

NGHIÊN CỨU KHÍ ĐỘNG BỀ MẶT DẠNG SÓNG TRONG DÒNG SIÊU THANH

Đình Hoàng Quân^{1,*}

¹Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

Tóm tắt

Bài báo trình bày ứng dụng phương pháp mô phỏng trực tiếp vào nghiên cứu bài toán khí động trên bề mặt sóng trong dòng siêu thanh và ảnh hưởng của bề mặt sóng tới tham số khí động của dòng chảy. Bề mặt dạng sóng trong dòng siêu thanh thường xuất hiện trên khí cụ bay siêu thanh như máy bay chiến đấu, tên lửa. Các bề mặt cong dạng sóng này xuất hiện có thể do chủ đích thiết kế hoặc do việc bố trí thiết bị trên bề mặt tạo ra. Theo như kết quả nghiên cứu cho thấy, bề mặt này có thể làm tăng lực cản và là nguyên nhân chính dẫn tới các hiện tượng chuyển dòng từ chảy tầng sang chảy rối hoặc tách dòng trong dòng siêu thanh.

Từ khóa: DNS; mô phỏng trực tiếp; bề mặt sóng; chuyển dòng; dòng siêu thanh.

1. Mở đầu

Trên bề mặt khí cụ bay bị chảy bao bởi dòng siêu thanh, luôn có những vị trí bề mặt bị nhám, lồi-lõm (gợn sóng). Khi chảy bao qua những vị trí này, dòng chảy bao bị nhiễu, làm áp suất thay đổi đột ngột và dẫn tới sự thay đổi các tham số của dòng chảy bên trong lớp biên trên bề mặt khí cụ bay. Một trong những ảnh hưởng phổ biến nhất do bề mặt gợn sóng này gây ra là làm chuyển dòng từ chảy tầng thành chảy rối trong lớp biên, dẫn tới làm tăng lực cản trên bề mặt khí cụ bay. Hiện tượng này là một trong các vấn đề khó khăn trong nghiên cứu khí động lực học nhiều năm qua. Những khó khăn do cần có các công cụ nghiên cứu phức tạp cũng như chi phí đắt đỏ khi nghiên cứu về dòng siêu thanh là rào cản chính gây ra sự chậm trễ trong hướng nghiên cứu này. Trong [1], Reynolds lần đầu tiên đưa ra phương pháp quan sát cấu trúc của lớp biên trên bề mặt thành ống dẫn chất lỏng bằng cách đưa sơn hình vào dòng chất lỏng. Tác giả quan sát thấy, đầu tiên dòng chảy ổn định theo từng lớp (chảy tầng) trên bề mặt ống, tuy nhiên sau một khoảng thời gian thì quan sát thấy hiện tượng chảy hỗn loạn trên bề mặt dọc theo thành ống. Cũng trong nghiên cứu này tác giả chỉ ra rằng, hiện tượng quan sát thấy ở trên chỉ xuất hiện khi số Reynolds tăng tới một giá trị nào đó, số này gọi là số Reynolds tới hạn. Nếu số Reynolds thấp hơn số Reynolds tới hạn thì dòng chảy trong ống ổn định không thay đổi (chảy tầng). Nếu số Reynolds của dòng bằng hoặc vượt qua số Reynolds tới hạn này thì

* Email: hoangquan@lqdtu.edu.vn

<https://doi.org/10.56651/lqdtu.jst.v17.n02.311>

hiện tượng chảy hỗn độn trên thành ống xảy ra. Đây cũng chính là hiện tượng chuyển dòng từ chảy tầng sang chảy rối đầu tiên được quan sát và nghiên cứu.

Trong [2], tác giả chỉ ra rằng trong lớp biên dòng chảy nhớt luôn tồn tại những nhiễu động biên độ thấp dạng sóng Tollminia-Schlichting (TS). Sóng TS khi tương tác với lớp biên sẽ làm tăng dần biên độ dao động và khi biên độ của sóng TS tăng tới một giá trị nào đó thì trong lớp biên bề mặt khí cụ bay quan sát thấy hiện tượng chảy rối. Tuy nhiên, hiện tượng này lại diễn ra rất chậm trong thực tế chảy bao khí cụ bay dòng siêu thanh. Một điều thú vị được chỉ ra trong nghiên cứu [3] là khi chảy bao qua bề mặt gợn sóng với một hàm hình học thích hợp có thể làm tăng tốc quá trình này. Đây cũng chính là mục tiêu trong nghiên cứu này của tác giả.

