

9. Ali, M.M. A penalty function-based differential evolution algorithm for constrained global optimization / M.M. Ali, W.X. Zhu // Comput. Optim. Appl. – Vol. 54. – 2013. – pp. 707-739. doi: 10.1007/s10589-012-9498-3.

УДК 531.533

Степанов Р.П., Кусюмов А.Н.

О МОДЕЛИРОВАНИИ КОНЦЕВОГО ВИХРЯ КРЫЛА КОНЕЧНОГО РАЗМАХА

Выбор подходящего метода идентификации вихревых структур, сходящих с различных несущих поверхностей летательных аппаратов (ЛА), является важной задачей. Анализ ядра вихря, генерируемого несущей поверхностью, позволяет визуализировать вихревую структуру потока, определять значения циркуляции ядра вихря и его размеры в различных сечениях. Другим важным вопросом при исследовании вихревых структур является нахождение положения центра вихря для двумерного случая или оси вихря в трехмерном потоке. Оценка значения циркуляции ядра вихря и воспроизведение траектории вихря позволяют учитывать влияние вихрей на органы управления, расположенные в хвостовой части самолета. Важным вопросом также является оценка влияния концевых вихрей крыла на летящий сзади самолет.

В настоящее время анализ структуры течения и лётно-технические характеристики ЛА в основном определяются путём численного моделирования. Однако повышение точности численного моделирования обтекания ЛА требует значительных вычислительных мощностей. В случаях, когда необходимо провести численное моделирование вихревой структуры в среднем и дальнем поле, затрачиваемые

вычислительные ресурсы могут становиться недоступно высокими. В связи с этим встает вопрос выбора подходящего метода идентификации вихревых структур в условиях наличия погрешностей при получении результатов численного моделирования.

В данной работе анализ вихревой структуры течения проводится с использованием результатов численного моделирования обтекания прямоугольного крыла конечного размаха с относительным удлинением 7,8. Крыло имело постоянный по размаху аэродинамический профиль, близкий к Göttingen-387. Описание условий численного моделирования, расчётной сетки и программы для решения уравнений Навье-Стокса осреднённых по Рейнольдсу (RANS) представлены в [1]. В силу симметрии течения относительно поперечной оси крыла расчётная область при отсутствии угла скольжения строилась для половины размаха крыла.

Одним из наиболее часто используемых методов идентификации вихрей является -критерий [2], в котором ядро вихря определяется как замкнутая пространственная область, в которой евклидова норма тензора завихренности Ω превышает значение нормы тензора деформации \mathbf{S} :

$$Q = \frac{1}{2} (\|\Omega\|^2 - \|\mathbf{S}\|^2) = \frac{1}{2} (\Omega_{ij}\Omega_{ji} - S_{ij}S_{ji}) \geq 0. \quad (1)$$

Здесь $\Omega_{ij} = 0.5(u_{i,j} - u_{j,i})$; $S_{ij} = 0.5(u_{i,j} + u_{j,i})$, где значения $u_{i,j}$ являются производными компонентов вектора скорости по пространственным координатам.

В работе [1] предложен Q^1 -критерий, полученный путем декомпозиции -критерия. В безразмерном виде -критерий можно записать следующим образом:

$$\bar{Q} = |\bar{\Omega}|^2 - |\bar{\mathbf{S}}|^2 = \bar{Q}^1 (|\bar{\Omega}| + |\bar{\mathbf{S}}|), \quad (2)$$

где

$$\bar{Q}^1 = |\bar{\Omega}| - |\bar{\mathbf{S}}| = \frac{b}{2\pi V_\infty} (\|\Omega\| - \|\mathbf{S}\|). \quad (3)$$

Здесь b – хорда крыла, V_∞ – скорость невозмущенного потока.

Как правило, считается, что внешние границы ядра вихря можно определить следующим условием:

$$\bar{Q} = \bar{Q}^1 = 0. \quad (4)$$

Однако на практике при использовании выражения (4) появляются области с малыми значениями Q , которые формально удовлетворяют условию (1), но не относятся к ядру вихря. В связи с этим, границы ядра вихря определяют некоторым малым положительным значением $\bar{Q} = C$. В частности, в данной работе схожие размеры концевого вихря были получены для значений $\bar{Q}^1 = 0,01$ и $\bar{Q} = 0,001$.

На рис. 1 и 2 представлена визуализация концевых вихрей для двух расчетных сеток. В первом случае (рис. 1) сгущение расчетной сетки М1 в окрестности концевого вихря было адаптировано для угла атаки $\alpha = 6^\circ$ и расчеты проводились для $\alpha = 6^\circ$. Во втором случае (рис. 2) область сгущения расчетной сетки М2 за крылом была адаптирована для угла атаки $\alpha = 0^\circ$, но расчеты велись для угла $\alpha = 6^\circ$. Из рис. 1 следует, что численное моделирование с использованием обеих сеток при фиксированном значении угла атаки не выявило существенных различий при построении изоповерхностей ядра вихря с использованием \bar{Q} - и \bar{Q}^1 -критериев. При этом анализ структуры ядра вихря выявил различие в определении положения центра вихря в сечении при использовании сеток М1 и М2. Координаты центра вихря $\mathbf{x}_c = (x, y_c, z_c)$ в двумерном сечении вихря определялись по максимальным значениям Q - и Q^1 -критериев.

$$\bar{Q}(\mathbf{x}_c) = \bar{Q}_{max}, \quad \bar{Q}^1(\mathbf{x}_c) = \bar{Q}^1_{max}. \quad (5)$$

