

УДК 532+533

В.А. ЗАХАРЕНКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

РАСЧЕТ ОТРЫВНОГО ОБТЕКАНИЯ НЕПЛОСКИХ ФОРМ ПРИ БОЛЬШИХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

Предложена модель расчета отрывного обтекания тонкого профиля бесконечного размаха при больших числах Рейнольдса. Данная задача решалась с применением теории исчезающей вязкости, в которой обосновывается применение на подветренной стороне обтекаемого тела граничных условий, отличных от общепринятых. Приведен пример расчета некоторых неплоских форм, таких как дуга окружности и уголок, расположенных перпендикулярно набегающему потоку. Выполнено сравнение полученных теоретических данных с экспериментальными данными, которое показало их хорошее количественное и качественное совпадение в широком диапазоне исследуемых форм.

Ключевые слова: теория исчезающей вязкости, тонкий профиль, отрывное обтекание, метод гидродинамических особенностей, число Рейнольдса, силовое взаимодействие, дуга окружности, уголок.

Введение

Актуальной проблемой проектирования современных летательных аппаратов является предварительный расчет их аэродинамических характеристик на режимах полета, при которых их можно рассматривать как неудобнообтекаемые тела. К числу таких режимов можно отнести некоторые участки маневрирования, взлета, посадки, когда движение происходит на углах атаки близких к критическим и даже закритическим углам атаки, что влечет за собой отрывной характер обтекания несущих поверхностей. Особое место в числе таких режимов занимает движение беспилотных летательных аппаратов на участках торможения, предшествующих выбросу парашюта или началу участка вертикальной посадки данного летательного аппарата. На таких участках торможения углы атаки беспилотного летательного аппарата могут достигать 90° .

Анализ моделей и схем, применяемых для расчета обтекания неудобнообтекаемых тел, показывает, что те из них, которые дают результаты, хорошо совпадающие с экспериментальными данными, достаточно трудоемки и требуют при их применении большого искусства. Это, прежде всего, выражается в затратах компьютерных ресурсов и времени разработчиков (поскольку при моделировании явления должны быть выбраны адекватные расчетные схемы, в частности модели турбулентности). Более же простые схемы, в которых используется модель идеальной жидкости, дают неудовлетворительные результаты.

Поэтому предлагаемая в статье модель расчета обтекания тонкого профиля при больших углах атаки преследовала целью создание простой и эффек-

тивной методики расчета силового взаимодействия с потоком, которая могла бы успешно применяться на этапах предварительного проектирования летательных аппаратов и других конструкций, которые эксплуатируются на режимах отрывного обтекания при больших числах Рейнольдса порядка 10^6 . На практике это соответствует числу Рейнольдса, имеющему место при движении тела с характерным размером 1 м со скоростью 10–15 м/с.

В качестве теоретической основы моделирования данного процесса обтекания была привлечена теория исчезающей вязкости [1]. В рамках данной теории показано, что при обтекании тела потоком несжимаемой жидкости, при $Re \rightarrow \infty$, (рис. 1), уравнения движения вязкой жидкости переходят в уравнения идеальной жидкости, а вязкость среды следует учитывать только на подветренной стороне обтекаемого тела. При этом вся плоскость течения разбивается на область внешнего течения D_1 и область донного течения D_2 .

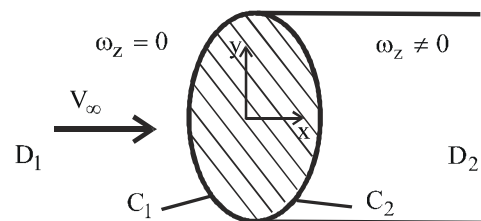


Рис. 1. Обтекание плоского контура жидкостью

В этой теории принимается, что:

$$\begin{cases} V_{n\Sigma} = 0, \text{ на } C_1, \\ V_x = 0, V_y = 0, \text{ на } C_2. \end{cases} \quad (1)$$

То есть на наветренной стороне C_1 выполняется условие непротекания, а на подветренной стороне C_2 возможно выполнение условия прилипания.

Это позволило сформулировать граничные условия отличные от общепринятых, которые впоследствии были применены для решения задач обтекания тонких профилей различной формы, таких как пластина, дуга окружности и уголок.