2. Phương pháp mô phỏng

Để mô phỏng bài toán, tác giả sử dụng bộ code mở HSFlow (High Speed Flow) [4]. Bộ code mở này được lập trình trên ngôn ngữ C++ dùng để giải hệ phương trình Navier-Stokes cho khí thực. Các hằng số như hệ số đoạn nhiệt, số Prandtl được cho trước và hệ số nhớt phụ thuộc vào nhiệt độ theo định luật Sazerland [5] với hằng số nhiệt bằng 110,4 K. Phương pháp tính sử dụng sơ đồ hiệu bậc hai theo không gian và thời gian [5]. Việc sử dụng sơ đồ hiệu dựa trên việc giải hệ phương trình Navier-Stokes cho phép mô phỏng các quá trình không dừng như hiện tượng đưa nhiễu vào lớp biên và sự không ổn định của lớp biên dòng siêu thanh [6], hay hiện tượng lan truyền sự nhiễu động trong lớp biên bản mỏng và trên bề mặt cong [6].

Phương pháp mô phỏng sử dụng hệ tham số không thứ nguyên:

$$x = \bar{x}L, \quad y = \bar{y}L, \quad z = \bar{z}L, \quad t = \bar{t}L/V_\infty, \quad u = \bar{u}V_\infty, \quad v = \bar{v}V_\infty, \quad w = \bar{w}V_\infty, \quad p = \bar{p} \rho_\infty V_\infty^2$$

Số Renolds tính theo độ dài đặc trưng $Re = \rho_\infty u_\infty L / \mu_\infty$, trong đó L là độ dài đặc trưng của cánh chọn.

3. Điều kiện biên, điều kiện ban đầu và lưới tính toán

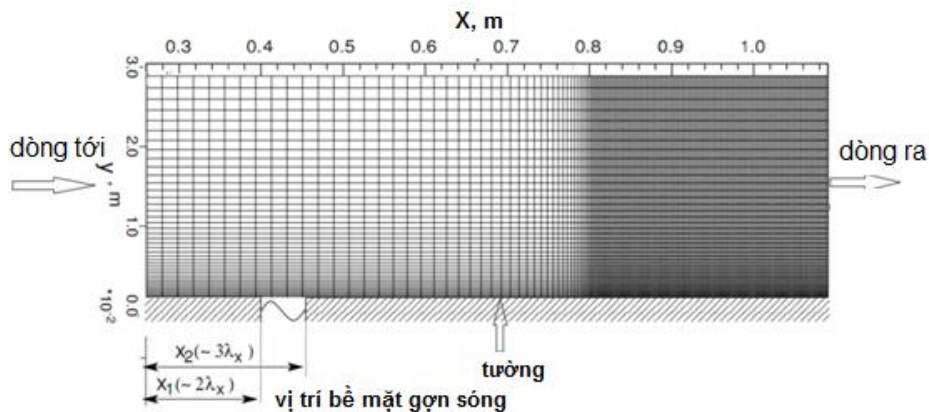
Để nghiên cứu sự ảnh hưởng của bề mặt gợn sóng đến hiện tượng chuyển dòng trong lớp biên khí cụ bay siêu thanh, trong [2, 3] đã viết lại điều kiện biên bằng cách sử dụng một hàm toán học thay thế cho bề mặt thực tế của khí cụ bay. Để có được kết quả mô phỏng, nhóm tác giả này sử dụng phương pháp mô phỏng DNS bậc cao (bậc 4 theo thời gian và bậc 6 theo không gian) và sử dụng phòng siêu máy tính với trên 1000 nhân. Với công cụ như vậy là không phù hợp với tình hình thực tế tại Việt Nam vì chúng ta

