

Nghiên cứu quá trình hình thành lớp băng mỏng bao quanh máy bay trong điều kiện thời tiết có nhiều hơi nước

Dương Đức Tài và Lê Văn Cảnh*
Trường Đại học Trần Đại Nghĩa

TÓM TẮT

Bài báo mô tả hiện tượng đóng băng có thể xảy ra trên các thiết bị bay, đưa ra các bước để giải quyết vấn đề bài toán đặt ra. Nghiên cứu trình bày phương trình hai pha khí - nước ở dạng bảo toàn, và lời giải số nhận được bằng phương pháp phần tử hữu hạn không liên tục Galerkin (DGM). Độ chính xác của phương pháp số được kiểm tra bằng cách so sánh hệ số bám β của hạt nước nhận được so với thực nghiệm. Bên cạnh đó, nghiên cứu giới thiệu cơ sở nhiệt động lực học cho bài toán tạo băng trên bề mặt. Trên cơ sở 2 mô hình toán học đã giới thiệu, khảo sát quá trình đóng băng của máy bay dân sự trong điều kiện bay chờ hạ cánh.

Từ khóa: phương pháp Galerkin, đóng băng máy bay, mô hình nhiệt động học

1. MỞ ĐẦU

Máy bay khi bay với vận tốc dưới âm qua đám mây ở độ cao dưới 8,000 m có thể xảy ra hiện tượng đóng băng - điều này ảnh hưởng đến an toàn bay. Lớp băng hình thành trên các thiết bị bay có thể làm thay đổi các đặc tính khí động, làm tăng khối lượng, tiêu hao nhiên liệu của máy bay [1, 2]. Vì vậy, hiện tượng đóng băng các thiết bị trong quá trình bay đang là một vấn đề cấp thiết và quan trọng trong lĩnh vực hàng không. Quá trình tạo băng xuất hiện khi nhiệt độ cân bằng trên bề mặt thiết bị bay nhỏ hơn hoặc bằng không, đồng thời, trong không khí có sự góp mặt của các hạt hơi nước. Trong khí quyển luôn chứa những hạt nước siêu nhỏ, tồn tại ở cả ba dạng: lỏng, khí và rắn. Các hạt nước này còn được gọi là các hạt siêu lạnh (supercooled). Những hạt nước siêu lạnh rơi vào vùng đầu của cánh, vào thân máy bay, cabin, động cơ, khi đóng băng, tùy thuộc vào

điều kiện thời tiết bên ngoài, chế độ bay và đặc trưng vật lý của các hạt nước đang tồn tại trong không khí mà có thể tạo ra những hình dạng băng, tốc độ xuất hiện băng và diện tích bề mặt bị băng bao phủ khác nhau. Ví dụ, lớp băng dày 13 mm trên cánh máy bay có thể làm giảm vận tốc bay 50 km/h, và làm tăng vận tốc chao đảo cánh [2]. Bài toán đóng băng đã được các nhà khoa học trên khắp thế giới tập trung nghiên cứu trong những năm gần đây. Nhiều kết quả về thực nghiệm và tính toán bằng phương pháp số đã được cho ra những mô hình cụ thể. Kết quả nghiên cứu này có giá trị rất lớn, bởi đó là tư liệu cho các nhà thiết kế tạo ra và đặt những thiết bị phá băng trên máy bay tại các vị trí quan trọng. Quá trình hình thành băng là một công việc rất phức tạp. Hiện nay, chưa có một công trình nào có thể giải quyết được hoàn toàn vấn đề này. Các nhà khoa học chỉ có

Tác giả liên hệ: ThS. Lê Văn Cảnh
Email: canhle195@gmail.com

thể đưa ra một số các điều kiện, giả thiết để làm giảm bớt độ phức tạp của bài toán này. Hiện nay, đang có 2 hướng tiếp cận để giải được bài toán hai pha khí - nước: phương pháp tiếp cận Lagrange và phương pháp tiếp cận Euler. Trong phương pháp đầu tiên, các hạt nước được xem là rời rạc không liên kết với nhau. Khi đó, để giải được bài toán, ta cần tìm quỹ đạo của từng hạt nước dưới tác dụng của lực trọng trường và lực cản, sau đó kiểm tra xem hạt nào đang rơi vào máy bay. Phương

pháp này đơn giản, nhưng trong bài toán không gian 3 chiều thì cần tính toán một số lượng lớn quỹ đạo các hạt nước, dẫn đến tốn thời gian và tài nguyên máy tính. Trong phương pháp tiếp cận Euler, trường hạt nước được xem như là một trường liên tục và đồng nhất, từ đó có thể dùng các phương pháp số hiện đại như phần tử hữu hạn, thể tích hữu hạn để giải bài toán trường hai pha khí - nước, có thể nhận được trường phân bố hạt nước tại vùng gần các thiết bị bay bằng hình ảnh trực quan.



