

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Самарский государственный
аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева
(национальный исследовательский университет)» (СГАУ)**

**Государственный научно-производственный ракетно-космический центр
«ЦСКБ – Прогресс»**

Самарский научный центр Российской академии наук

**Поволжское региональное отделение Российской академии космонавтики
имени К. Э. Циолковского**

Самарское отделение Академии навигации и управления движением

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ И НАВИГАЦИЯ

ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

**Сборник трудов
XVI Всероссийского семинара
по управлению движением и навигации
летательных аппаратов
(Самара, 18-20 июня 2013 г.)**

Часть I

Самара 2013

Управление движением и навигация летательных аппаратов: Сборник трудов XVI Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов: Часть I. Самара, 18-20 июня 2013 г. – Самара, Изд-во СНЦ РАН, 2013. 246 с.

В сборник научных трудов включены материалы XVI Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов, прошедшего 18-20 июня 2013 года в г. Самара.

Организаторами семинара являлись Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева, Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс», Самарский научный центр Российской академии наук, Поволжское региональное отделение Российской академии космонавтики имени К.Э. Циолковского, Самарское отделение Академии навигации и управления движением.

Семинар проведен при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 13-08-06039-г).

Научный редактор сборника:

заместитель председателя СНЦ РАН, профессор, д.т.н. Лазарев Ю.Н.

Ответственные за выпуск сборника:

профессор кафедры космического машиностроения, д.т.н. Балакин В.Л.

доцент кафедры космического машиностроения, к.т.н. Кочян А.Г.

ISBN 978-5-93424-673-1

© Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С. П. Королева
(национальный исследовательский университет)

Аэродинамика летательных аппаратов

УДК 532.516

Андронов П.Р., Гувернюк С.В., Дынникова Г.Я.

НЕСТАЦИОНАРНОЕ ОБТЕКАНИЕ И НАГРУЗКИ ПРИ ДВИЖЕНИИ СФЕРОИДА В ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ СРЕДЕ

Исследование особенностей взаимодействия тел со средой на участках их ускоренного движения представляет интерес с точки зрения оценки энергетических ресурсов, необходимых для преодоления сопротивления движению. В частности, на начальном участке, когда скорость тела возрастает от нуля до требуемого расчетного значения, возможен резкий скачок аэродинамического сопротивления [1].

В работе рассматривается равноускоренное движение сфероидов. Примером летательного аппарата, имеющего подобную форму, является первый дирижабль, построенный Ж.Б. Менье в 1784 году (рис. 1).



Рис. 1. Дирижабль в форме сфероида

1. Постановка задачи. Рассматривается нестационарное осесимметричное обтекание недеформируемого эллипсоида вращения $(x/a)^2 + (y/b)^2 = 1$, движущегося поступательно в вязкой несжимаемой сплошной среде вдоль собственной оси симметрии x . В начальный момент времени $t = 0$ тело и среда, занимающая неограниченное пространство, покоятся. На отрезке $0 < t < t_1$ тело движется равноускоренно, достигая скорости V_1 , после чего продолжает движение с постоянной скоростью V_1 .

В предположении о консервативности поля внешних сил $\mathbf{F} = -\nabla\Pi$ уравнения Навье-Стокса и неразрывности для движения вязкой несжимаемой жидкости имеют вид:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} - \mathbf{V} \times \boldsymbol{\Omega} = -\nabla \left(\frac{p}{\rho} + \Pi + \frac{V^2}{2} \right) + \nu \nabla^2 \mathbf{V}, \quad \nabla \cdot \mathbf{V} = 0,$$

где $\Omega = \nabla \times \mathbf{V}$ – завихренность, p – давление, ρ – плотность, ν – кинематический коэффициент вязкости среды. Граничные условия на бесконечности – равенство нулю скоростей частиц жидкости; на поверхности тела – условие прилипания, означающее, что скорость среды в окрестности контура образующей осесимметричного тела равна скорости соответствующей точки контура. Далее используются безразмерные переменные, в качестве характерных масштабов длины и времени взяты радиус миделевого сечения тела b и время его ускоренного движения t_1 . Число Рейнольдса $Re = b V_1/\nu$.