chưa được trang bị những công cụ đủ mạnh như vậy. Bằng nghiên cứu này, tác giả muốn chứng minh rằng vẫn có thể giải quyết được bài toán đó bằng phương pháp DNS bậc thấp hơn (bậc 2 theo không gian và thời gian) và phù hợp với tài nguyên máy tính đang được trang bị tại Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn. Để đảm bảo sự tương đồng với [2, 3], trong bài báo này tác giả sử dụng các tham số giống như các tham số của [2, 3], cụ thể: lưới tính toán, hàm bề mặt, các điều kiện biên và điều kiện ban đầu. Điểm khác duy nhất là phương pháp của tác giả sử dụng bậc thấp hơn và ít tài nguyên máy tính hơn so với nghiên cứu ở trên.

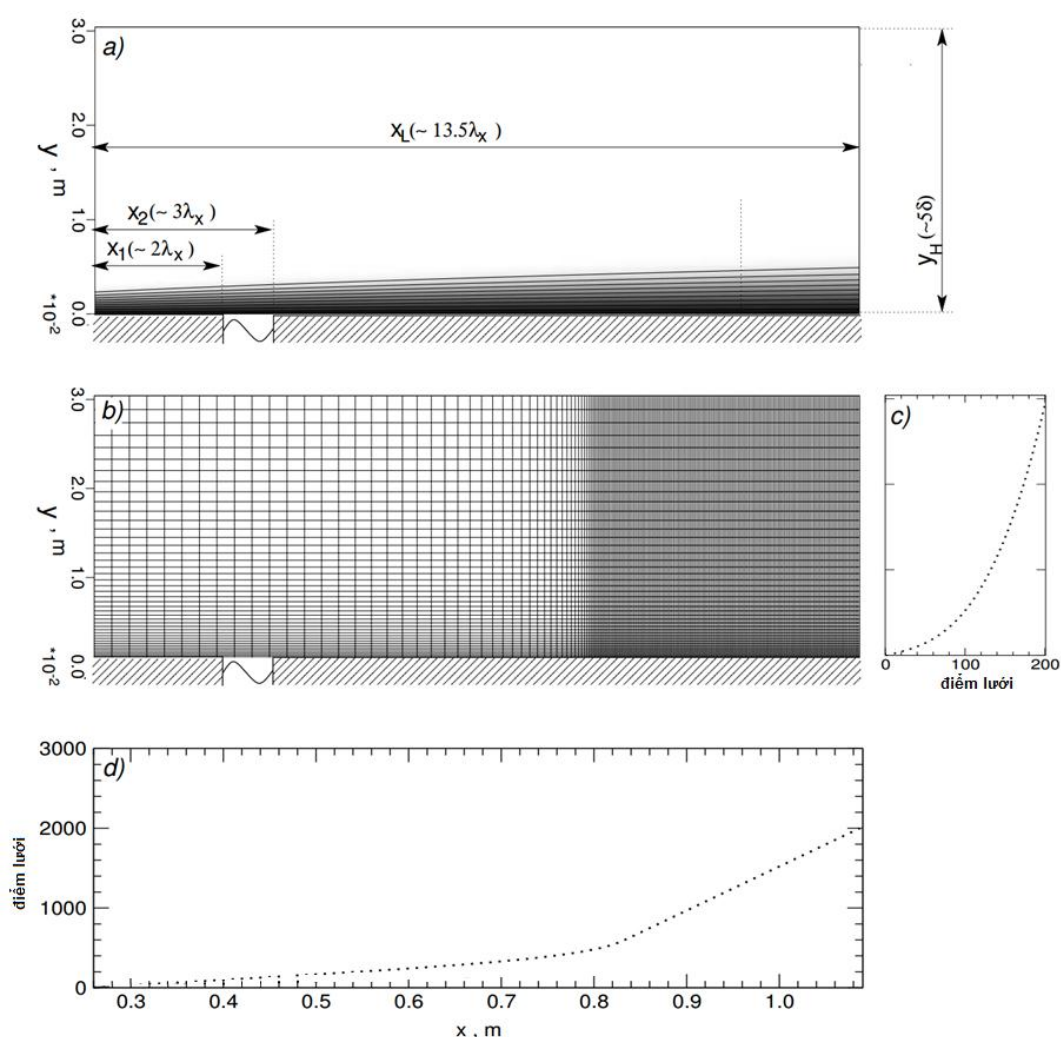
Trên hình 1 mô tả điều kiện biên đặt vào các mặt và lưới tính toán. Lưới có kích thước 2,5 triệu nút lưới và theo các phương (x, y, z) tương ứng với số điểm lưới là $(501 \times 51 \times 101)$. Lưới dọc theo trục x và trục y được nén tại các vùng có thể xảy ra hiện tượng chuyển dòng. Lưới được sử dụng trong bài báo này chính là lưới đã được sử dụng trong [2, 3]. Ở trong các nghiên cứu đó đã thể hiện đầy đủ chất lượng lưới và độ hội tụ lưới nên tác giả không nhắc lại trong bài báo này.