Hình 1. Hiện tượng đóng băng trên máy bay

Thí nghiệm về dòng chảy hai pha khí nước bao quanh hình trụ tròn được thực hiện lần đầu tiên vào những năm 1950 bởi trung tâm nghiên cứu NACA [2]. Vào những năm 1985, 1997, 1999, trung tâm NACA đã đưa ra những kết quả thực nghiệm cho các mô hình cánh MS(1)-0317, NACA65-015, NLF(1)-0414 và mô hình cánh Boing-737 (NACA64A008), những kết quả thực nghiệm này đã được so sánh với chương trình tính toán LEWICE [2]. Chương trình này được viết bằng phương pháp tiếp cận Lagrange cho các bài toán 2D. Tuy nhiên,

việc dẫn ra những thí nghiệm cho dòng chảy hai pha này là rất tốn kém và phức tạp.

Trong phạm vi bài báo này, tác giả nghiên cứu trường dòng chảy hai pha khí - nước bằng phương pháp phần tử hữu hạn Galerkin với hàm cơ sở không liên tục (DGM). Ưu điểm của việc sử dụng DGM so với phương pháp thể tích hữu hạn truyền thống là mang lại độ chính xác bậc cao dựa vào bậc của hàm cơ sở, các thông số dòng chảy tại mọi điểm của ô lưới có thể nhận được thông qua tổ hợp của các hàm cơ sở. DGM có thể hoạt động trên cả lưới có cấu

trúc và không cấu trúc, là phương pháp lai giữa FVM và FEM truyền thống. Tuy nhiên, việc xây dựng chương trình tính toán bằng DGM phức tạp và tốn nhiều tài nguyên hơn những phương pháp FVM và FEM truyền thống do việc lưu trữ các hệ số tổ hợp của hàm cơ sở tại các điểm Gauss, vì vậy, phương pháp này chưa được sử dụng một cách rộng rãi [3]. Kết quả tính toán cho các mô hình cánh 2D và 3D được so sánh với thực nghiệm để đưa ra kết luận về tính độ chính xác của phương pháp tính.

2. PHƯƠNG TRÌNH TRƯỜNG HẠT NƯỚC

2.1. Phương trình dòng chảy của hạt nước

Hệ phương trình mô tả trường dòng chảy hạt nước được viết lại như sau[3]:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_x}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}_y}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{F}_z}{\partial z} = \mathbf{S}(\mathbf{U}) \quad (1)$$

Trong đó:

$$\mathbf{U} = [r, ru, rv, rw]^T,$$

$$\mathbf{F}_x = [ru, ru^2 + p_d, ruv, ruw]^T, \mathbf{F}_y = [rv, rvu, rv^2 + p_d, rvw]^T, \mathbf{F}_z = [rw, rwu, rwv, rw^2 + p_d]^T;$$

$$\mathbf{S} = [r_1 \cdot \text{div } \mathbf{u}, c_f(u_a - u)r + r_1 \cdot u \cdot \text{div } \mathbf{u} + \partial p_d / \partial x, \\ r_1 \cdot \text{div } \mathbf{u}, c_f(v_a - v)r + r_1 \cdot v \cdot \text{div } \mathbf{u} + \partial p_d / \partial y, \\ r_1 \cdot \text{div } \mathbf{u}, c_f(w_a - w)r + r_1 \cdot w \cdot \text{div } \mathbf{u} + \partial p_d / \partial z]^T;$$

$$r_1 = r - 1/\ln 10; p_d = r R_d T; r = \lg \rho;$$

ρ - khối lượng riêng phần của hạt nước (Liquid water content - LWC);

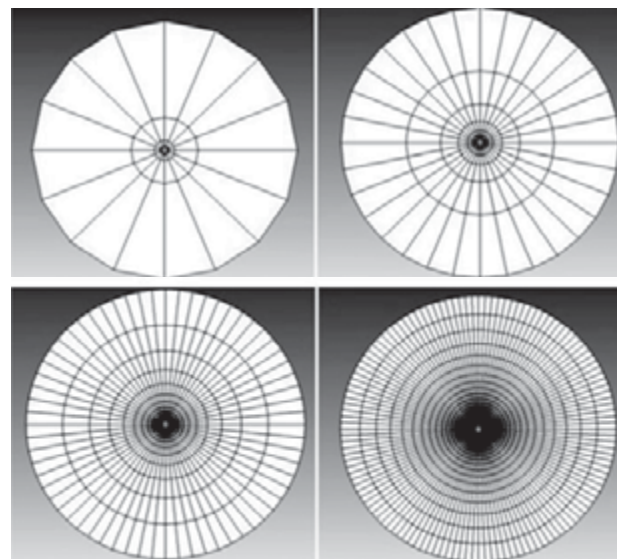
u, v, w - là vận tốc của hạt nước theo các phương Ox, Oy, Oz ;

u_a, v_a, w_a - vận tốc của dòng khí.

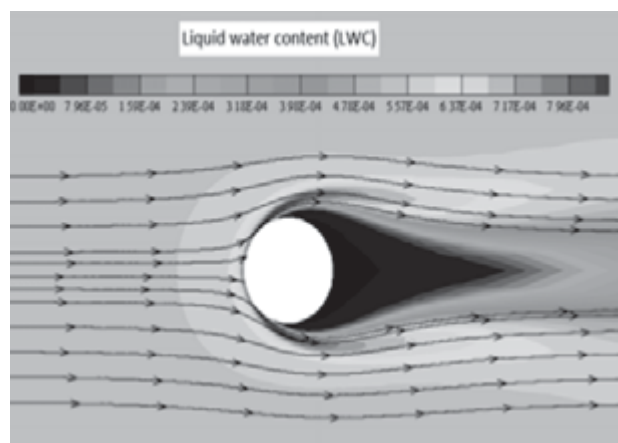
Để giải được hệ phương trình này, ta dùng phương pháp phần tử hữu hạn không liên tục Galerkin (Discontinuous Galerkin method - DGM) [3].

