

УДК 533.6.01

## ОБ УСТОЙЧИВОСТИ СИММЕТРИЧНОЙ ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ОТРЫВНОМ ОБТЕКАНИИ ТЕЛ

© 2011 г.

В.И. Шалаев<sup>1</sup>, И.В. Шалаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт, г. Жуковский

<sup>2</sup>Московский НИИ «АГАТ», г. Жуковский

shalaev@falt.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Представлены результаты исследований устойчивости симметричной вихревой структуры, возникающей при отрывном обтекании тонких тел дозвуковым потоком. Задача сведена к анализу системы обыкновенных дифференциальных уравнений для линий тока. Точный критерий устойчивости получен для конических течений с использованием теории катастроф. Результаты верифицированы сравнением с экспериментальными данными.

*Ключевые слова:* тонкие тела, дозвуковое течение, отрывное обтекание, устойчивость.

Спонтанный переход от симметричного к несимметричному состоянию при отрывном обтекании тел – одна из нерешенных проблем современной аэродинамики, которая имеет важные практические приложения. Несмотря на интенсивные исследования, обзор которых представлен в [1, 2], механизм неустойчивости вихревой структуры до сих пор остается непонятным. Было показано, что бифуркация к асимметричному состоянию может быть вызвана различными неоднородностями течения: малыми деформациями поверхности, вдувом-отсосом газа, акустическими волнами, неоднородностью набегающего потока, ламинарно-турбулентным переходом, взрывом вихря и т.д. Эксперименты и расчеты показали, что очень малые возмущения (технологические неоднородности поверхности, неоднородности расчетной сетки или ошибки округления чисел в компьютере), могут генерировать асимметрию течения. Имеются две интерпретации появления асимметрии: конвективное усиление стационарных возмущений, генерируемых в окрестности вершины, и абсолютная неустойчивость развития возмущений. Однако обе точки зрения не объясняют существующих наблюдений. В настоящем исследовании показано, что возникновение асимметрии связано со структурной (или глобальной) неустойчивостью симметричного течения. Задача сведена к анализу стационарных точек нелинейной динамической системы, которая описывает линии тока симметричного решения. Строгие математические результаты имеются только для автономных градиентных систем [3], которые соответствуют коническим

течениям. В этом случае на основе теории катастроф получен критерий устойчивости симметричного течения, подтвержденный экспериментальными данными [4, 5].

Рассмотрим симметричное тонкое тело длины  $l$  в набегающем потоке со скоростью  $u_\infty$  (рис. 1) и введем безразмерные переменные и предположения:

$$X = X^*/l, \quad Y = Y^*/(\delta l), \quad \alpha = \alpha^*/\delta = O(1),$$

$$\delta \ll 1, \quad \text{Re} = u_\infty l \delta / \nu_\infty \gg 1,$$

$$u^* = u_\infty [1 + \delta^2 u(X, Y, Z)], \quad w^* = \delta u_\infty w(X, Y, Z),$$

$$v^* = \delta u_\infty v(X, Y, Z).$$

Здесь  $\delta l$  – ширина тела,  $\alpha^*$  – угол атаки,  $\nu_\infty$  – кинематическая вязкость. При таком выборе масштабов течение в главном приближении описывается

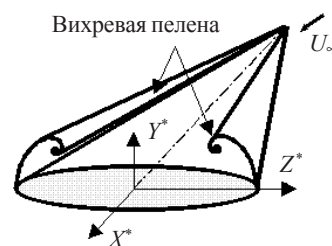


Рис. 1

уравнениями Эйлера в приближении тонкого тела, в котором уравнения для поперечного течения отделяются; положения отрыва вихревых пелен определяются решением уравнений пограничного слоя.

Глобальная структура течения определяется свойствами стационарных точек системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих линии тока в поперечном сечении (рис. 2).