Mép trước cánh đặt tại vị trí $(x = 0, y = 0, -0.015 \leq z \leq 0.015)$, trên mặt đầu vào của vùng tính toán $(x = 0, y, z)$ đặt điều kiện Dirichlet cho dòng tới, trên mặt đầu ra của vùng tính toán $(x = 1,1, y, z)$ đặt điều kiện Extrapolate, trên các mặt còn lại bao gồm hai mặt cạnh $(x, y, z = -0.15)$, $(x, y, z = 0.15)$ và mặt trên cùng $(x, z, y = 3.0)$ của vùng tính toán đặt điều kiện tương ứng với mặt đối xứng. Trên bề mặt cánh $(x, y = 0, z)$ đặt điều kiện đoạn nhiệt, không dính và cứng tuyệt đối.

Vị trí bề mặt mép trước của mặt gợn sóng được đặt cách mép trước của bản mỏng khoảng hai lần bước sóng theo phương X $(x = 0.394)$, kích thước của mặt gợn sóng đúng bằng kích thước của một bước sóng theo phương X $(\lambda_x = 0.058 [2])$.



Hình 1. Lưới và điều kiện biên.



Hình 2. Xây dựng lưới tính toán.

Điều kiện ban đầu của bài toán:

Để có thể đánh giá độ chính xác của kết quả mô phỏng, tác giả chủ động lựa chọn các tham số ban đầu của bài toán trùng với tham số đầu vào trong [2, 3]. Các kết quả mô phỏng trong bài báo này cũng sẽ được so sánh với kết quả nghiên cứu [2, 3]. Nghiên cứu này đã được công bố trên tạp chí ISI nên kết quả của nghiên cứu là đáng tin cậy.

Tham số dòng tới: Số Mach $M_\infty = 3.0$, số Reynolds trên một đơn vị độ dài đặc trưng $Re_{\infty,1} = U_\infty \rho_\infty / \mu_\infty = 2.181 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$. Số Reynolds trên một đơn vị độ dài này là tham số giúp đồng dạng lưới tính toán với kích thước thực của bài toán trong thực tế. Hằng số đoạn nhiệt $\gamma = 1.4$, số Prandtl $Pr = 0.72$, nhiệt độ dòng tới $T_\infty = 103.6\text{K}$, độ

dài đặc trưng $L = 0.7239$ m, $\beta = 211.52\text{m}^{-1}$ (số sóng theo x), $\varepsilon = 0.3\%$ (biên độ dao động của nhiễu) và vị trí đặt vùng lồi-lõm $x_1 = 0.394$, $x_2 = 0.452$.