2.2. Bài toán kiểm tra - Dòng chảy bao quanh hình trụ

Khảo sát một hình trụ dài vô cùng bán kính $R = 0.0515$ m, vận tốc dòng khí ở vô cùng $u_\infty = 80$ m/s, áp suất tĩnh $p_\infty = 89,867$ Pa, nhiệt độ $T_\infty = 285^\circ\text{K}$, đường kính hạt nước $MVD = 16\mu\text{m}$, tỉ trọng riêng hạt nước $\rho = 0.55$ gram/ m^3 . Xây dựng 4 lưới biến đổi từ thô sang mịn với kích thước biến đổi: 16×4 256×64 (Hình 2).

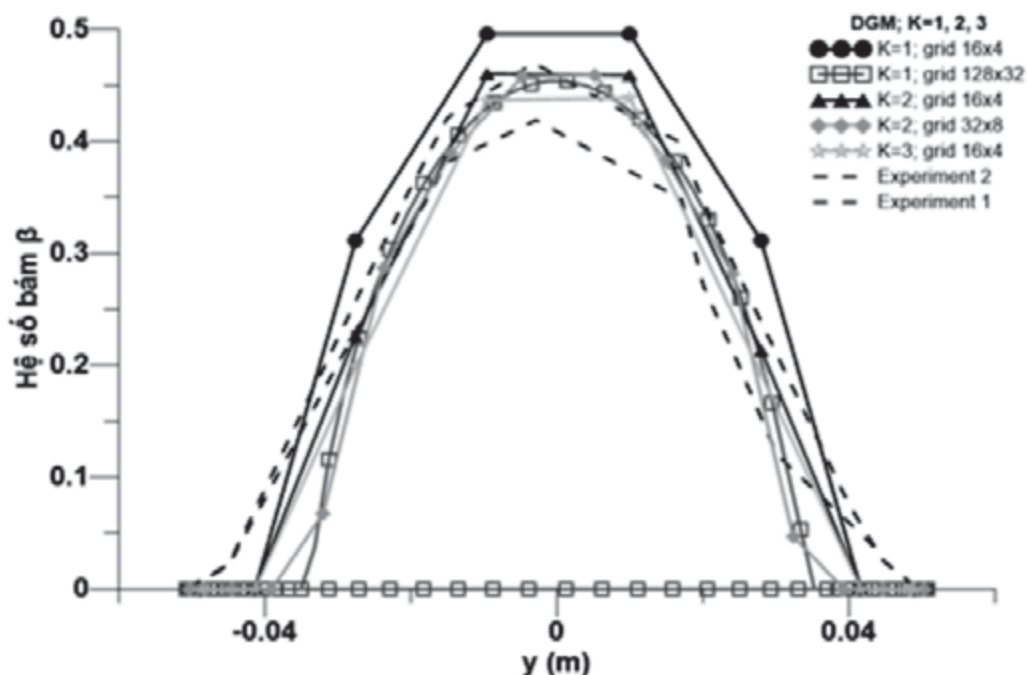


Hình 2. Mô hình lưới 16×4 256×64



Hình 3. Phân bố trường khối lượng riêng hạt nước LWC

Trên Hình 3 chỉ ra trường phân bố hạt nước ρ quanh hình trụ. Ta nhận thấy rằng, hạt nước tập trung rất lớn ở phần đầu của hình trụ, tỉ trọng riêng tăng lên nhiều so với ở xa vô cùng, tại vùng ở phía sau của hình trụ, hạt nước bị tách ra khỏi dòng chảy, tạo thành một vùng chân không ($\text{LWC} = 0$ gram/ m^3).



Hình 4. Ảnh hưởng của lưới và bậc cao K của sơ đồ lên hệ số bám β

Trên Hình số 4 chỉ ra hệ số bám β của hạt nước. Hệ số bám của hạt nước trên bề mặt vật thể được tính toán bằng mối quan hệ giữa xung lượng dòng chảy khi đập vào bề mặt và xung lượng ở vô cùng. Về bản chất vật lý, hệ số bám chỉ ra rằng, có bao nhiêu phần động lượng của hạt nước đập vào bề mặt so với chính nó ở vô cùng.