Точные результаты имеются только для автономных градиентных систем [3], которые со-

ответствуют обтеканию острых конических тел. В этом случае функции течения зависят от автомодельных переменных, а уравнения для линий тока имеют вид:

$$x = \ln X, \quad \eta = \frac{Y}{X}, \quad z = \frac{Z}{X},$$

$$\frac{d\eta}{dx} = v(\eta, z) - \eta, \quad \frac{dz}{dx} = w(\eta, z) - z.$$

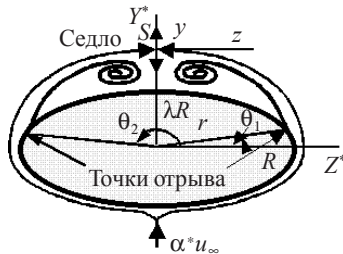


Рис. 2

При отрывном обтекании тела при достаточно больших углах атаки структура поперечного течения включает в себя следующие стационарные точки (рис. 2): две критические точки на наветренной и подветренной образующих, два центра вихря и две точки отрыва; седловая точка  $S$  может быть или не быть в потоке – именно эта точка контролирует структуру течения. Из теории устойчивости нелинейных динамических систем следует, что устойчивость стационарных точек определяется локальными свойствами течения в их окрестности, т.е. коэффициентами ряда Тэйлора для скоростей в этих точках [3]. Для системы координат, связанной с седловой точкой  $S$ , уравнения для линий тока в локальной окрестности имеют вид:

$$y = \eta - \eta_s \ll 1, \quad z \ll 1: \quad \frac{dz}{dx} = -cz + bz^3 - 3by^2z,$$

$$\frac{dy}{dx} = -c_1y + by^3 - 3byz^2y,$$

$$c(\alpha, \theta_s) = 1 - a(\alpha, \theta_s), \quad c_1(\alpha, \theta_s) = 1 + a(\alpha, \theta_s).$$

Для расчета течения около эллиптических конусов с отношением осей  $0.01 \leq \lambda \leq 1$  использовалась простая модель точечных вихрей и разреза, моделирующая вихревую пелену. Критерии начала асимметрии для кругового конуса представлены на рис. 3 в виде зависимостей

критического угла атаки  $\alpha$  от угла отрыва  $\theta_s$ . Кривая соответствует расчетам коэффициента  $c_1(\alpha, \theta_s) = 0$ , кружки соответствуют экспериментальным данным из [4]; ромбы – из [5]. Данные из [4] демонстрируют сходимость расчетных и экспериментальных значений при уменьшении угла раствора. Подобные результаты получены для эллиптических конусов с отношением полуосей меньше единицы.

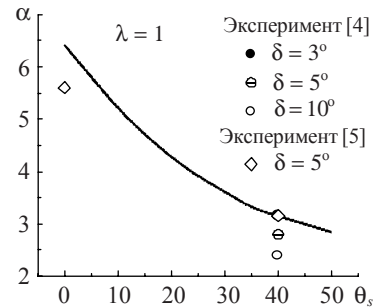


Рис. 3

Для оценки возможности управления таким течением с помощью объемного и поверхностного нагрева газа были проведены расчеты турбулентного пограничного слоя в локально-автомодельном приближении. Получено, что объемный нагрев можно эффективно использовать для управления течением, что подтверждается экспериментами [5].

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №09-01-00206) и АВЦП РНПВШ № 2.1.1/200.*

#### Список литературы

1. Shalaev V. et al. Plasma control of forebody nose vortex symmetry breaking // AIAA P. 2003. No 0034.
2. Shalaev V., Fedorov A., Malmuth N., Shalaev I. Mechanism of forebody nose vortex symmetry breaking relevant to plasma flow control // AIAA P. 2004. No 0842.
3. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. Т. 1, 2. М.: Мир, 1984. 635 с.
4. Lowson M.V., Ponton A.J.C. Symmetric breaking in vortex flows on conical bodies // AIAA J. 1992. N6. P. 1576–1583.
5. Фомин В.М. и др. Управление вихревым обтеканием тел вращения при помощи электрического разряда // Докл. РАН. 2004. Т. 396, №5. С. 1–4.

## ON THE STABILITY OF SYMMETRICAL VORTEX STRUCTURE IN A SEPARATED FLOW OVER BODIES

V.I. Shalaev, I.V. Shalaev

Studies of symmetrical vortex structure stability in separated subsonic flow over slender bodies are presented. The problem is reduced to the analyses of an ordinary differential equation system for streamlines. Using the catastrophe theory, an exact stability criterion is obtained for conical flows. The results are verified by comparison with experimental data.

*Keywords:* slender bodies, subsonic flows, separated flow, stability.