4. Đề xuất điều kiện biên mới cho bề mặt sóng

Hàm mô phỏng cho bề mặt sóng được đặt cho áp suất tăng giảm theo hình cos theo phương vuông góc với bề mặt cánh như bên dưới:

$$P(y=0) = A(t)v_p(x_p) \cos(\beta z) \cos(-\omega t), \tag{1}$$

$$x_1 \leq x \leq x_2, t \geq 0$$

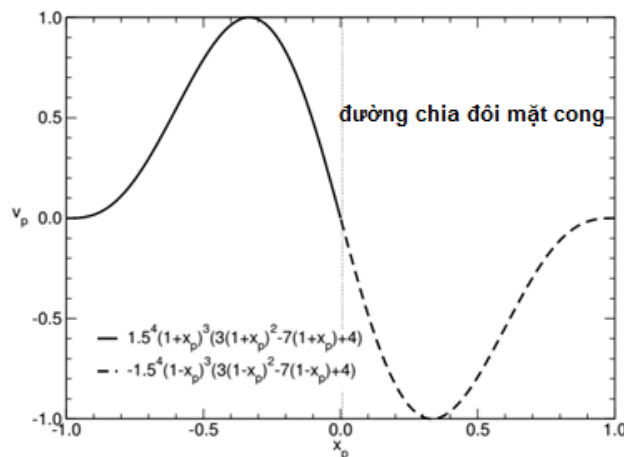
trong đó, β tương ứng là số sóng theo phương z, $x_p = \frac{2x - (x_2 + x_1)}{x_2 - x_1}$, $x_2 - x_1 = \frac{2\pi}{\alpha_{TS}}$ là vị trí tạo sóng trên bề mặt cánh với trung điểm $x_0 = (x_1 + x_2)/2$, ω là tần số dao động của sóng nhiễu.

Biên độ dao động là một hàm phụ thuộc theo thời gian, sao cho giá trị của biên độ tăng dần và đạt cực đại là một hằng số sau một chu kỳ dao động:

$$A(t) = \varepsilon \cdot \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 0.1^{((T-t)/(0.9T))^2}, & 0 \leq t \leq T, \\ 1, & t > T. \end{cases} \tag{2}$$

trong đó: ε là giá trị cực đại của biên độ, $T = 2\pi / \omega$.

Hàm tạo sóng áp suất có dạng là một đa thức như hình 3:



Hình 3. Hàm đa thức tạo sóng áp suất.

Vị trí tạo nhiễu là cố định nhưng hàm tạo nhiễu (1) có giá trị thay đổi theo thời gian dạng hàm cosin. Điều này giúp cho khi nhiễu lan truyền dọc theo phương X sẽ luôn có hai tương tác đồng thời theo phương X và phương Z làm đẩy nhanh quá trình chuyển dòng từ chảy tầng sang chảy rối trong dòng siêu thanh [3].

5. Kết quả mô phỏng

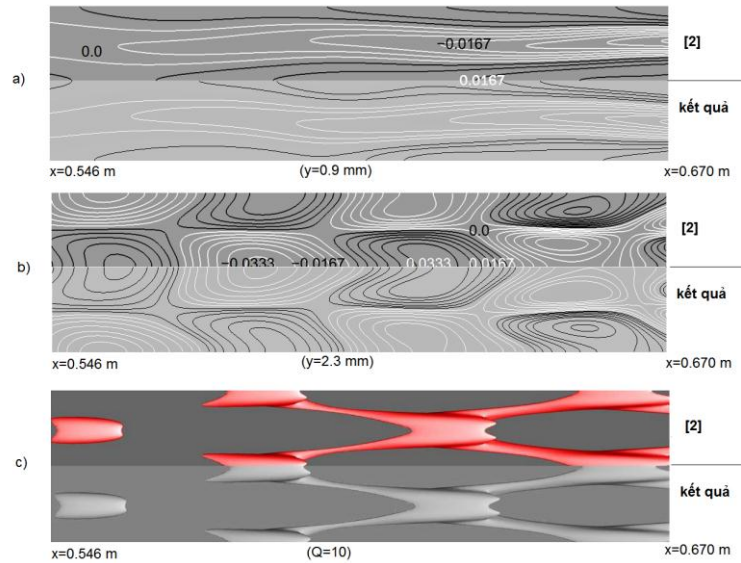
Để quan sát hiện tượng trên bề mặt cánh, ta sử dụng công cụ Q-criterion. Hàm toán học của công cụ Q-criterion được biểu diễn phía dưới:

$$Q = \frac{1}{2} [|\Omega|^2 - |\mathbf{S}|^2] \tag{3}$$

trong đó: $\mathbf{S} = \frac{1}{2} [\nabla \mathbf{V} + (\nabla \mathbf{V})^T]$ và $\Omega = \frac{1}{2} [\nabla \mathbf{V} - (\nabla \mathbf{V})^T]$.