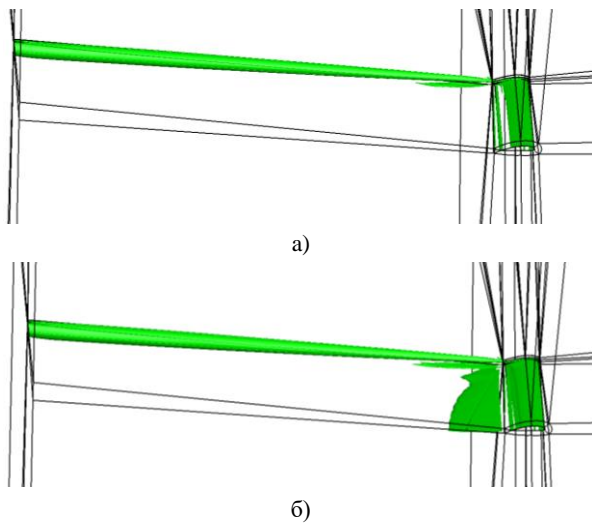


Рис. 1 Визуализация изоповерхностей (расчётная сетка M1):
 а – $\bar{Q}^1 = 0,01$; б – $\bar{Q} = 0,001$.

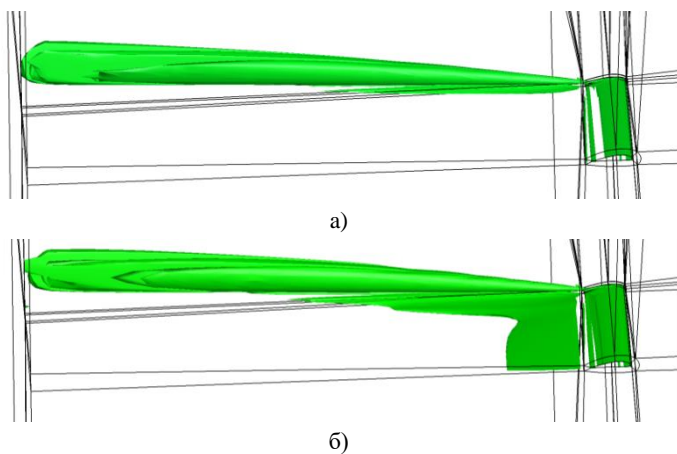


Рис. 2. Визуализация изоповерхностей (расчётная сетка M2):
 а – $\bar{Q}^1 = 0,01$; б – $\bar{Q} = 0,001$

По полученным координатам центров вихрей для различных расстояний x от задней кромки крыла определялось положение оси вихря. Для сетки М1, блочная структура которой адаптирована для рассматриваемого угла атаки $\alpha = 6^\circ$, структура ядра вихря по Q - и Q^1 -критериям оказалась практически идентичной. Положение центра ядра вихря в сечениях располагалось приблизительно в центре ядра и форма оси вихря в обоих случаях выглядит достаточно гладкой. Ломаные кривые на рис. 3 показывают оси вихря, определяемые по положениям координат точек с максимальными значениями Q - и Q^1 -критериев в различных сечениях при моделировании на сетке М2. Следует отметить, что ось вихря, построенная с использованием Q^1 -критерия, является более гладкой по сравнению с осью вихря, полученной с помощью Q -критерия. Анализ показывает, что более гладкая форма кривой оси вихря по Q^1 критерию определяется меньшим влиянием вычислительных погрешностей при вычислении значений Q^1 в сравнении со значениями Q .

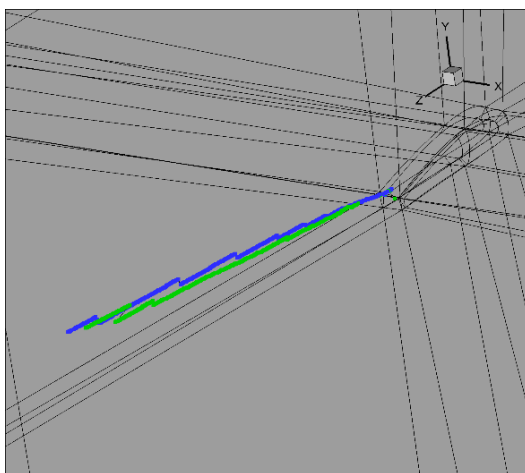


Рис. 3 Сравнение осей вихря, полученных с использованием Q – (синий цвет) и Q^1 – (зелёный цвет) критериев для сетки М1

Из представленных результатов также следует, что \bar{Q}^1 -критерий позволяет отделить область сдвиговых деформаций (непосредственно за задней кромкой крыла) от области ядра концевой вихря.

В заключение кратко сформулируем основные выводы по работе. С использованием результатов численного моделирования рассмотрены вопросы, связанные с определением границ ядра концевой вихря за крылом конечного размаха на базе Q - и Q^1 -критериев. Кривые, определяющие пространственное положение оси вихря, строились по координатам точек с максимальными значениями Q - или Q^1 -критериев. Показано, что Q^1 -критерий позволяет получать более гладкую ось вихря по сравнению с Q -критерием.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ тема 123030100016-5 FZSU-2023-0005.

Библиографический список

1. Hunt, J.C.R. Eddies, stream, and convergence zones in turbulent flows / J.C.R. Hunt, A.A. Wray, P. Moin. – NASA CTR-S88, 1988. – 193-208 p.
2. Степанов, Р.П. О локализации ядра концевой вихря крыла / Р.П. Степанов, А.Н. Кусюмов, Дж. Баракос // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2022. – №1. – С. 131–136.