Hệ số β được tính bởi công thức:

$$\beta = \rho u_n / \rho_\infty u_\infty$$

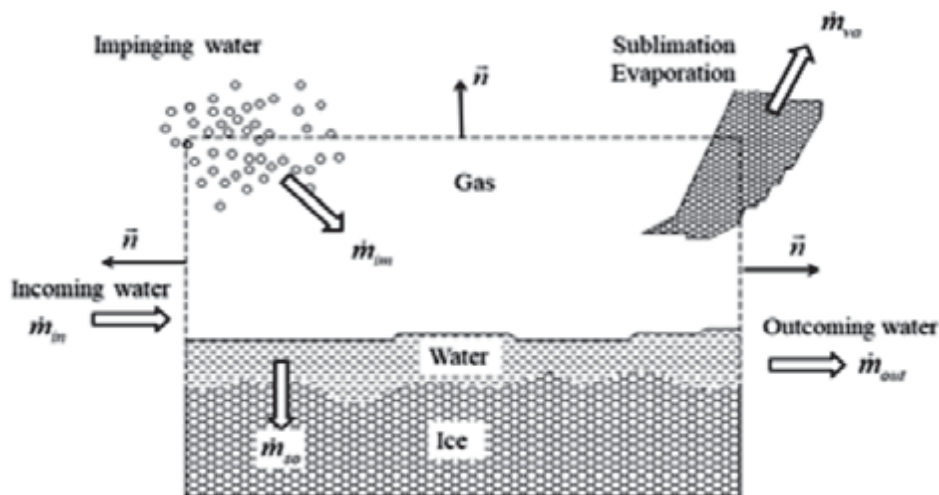
Từ kết quả trên Hình 4, nhận thấy rằng, với $K = 1$

trên lưới thô 16×4 thì cho ra kết quả β không chính xác, vượt ra ngoài vùng thí nghiệm [4]. Khi $K \geq 2$, và có tính đến độ cong của vật thể khi giải bài toán bằng phương pháp số DGM thì cho ra kết quả β chính xác cả trên lưới thưa 16×4 .

3. CƠ SỞ NHIỆT ĐỘNG LỰC HỌC CHO BÀI TOÁN ĐÓNG BĂNG

3.1. Cơ sở lý thuyết và phương pháp số

Xét một ô lưới bất kì trên bề mặt của vật thể (Hình 5):



Hình 5. Các thành phần nước và năng lượng có thể xuất hiện trong ô lưới

Ta nhận thấy có 6 thành phần khối lượng nước có thể vào - ra khỏi ô lưới. Từ đó dùng phương trình cân bằng khối lượng và định luật số 1 của nhiệt động lực học (Tổng nhiệt lượng bằng với sự biến đổi nội năng của hệ và công của hệ nhiệt động thực hiện để chống lại ngoại lực).

Phương trình cân bằng khối lượng:

$$\dot{m}_{im} + \dot{m}_m = \dot{m}_{va} + \dot{m}_{ice} + \dot{m}_{out}$$

Phương trình cân bằng năng lượng:

$$\dot{E}_{ice} + \dot{H}_{va} + \dot{H}_{out} + \dot{H}_{in} + \dot{H}_{im} = \dot{Q}_f - \dot{Q}_c$$

Trong đó: $f = \frac{\dot{m}_{ice}}{\dot{m}_{in} + \dot{m}_{im}}$ - là hệ số đóng băng.

Từ hệ số đóng băng này, có thể chia ra làm 3 dạng bề mặt (Hình 6).

$\dot{H}_{im}, \dot{H}_{in}, \dot{H}_{out}, \dot{H}_{va}, \dot{H}_{ice}$ lần lượt là entalpi của nước rơi vào bề mặt khí cụ bay, entalpi của nước chảy vào ô lưới đang xét từ ô bên cạnh, entalpi của nước chảy ra khỏi ô lưới đang xét, entalpi của nước bốc hơi và thăng hoa, nội năng của hạt nước.

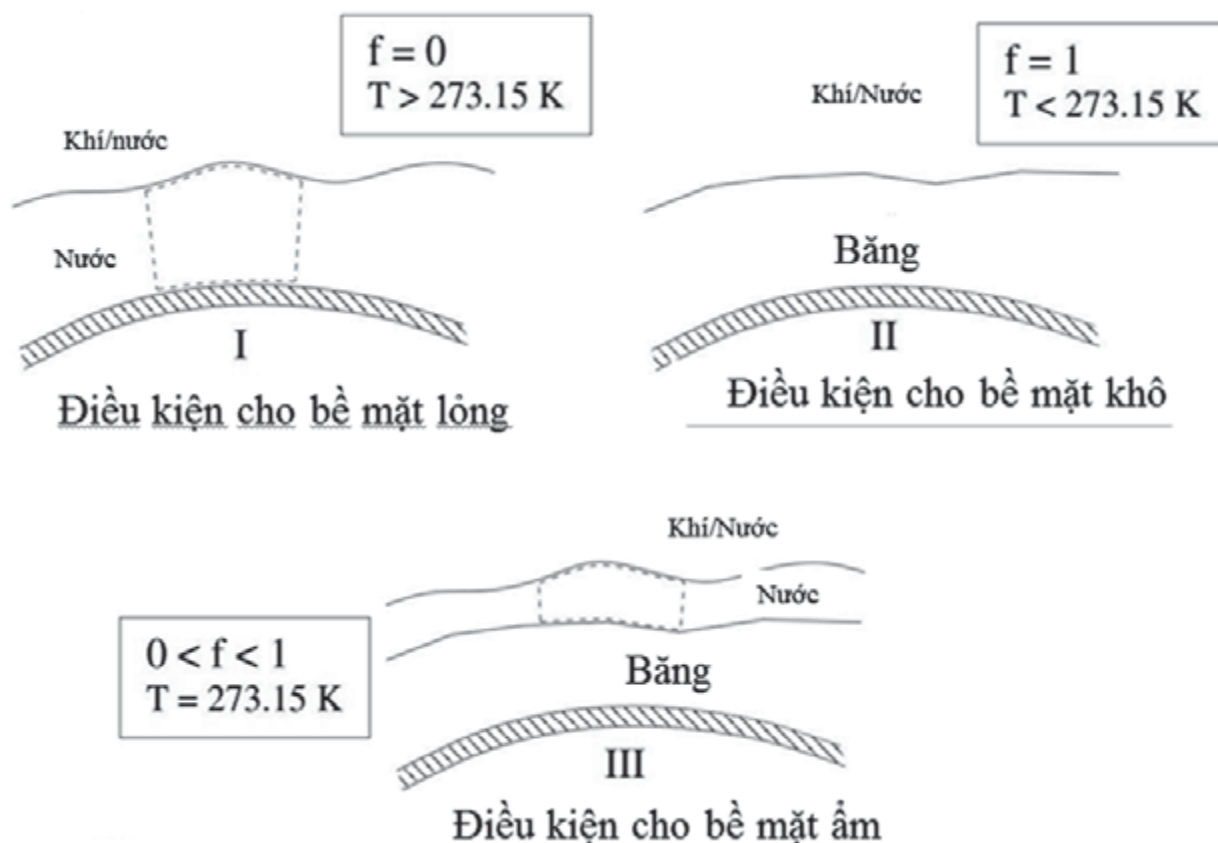
Để giải được hệ phương trình trên, ta dùng phương pháp thử sai [3].