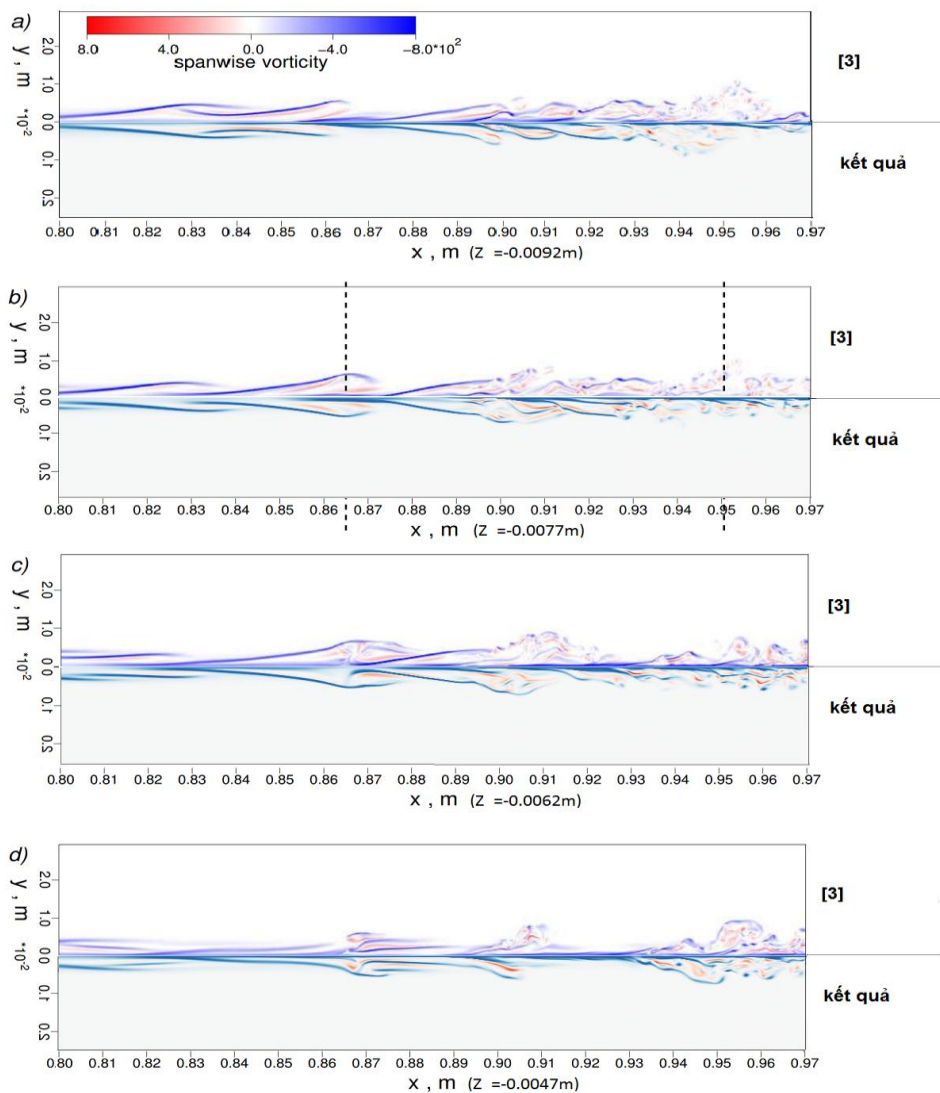
Nếu xét từ quan điểm của biến dạng của một phần tử khí, Q-criterion chính là hiệu của các thành phần tạo biến dạng theo chiều ngang (tạo xoáy) trừ đi các thành phần tạo biến dạng kéo thẳng. Sử dụng công cụ Q-criterion giúp ta quan sát được cấu trúc dòng xoáy sinh ra do sự tương tác khí động gây ra.

