu của thiết kế tối ưu, cần phải sử dụng phương pháp CFD phức tạp để mô hình hoá động lực học tàu cánh ngầm.

Bảng 1: Biên độ lắc đứng và lắc dọc trong sóng theo của mô hình của một trong những phiên bản tàu cánh ngầm lớp Olympia. Tốc độ 5.4m/s($Fr_D = 2.7$) chiều cao sóng 130mm, chiều dài sóng 3.25m

| Thông số chuyển động | Lắc đứng | Lắc dọc |
|---|-----------------|------------------|
| Dữ liệu thực nghiệm (Matveev I.I. 1999) | 35mm | 2.1 ⁰ |
| Theo lý thuyết đã trình bày | 30mm | 2.4 ⁰ |
| Theo lý thuyết có bỏ qua tương tác cánh và xoáy dòng theo | 38mm | 2.8 ⁰ |

KẾT LUẬN

Một công cụ tính toán các lực thủy động trên hệ thống cánh ngầm và mô hình hoá động lực học tàu đang được phát triển. Công cụ này sẽ được sử dụng để thiết kế các tàu có trang bị thiết bị nâng. Phương pháp khá đơn giản này phù hợp với việc nghiên cứu ảnh hưởng của các phần tử cánh đến tính thủy động, tính đi biển và tính điều khiển.

Các tiết diện cánh có thể điều khiển được nhằm cải thiện khả năng làm việc của tàu cũng được bao hàm trong công cụ này. Các phần tử thân tàu lướt và nửa lướt sẽ được bổ sung để mô hình các chế độ quá độ của tàu cánh ngầm thuần túy, và chế độ làm việc của các tàu có hỗ trợ thiết bị nâng. Công cụ cũng nghiên cứu những phát triển sâu hơn về CFD.