3.2. Bài toán kiểm tra - Dòng chảy hai pha bao quanh cánh GLC-305

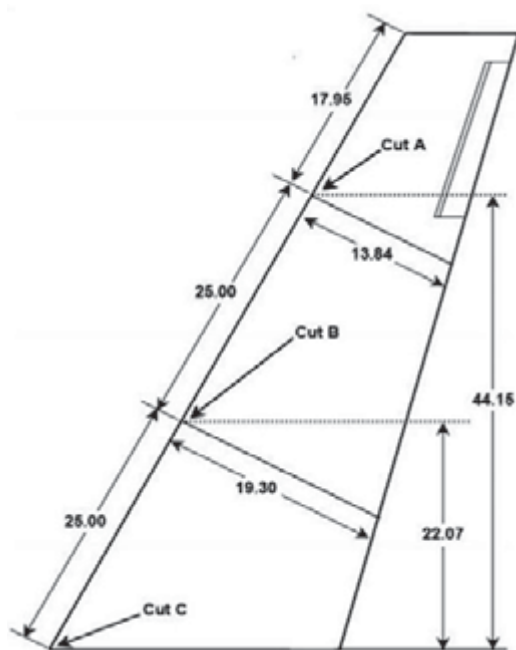
Mô hình cánh được chỉ ra ở Hình 7 và điều kiện ban đầu của bài toán được chỉ ra ở Bảng 1:

Bảng 1. Điều kiện ban đầu

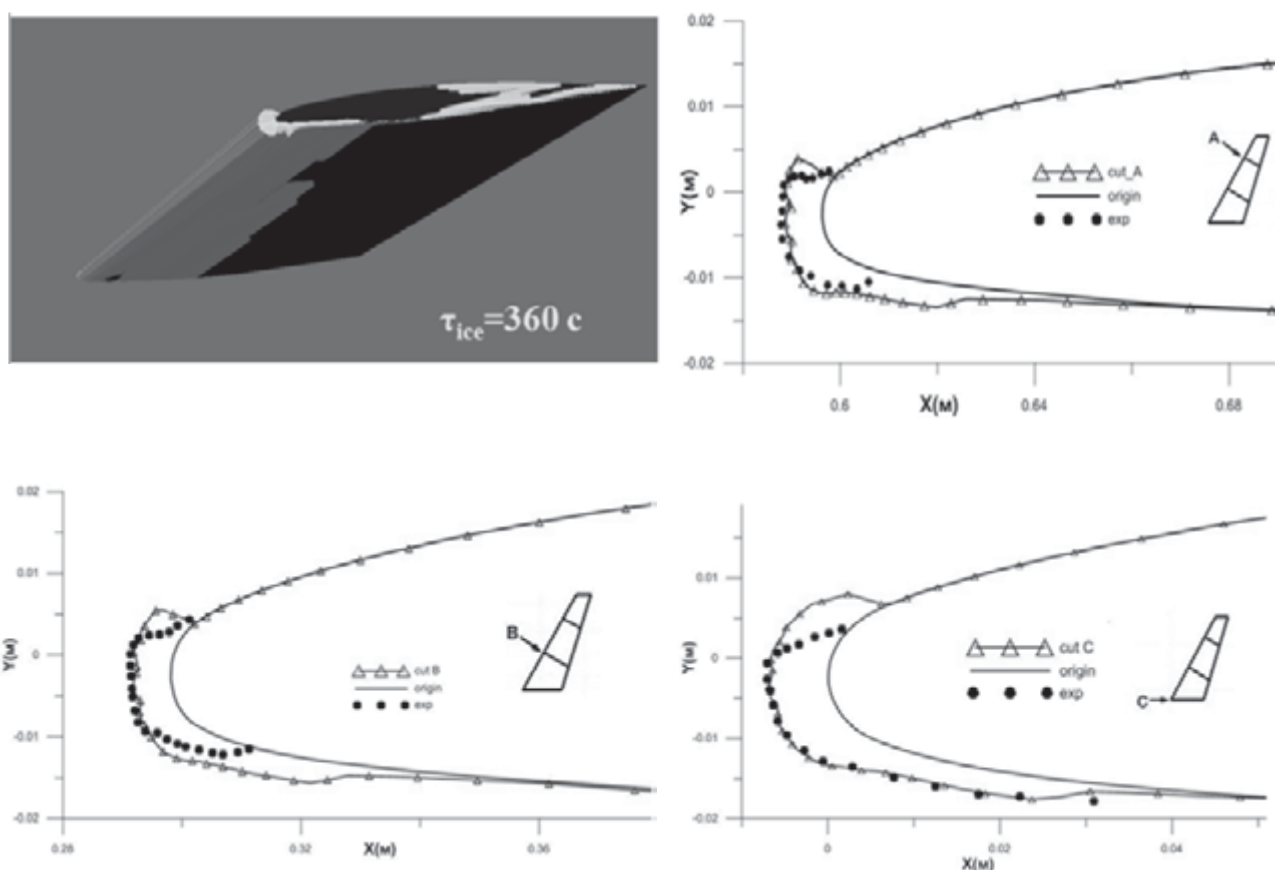
Vận tốc [m/s]	89.97
Áp suất [Pa]	61,282
Góc tấn	6
Nhiệt độ [°C]	-11.28
LWC [gram/m ³]	1.0
MVD [μm]	20
Thời gian đóng băng [s]	360