Hình 4 mô tả cấu trúc dòng xoáy xuất hiện do sự tương tác của dòng khí sau vùng lồi-lõm với lớp biên bề mặt ngay sau vùng lồi-lõm. Cường độ dòng xoáy tăng dần dọc theo bề mặt cánh. So với kết quả của nghiên cứu [2], ta thấy kết quả mô phỏng trong bài báo này cho ra cấu trúc dòng xoáy tương đồng.



Hình 4. Cấu trúc đường đẳng giá trị khi trong khoảng $x = 0.546 \text{ m}$ đến $x = 0.670 \text{ m}$
 a) Tại mặt cắt $y = 0.9 \text{ mm}$; b) $y = 2.3 \text{ mm}$; c) Kết quả khi $Q = 10$.

Hình 5 mô phỏng dòng khí sau vùng lồi-lõm dọc theo cánh ở mỗi một mặt cắt theo z. Để so sánh kết quả mô phỏng của bài báo với kết quả đã được công bố trong [3], tác giả sử dụng phương pháp so sánh kiểu “phản chiếu”. Theo đó, trên mỗi hình a, b, c, d phía trên là kết quả của nghiên cứu [3], phía dưới là kết quả nghiên cứu của bài báo này. Theo như hình 5 ta thấy, sự tương tác giữa nhiễu làm phá vỡ cấu trúc dòng ổn định trên bề mặt cánh từ sau vị trí $x = 0.87$. Ở vị trí sau vị trí $x = 0.95$, cấu trúc dòng khí lại bị phá vỡ thêm một lần nữa. Cấu trúc dòng chảy với nhiễu xoáy nhỏ hỗn độn từ sau vị trí $x = 0.95$ đặc trưng cho dòng chảy rối. Cũng trên hình 5 ta thấy, kết quả mô phỏng bằng phương pháp mô phỏng trực tiếp (DNS) cho ra kết quả rất tương đồng với nghiên cứu [3].



Hình 5. Cấu trúc dòng phía sau vùng lồi-lõm dọc theo cánh.

Ở trên hình 5 ta cũng thấy rõ, ở các vị trí $x = 0.9-0.92$ có sự khác biệt về cấu trúc dòng chảy nhưng sự khác biệt này rất nhỏ. Sự khác biệt về cấu trúc dòng xoáy bắt đầu rõ hơn từ đoạn sau $x = 0.95$. Đây chính là vị trí mà dòng chảy bắt đầu chuyển sang chảy rối hoàn toàn. Để mô phỏng được dòng chảy ở vị trí này cần công cụ mô phỏng bậc cao và hệ thống máy tính hiện đại. Trong bài báo này, tác giả chỉ sử dụng phương pháp mô phỏng trực tiếp bậc hai theo không gian và thời gian cùng máy tính có cấu hình bình thường nên sự khác biệt ở vùng này là khó tránh khỏi. Tuy vậy, về tổng thể kết quả tính toán của tác giả so với kết quả nghiên cứu [2, 3] là khá tốt, nhất là ở đoạn trước $x = 0.95$.

6. Kết luận

Bằng cách sử dụng phương pháp mô phỏng trực tiếp trên nền tảng sử dụng bộ code mở HSFlow để mô phỏng hiện tượng tương tác khí động do bề mặt dạng sóng với lớp biên trên bề mặt gây ra. Các kết quả mô phỏng chỉ ra rằng:

Ngay sau vùng có bề mặt cong dạng sóng ta thấy xuất hiện cấu trúc dòng xoáy trong lớp biên. Cấu trúc xoáy này có cường độ tăng dần dọc theo bề mặt cánh do sự tương tác của nhiễu với lớp biên bề mặt. Cấu trúc dòng xoáy này khá tương đồng với cấu trúc dòng xoáy thu được trong nghiên cứu [2, 3].