Постановка и решение задачи об обтекании тонкого профиля

Задача состоит в определении силового взаимодействия тонкого профиля с потоком несжимаемой жидкости со срывом потока с его концов. При условии, что параметры потока конечны во всем поле течения.

Задача решается с использованием метода особенностей и в предположениях:

1. Нестационарный поток заменен осредненным по времени стационарным.
2. Плотность жидкости есть величина постоянная.
3. Скорость набегающего потока постоянна и равна V_∞ .
4. Внешние силы отсутствуют.

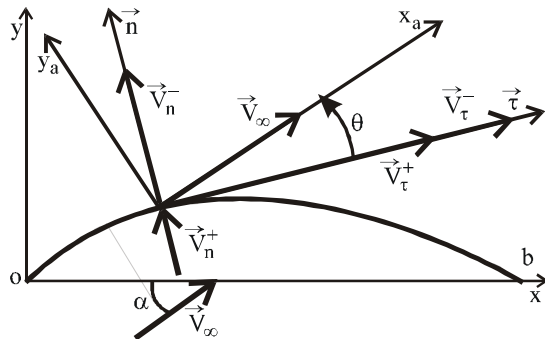


Рис. 2. К постановке задачи об отрывном обтекании тонкого профиля

Граничные условия, определяющие решение поставленной задачи, имеют вид:

$$\begin{cases} V_n^+ + V_\infty \sin \theta = 0, \\ V_{y_a}^- = 0, \\ V_{x_a}^- = V_\infty + \frac{\partial \varphi}{\partial x_a} - \alpha(y_a) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где знаки "+" и "-" обозначают, соответственно, наветренную и подветренную стороны профиля;

V_n^+ – нормальная составляющая скорости к поверхности профиля, индуцированная распре-

деленными по профилю особенностями;

\vec{n} – нормаль к подветренной стороне профиля в точке удовлетворения граничного условия;

φ – потенциал возмущений – потенциал скорости, индуцируемой распределенными особенностями.

Первое и второе уравнения определяют закон распределения по профилю особенностей на этапе динамического моделирования, а третье определяет функцию $\alpha(y_a)$ и скорости "реального" потока в ближнем следе на этапе кинематического моделирования.

Эта система уравнений будет однозначно определена, если при решении задачи использовать два типа особенностей, один из которых "источник – сток" – q дает разрыв нормальной составляющей скорости по линии распределения, а другой "циркуляционная особенность" – γ дает разрыв касательной составляющей.

Задача решается методом граничных интегральных уравнений. При их численном решении принята следующая расчетная схема (рис. 3).

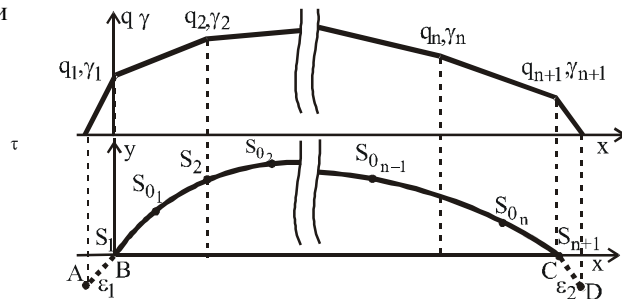


Рис. 3. Расчетная схема задачи

Система алгебраических уравнений, получающаяся при численной реализации, согласно принятой расчетной схеме имеет следующий вид:

$$\begin{cases} V_n^+ K(q_1, \dots, q_{n+1}, \gamma_1, \dots, \gamma_{n+1}, \epsilon_1, \epsilon_2) + V_\infty \sin \theta = 0, \quad K=1..n \\ V_{y_a}^- K(q_1, \dots, q_{n+1}, \gamma_1, \dots, \gamma_{n+1}, \epsilon_1, \epsilon_2) = 0, \\ V_n^+ B(q_1, \dots, q_{n+1}, \gamma_1, \dots, \gamma_{n+1}, \epsilon_1, \epsilon_2) + V_\infty \sin \theta = 0, \\ V_n^+ C(q_1, \dots, q_{n+1}, \gamma_1, \dots, \gamma_{n+1}, \epsilon_1, \epsilon_2) + V_\infty \sin \theta = 0, \\ V_{y_a}^- B(q_1, \dots, q_{n+1}, \gamma_1, \dots, \gamma_{n+1}, \epsilon_1, \epsilon_2) = 0, \\ V_{y_a}^- C(q_1, \dots, q_{n+1}, \gamma_1, \dots, \gamma_{n+1}, \epsilon_1, \epsilon_2) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Использование в расчетной схеме промежутков ϵ_1 и ϵ_2 , на которых граничные условия не выполняются, позволило записать замыкающие уравнения системы (3) в виде граничных условий в крайних точках профиля и обеспечить конечности скоростей на кромках, как это делалось, например, при расчете

безотрывного обтекания пластины в [2, 3].