Hình 6. Sơ đồ 3 bề mặt có thể hình thành của nước trên bề mặt



Hình 7. Kích thước hình học của cánh



Hình 8. Mô hình đóng băng trên cánh GLC-305

Trên Hình 8 chỉ ra mô hình đóng băng trên toàn cánh máy bay và mô hình băng trên 3 mặt cắt tại 3 vị trí khác nhau trên cánh: cuối, giữa và đầu cánh. Các mô hình băng này được so sánh với thực

nghiệm sau thời gian 360 giây. Ta nhận thấy rằng kết quả mô hình băng nhận được bằng phương pháp số so với thực nghiệm [5] là không sai khác nhau nhiều.

4. ĐÓNG BĂNG TRÊN MÁY BAY DÂN SỰ TRONG ĐIỀU KIỆN CHỜ

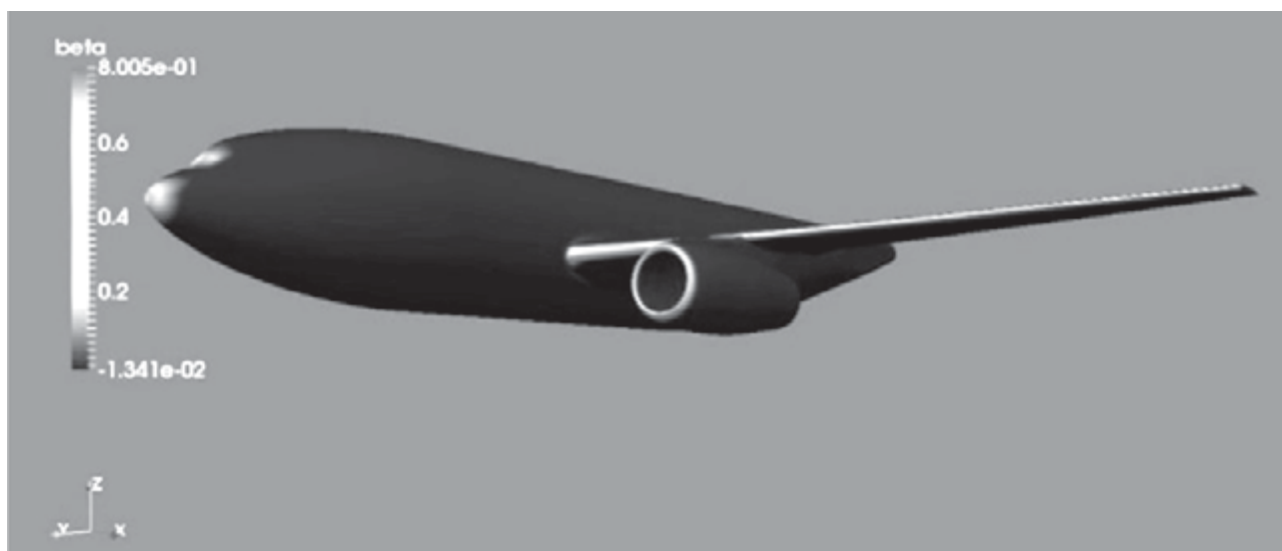
Khảo sát máy bay dân sự sải cánh 32 m, đang bay trong điều kiện chờ với các tham số sau: $u_\infty = 695$ km/h, độ cao $H=6,000$ m, $LWC = 0.4$ gram/m³, $MVD = 36$ μ m. Điều kiện ban đầu: nhiệt độ dòng chảy vô cùng: $t_\infty = 0, -5, -12, -15, -20, -25, -30, -33, -35^\circ\text{C}$. Góc tấn: $\alpha = 0^\circ, 7^\circ$. Lưới tính toán 6 mặt: 5.5 triệu ô lưới. Mô hình tính toán dòng khí: Mô hình rối SST ($\gamma_+ = 1$). Mô hình tính toán dòng 2 pha Khí - Nước: Phương pháp DGM khi $K = 1$ (Hình 9).