Khi dịch chuyển tiếp dọc theo bề mặt cánh ở vị trí $x = 0.85$, cấu trúc dòng xoáy bắt đầu bị phá vỡ và bị phá vỡ gần như hoàn toàn thành các xoáy có cấu trúc nhỏ hơn, hỗn độn hơn ở vị trí sau $x = 0.95$. Hiện tượng các xoáy lớn bị phá vỡ cấu trúc thành các xoáy nhỏ và chuyển động hỗn độn chính là đặc trưng của dòng chảy rối. Vì thế, nên xét một cách định lượng thì vùng $0.85 < x < 0.95$ chính là vùng chuyển dòng từ chảy tầng sang chảy rối. Như vậy, hiện tượng tương tác do nhiễu từ vùng có bề mặt dạng sóng với lớp biên bề mặt cánh gây ra hiện tượng chuyển dòng từ chảy tầng sang chảy rối trong lớp biên bề mặt.

Kết quả mô phỏng có sự so sánh với kết quả nghiên cứu [2, 3]. Sự tương đồng giữa các kết quả nghiên cứu giúp ta có thể khẳng định rằng phương pháp mô phỏng và kết quả mô phỏng trong nghiên cứu này là chính xác mặc dù tác giả sử dụng phương pháp mô phỏng trực tiếp (DNS) bậc thấp hơn (sử dụng bậc 2 theo không gian và thời gian) so với nghiên cứu [2, 3] (sử dụng bậc 4 theo thời gian và bậc 6 theo không gian). Kết quả nghiên cứu là tiền đề cho việc áp dụng phương pháp mô phỏng trực tiếp có độ chính xác cao vào giải các bài toán khí động phức tạp hơn sau này.

Lời cảm ơn

Tác giả gửi lời cảm ơn chân thành tới đề tài “Sự ảnh hưởng của sóng Mach lên hiện tượng chuyển dòng từ chảy tầng sang chảy rối trong lớp biên dòng siêu thanh” với mã số: QTRU01.01/20-21 đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1] Reynolds, "On the experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and the law of resistance in parallel channels," *Berlin: Phil. Trans. Roy. Soc.* 174, pp. 935-982, 1883.
- [2] Mayer, C. S. J., von Terzi, D. A. & Fasel, H. F., "DNS of complete transition to turbulence via oblique breakdown at Mach 3," *AIAA-2008-4398*, 2008.
- [3] Mayer, C. S. J., von Terzi, D. A. & Fasel, H. F., "DNS of complete transition to turbulence via oblique breakdown at Mach 3: Part. II," *AIAA-2009-3558*, 2009b.
- [4] Егоров И. В., Новиков А. В. , "Прямое численное моделирование ламинарно-турбулентного обтекания плоской пластины при гиперзвуковых скоростях потока," *Журнал вычислительной математики и математической физики*, том 56, No. 6, с. 145-162, 2016.
- [5] Andrey Novikov, Ivan Egorov, "Direct Numerical Simulations of Transitional Boundary Layer over a Flat Plate in Hypersonic Free-Stream," *46th AIAA Fluid Dynamics Conference, Washington, D.C., AIAA Paper 2016-3952*, pp. 1-20, 13-17 June 2016.
- [6] Andrey Novikov, Ivan Egorov, Alexander Fedorov, "Direct Numerical Simulation of Wave Packets in Hypersonic Compression-Corner Flow," *AIAA Journal*, Vol. 54, No. 7, pp. 2034-2050, 2016.

STUDY THE AERODYNAMICS OF WAVEFORM SURFACE IN SUPERSONIC FLOW

Abstract: *The paper presents the application of direct simulation (DNS) method to the study of aerodynamic problems on the waveform surface of a supersonic aircraft and the influence of the waveform surface on the aerodynamic parameters of the aircraft. The waveform surface on supersonic aircraft often occurs such as fighter aircraft, rockets. These waveform surfaces can be caused by design intent or by placement of equipment on the surface. The results illustrated that this surface can increase drag and is the main cause of flow transitions from laminar to turbulent flow or separation in supersonic flows.*

Keywords: DNS; waveform; aircraft; turbulent flow; supersonic.

Nhận bài: 11/01/2022; Hoàn thiện sau phản biện: 03/03/2022; Chấp nhận đăng: 14/04/2022