После решения системы (3) и нахождения закона распределения особенностей по профилю вычисляется силовое взаимодействие профиля с потоком путем интегрирования давления по подветренной и наветренной стороне профиля.

С применением данной модели была решена задача отрывного обтекания пластины бесконечного размаха [4]. Полученные результаты по силовому взаимодействию с потоком показали хорошее совпадение с данными эксперимента в диапазоне углов атаки от 50° до 90° и удовлетворительное в диапазоне от 20° до 50°.

В качестве примеров применения данной модели для расчета обтекания тонких профилей, чья форма отличается от плоской пластины, были решены тестовые задачи обтекания тонкого профиля в виде дуги окружности и уголка, расположенных перпендикулярно набегающему потоку.

Расчет обтекания дуги окружности

Постановка задачи отрывного обтекания дуги окружности (рис. 4) аналогична общей постановке задачи об обтекании профиля произвольной формы.

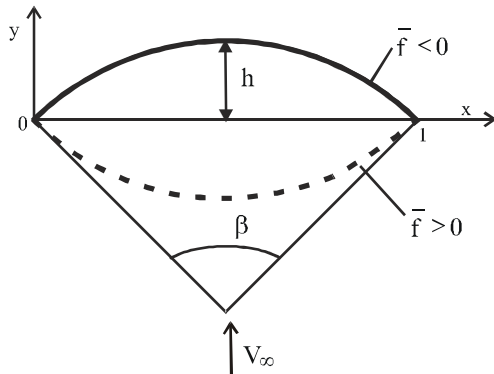


Рис. 4. Геометрические параметры дуги окружности

В результате решения задачи были получены значения коэффициента лобового сопротивления в широком диапазоне изменения относительной вогнутости данного профиля. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Результаты расчетов показали качественное совпадение полученных теоретических данных с данными эксперимента, приведенными в работе [5]. Это проявилось в характере изменения величины коэффициента лобового сопротивления в зависимости от изменения вогнутости профиля. Так, в случае нулевой вогнутости, результаты расчета совпадают с коэффициентом лобового сопротивления пластины, а с увеличением абсолютной величины вогнутости в положительную и отрицательную стороны,

коэффициент лобового сопротивления имеет тенденцию к увеличению и уменьшению, соответственно.

Таблица 1

Результаты расчета силового взаимодействия дуги окружности с потоком

$\beta(^{\circ})$	0 (Пластина)	0,5	30	90	180 (Полукруг)
$ \bar{f} = \frac{1}{2} \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{4}\right)$		0,0011	0,065	0,207	0,5
$c_{x_a}(\bar{f} > 0)$	1,981	1,985	2,11	2,21	2,743 (2,3)*
$c_{x_a}(\bar{f} < 0)$	1,981	1,978	1,776	1,55	1,092 (1,2)*

* – экспериментальные значения коэффициентов.

Расчет обтекания уголка

Предлагаемая модель отрывного обтекания тонкого профиля в дальнейшем была применена для расчета еще одного частного случая отрывного обтекания уголка, расположенного перпендикулярно набегающему потоку. Возможность применения данной модели обтекания обусловлена тем, что точка торможения потока лежит на вершине уголка, при угле $\beta > 0$, что обеспечивает его безотрывное обтекание в данной области.

Геометрические параметры уголка, расчетные значения его аэродинамических характеристик и экспериментальные данные [5] приведены на рис. 5 (треугольниками обозначены результаты теоретических расчетов, выполненных с использованием предлагаемой в статье модели).