Trên Hình 10 chỉ ra các vùng bị đóng băng trên máy bay. Nhận thấy rằng băng xuất hiện tại

vùng đầu mũi máy bay, vùng cabin phi công, vùng đầu cánh và đầu động cơ của máy bay.

Trên Hình 11 chỉ ra mô hình băng trên mặt cắt động cơ máy bay khi góc tấn bằng 0, với các bước thời gian đóng băng và các vùng nhiệt độ khác nhau. Ta nhận thấy rằng khi thời gian nhỏ hơn 600 giây thì băng làm thay đổi bề mặt động cơ không đáng kể.

Trên hình 12 chỉ ra mô hình băng trên mặt cắt của cánh máy bay. Thấy rằng, khi $t_\infty \leq -25^\circ\text{C}$ tại thời điểm ban đầu tạo ra mô hình băng dạng profile. Khi $t_\infty \geq -15^\circ\text{C}$ và $\tau_{ice} \geq 1,500$ s Trên bề mặt trên của băng xuất hiện sừng băng.

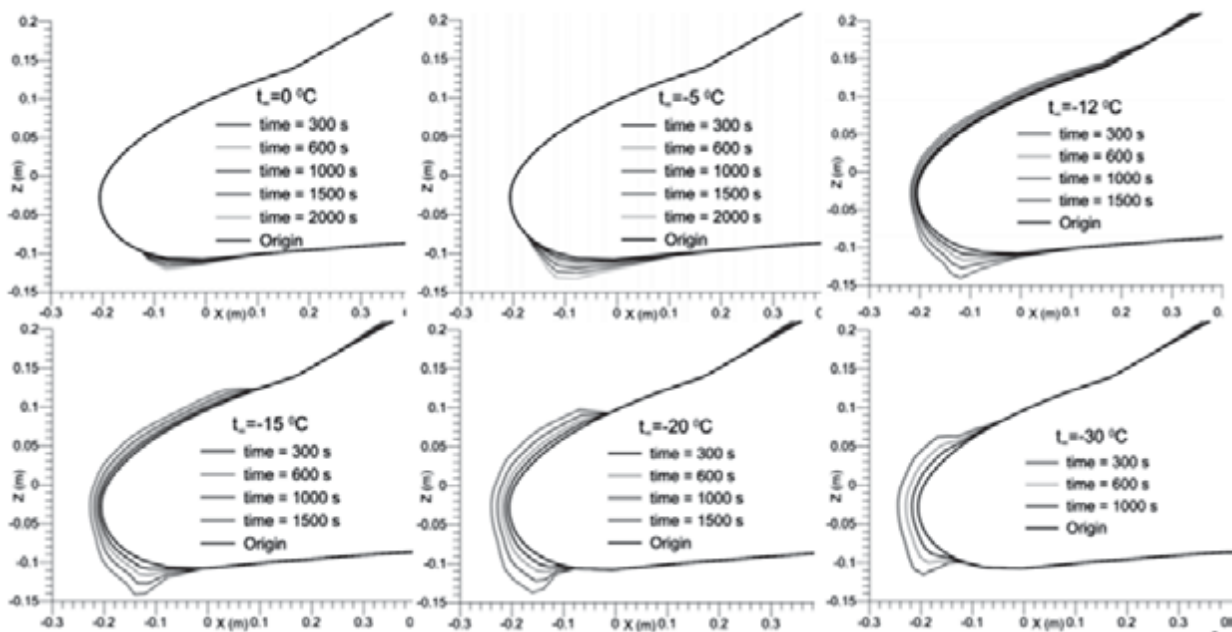


Hình 9. Hệ số bám β trên máy bay



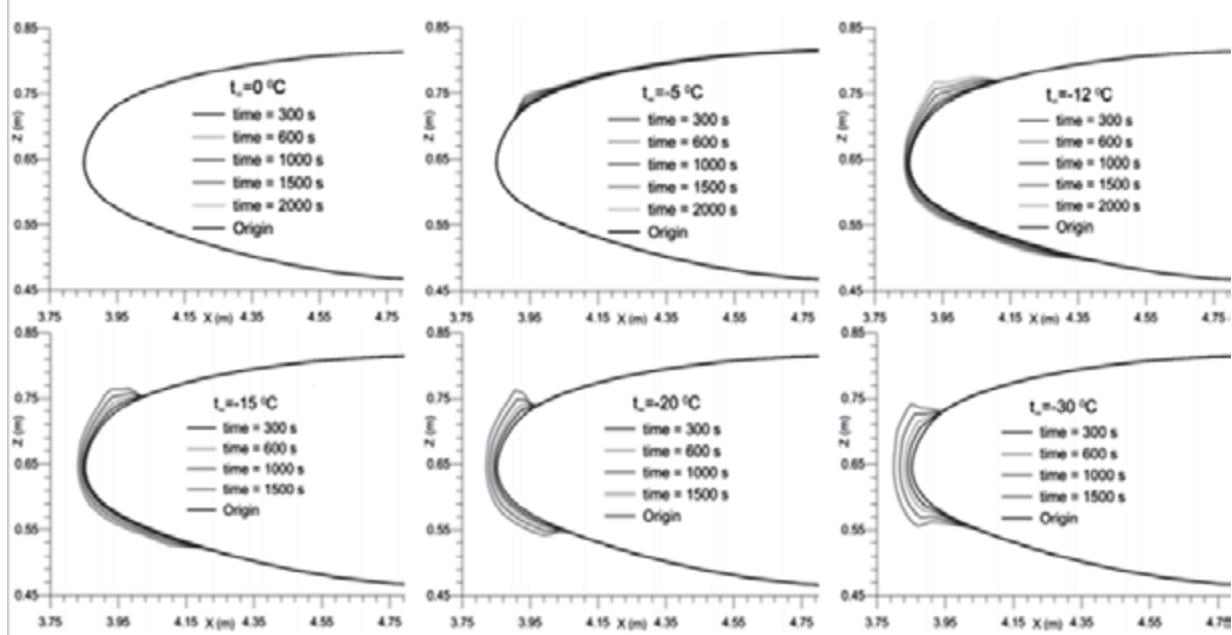
Hình 10. Vùng xuất hiện băng trên máy bay