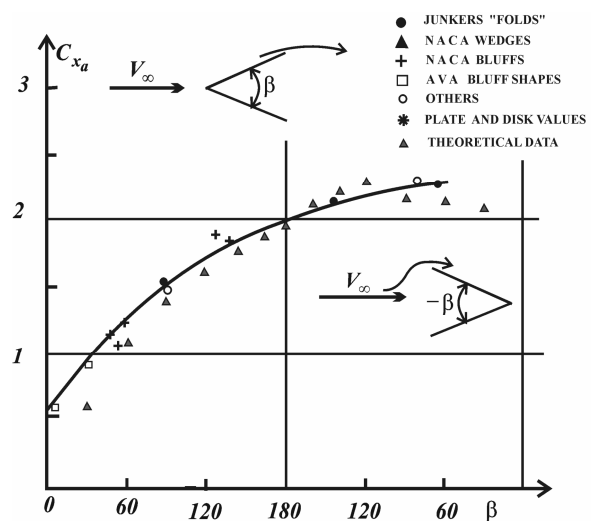


Рис. 5. Сравнение теоретических и экспериментальных данных, геометрические параметры уголка

Анализируя полученные результаты, необходимо отметить хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных в интервале изменений центрального угла уголка от -120 до 120 градусов и удовлетворительное совпадение в остальном диапазоне изменения углов β .

Заключение

Сравнение результатов численного моделирования отрывного обтекания тонких тел в виде дуги окружности и уголка с экспериментальными данными позволяет сделать вывод о возможности построения на базе предложенной, более общей модели отрывного обтекания целого ряда неудобообтекаемых тел конечного размаха.

Данная модель, в силу ее простоты и скорости получаемых результатов, может с успехом применяться на этапах предварительного проектирования летательных аппаратов с целью расчета их аэродинамических характеристик на участках полета, когда их можно рассматривать как неудобообтекаемые тела.

Литература

1. Кочин Н.Е. Теоретическая гидромеханика. Ч. 2 / Н.Е. Кочин, И.А. Кибель, Н.В. Розе. – М.: ГИИФЛ, 1963. – 728 с.
2. Санжаревский Л.Г. Одно из обобщений теоремы Н.Е. Жуковского о подъемной силе тонкого профиля / Л.Г. Санжаревский, В.А. Захаренко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Темат. сб. научн. трудов. – Х.: Гос. аэрокосмич. ун-т, 1999. – Вып. 16(3). – С. 64-68.
3. Захаренко В.А. Непрерывное обтекание тонкого профиля / В.А. Захаренко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія: Зб. наук. праць.* – Х.: Держ. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 1999. – Вип 14. – 207с. – С. 12-17.
4. Захаренко В.А. Отрывное обтекание плоской пластины бесконечного размаха при условии конечности скорости во всем поле течения / В.А. Захаренко // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2004. – № 1 (9). – С. 45-48.
5. Hoerner F.S. Practical information on Aerodynamic and Hydrodynamic resistance / F.S. Hoerner // *Library on Congress Catalog card number 64-19666.* – 455 p.

Поступила в редакцию 1.02.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры аэрогидродинамики В.В. Тюрев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

РОЗРАХУНОК ВІДРИВНОГО ОБТІКАННЯ НЕПЛОСКИХ ФОРМ ПРИ ВЕЛИКИХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

В.О. Захаренко

Запропонована модель розрахунку відривного обтікання тонкого профілю нескінченного розмаху потоком рідини при великих числах Рейнольдса. Задача вирішувалась з використанням теорії зникаючої в'язкості. В статті наведений приклад розрахунку деяких неплоских форм, таких як дуга кола і куточок, розташованих перпендикулярно набігаючому потоку. Виконано порівняння отриманих теоретичних даних з даними експерименту, яке показало їх хороший кількісний і якісний збіг в широкому діапазоні досліджуваних форм.

Ключові слова: теорія зникаючої в'язкості, тонкий профіль, відривне обтікання, метод особливостей, великі числа Рейнольдса, силова взаємодія, дуга кола, куток.

THE CALCULATION OF SEPARATED FLOW AROUND SOME TYPES OF NONPLANAR SHAPES AT LARGE REYNOLDS NUMBERS

V.A. Zaharenko

The model of separated flow around thin infinity spanwise airfoil is shown in the article. The problem solved using the theory of disappear viscosity. In article the examples of calculation of some no planar shapes such as arc of a circle and angle are shown. The comparison of obtained theoretical and experimental data is shown good coinciding in wide range of investigated shape parameters.

Key words: theory of disappear viscosity, thin airfoil, separated flow, method of singularities, large Reynolds numbers, force interaction, of a circle, angle.

Захаренко Владимир Александрович – ассистент кафедры аэрогидродинамики, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.