Mô hình băng tại mặt cắt $Y = -5.45 \text{ m}$, $\alpha = 0^\circ$ của động cơ



Hình 11. Hình dạng băng tạo thành trên động cơ

Mô hình băng trên bề mặt cánh tại mặt cắt $Y = -7.5 \text{ m}$, $\alpha = 0^\circ$



Hình 12. Hình dạng băng tạo thành trên cánh

5. KẾT LUẬN

Trong phạm vi nghiên cứu đã đưa ra được phương pháp giải bài toán hai pha khí nước các phương trình truyền nhiệt để tính toán quá trình đóng băng. Kết quả chỉ ra rằng, trong chế độ chờ, trong nhiều trường hợp nhiệt độ khí quyển khác nhau, vận tốc đóng băng trên

bề mặt máy bay vượt quá vận tốc đóng băng cho phép. Điều này cần được tính toán để cảnh báo phi công.

Nhận thấy rằng, băng thường xuất hiện ở vùng cabin, phần đầu của cánh và động cơ. Với những trường hợp nhiệt độ thấp ($t_\infty <$

-10°C), nước không đóng băng ở vùng đầu động cơ mà chảy về phía sau, nơi có nhiệt độ thấp và hình thành băng có dạng “hình sừng”. Điều này có thể làm cho dòng khí sớm tách khỏi cánh máy bay, gây ảnh hưởng đến hệ số nâng. Trong trường hợp ngược lại, nếu nhiệt độ cao ($t_{\infty} > -10^{\circ}\text{C}$), hạt nước sau khi

đập vào phần đầu của động cơ và cánh, có thể đóng băng ngay hoặc đóng băng một phần, tăng tiết diện tích tiếp xúc của dòng khí, gây ra tăng lực cản lên máy bay... Điều này cần tính toán để lắp đặt các cảm ứng nhận dạng băng và các hệ thống phá băng cho các máy bay.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Alekseenko S.V. [Алексеев С.В.], Prikhodko A.A. [Приходько А.А], “Численное моделирование обледенения цилиндра и профиля. Обзор моделей и результаты расчетов”. *Ученые записки ЦАГИ*, том XLIV, № 6. - с. 25-57, Moscow, 2013.

[2] Александр Тяппо. “Обледенение как одна из причин авиакатастроф.” Internet: <https://www.aviapanorama.ru/2017/03/obl edenenie-kak-odna-iz-prichin-aviakatastrof>. Mar.3, 2017.

[3] D. D. Tai [Зыонг Де Тай], “Обтекание планера гражданского самолета в условиях начальной стадии обледенения”.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Москва, 2018.

[4] C. Bidwell and S. Mohler, “Collection Efficiency and Ice Accretion Calculations for a Sphere, a Swept MS (1)-317 Wing, a Swept NACA-0012 Wing Tip, an Axisymmetric Inlet, and a Boeing 737-300 Inlet”. *AIAA Paper*. - V.95 - № 0755, America, 1995.

[5] S. Lee and M. B. Bragg, “Effects of Simulated-Spanwise Ice Shapes on Airfoils: Experimental Investigation”. *AIAA Paper*. - № 0092, America, 1999.

The process of forming a thin ice layer around an aircraft in weather conditions with a lot of watervapor

Duong De Tai and Le Van Canh*

ABSTRACT

The article describes the ice accretion phenomenon that can occur on flying devices, and giving steps to solve the problem posed. The study uses the gas-water two-phase equation in conserved form, and the numerical solution is obtained by the Galerkin discontinuous finite element method (DGM). The accuracy of the numerical method is checked by comparing the adhesion coefficient θ of the water particles obtained with the experiment. Besides, the work introduces the thermodynamic basis of the surface ice problem. On the basis of two introduced

mathematical models, the process of freezing civil aircraft in waiting and landing conditions is investigated.

Keywords: *Galerkin method, plane ice accretion, thermodynamic modeling*

Received: 23/04/2021

Revised: 10/05/2021

Accepted for publication: 18/05/2021