2. Метод решения. Использован лагранжев бессеточный метод [2-6] решения нестационарных уравнений Навье-Стокса – метод вязких вихревых доменов (ВВД). Пространство с ненулевой завихренностью моделируется набором мелких областей (вихревых доменов), движущихся относительно жидкости с диффузионной скоростью. На каждом временном шаге с контрольных интервалов разбиения поверхности тела сходят новые домены, моделирующие поток завихренности. В процессе движения циркуляция домена Γ остается постоянной. В каждом домене имеется контрольная точка \mathbf{R} , в которой с помощью специальных интегральных представлений вычисляется конвективная скорость жидкости \mathbf{V} и вихре-диффузионная скорость $\mathbf{V}_d = -\nu \nabla(y\Omega) / (y\Omega)$, где y – расстояние до оси симметрии, Ω – ненулевая компонента вектора завихренности осесимметричного поля скорости без закрутки. На очередном интервале времени точка \mathbf{R} перемещается с суммарной скоростью $\mathbf{V} + \mathbf{V}_d$. При вычислении диффузионной скорости используется интегральное представление градиента поля завихренности в окрестности контрольной точки, содержащее минимаксный параметр ε . Вещественная положительная величина ε зависит от расстояний до других доменов и поверхности обтекаемых тел и в этом смысле представляет собой «геометрический функционал». Таким образом, понятие «домен» включает в себя три математических объекта: радиус-вектор \mathbf{R} , скаляр Γ , и функционал ε . При этом интенсивность домена Γ с течением времени остается постоянной, а величины \mathbf{R} и ε вычисляются на каждом временном шаге. По величине потока завихренности с поверхности тела, положению контрольных точек и по значениям циркуляций соответствующих им доменов с помощью процедур интегрирования (суммирования) восстанавливаются поле скорости, давления и нестационарные гидродинамические нагрузки на тело.

3. Результаты расчетов. Сфероид с отношением осей $a/b = 1,25$ движется на интервале безразмерного времени $0 < t < 1$ по закону $x = -12,5 t^2$, а при $t > 1$ – по закону $x = -25 (t - 0,5)$ с постоянной скоростью $V_1 = 25$ единиц. Число Рейнольдса $Re = 100$. На

рис. 2 расположение доменов и вычисленная по соответствующему мгновенному полю скорости картина линий тока построены для момента времени $t = 1,7$.

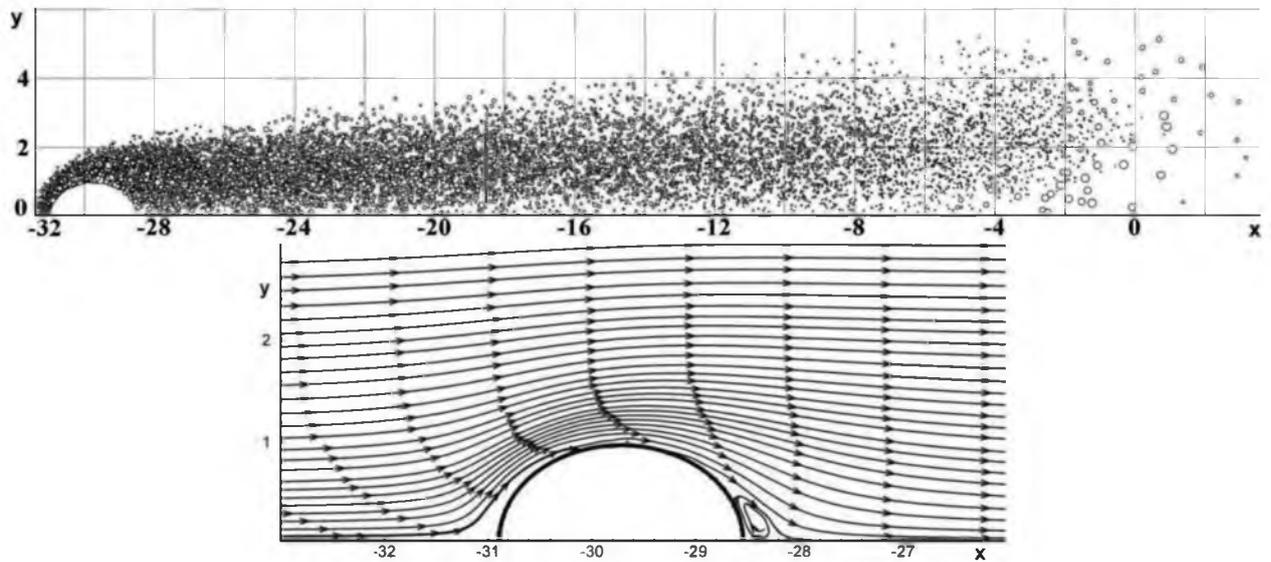


Рис. 2

На рис.3,а построена зависимость коэффициента сопротивления сфероида C_x от времени, на рис. 3,б – изменение положения линии отрыва на поверхности сфероида с течением времени, x_s – расстояние от центра сфероида до плоскости линии отрыва (на интервале безотрывного обтекания $x_s = a/b = 1,25$).

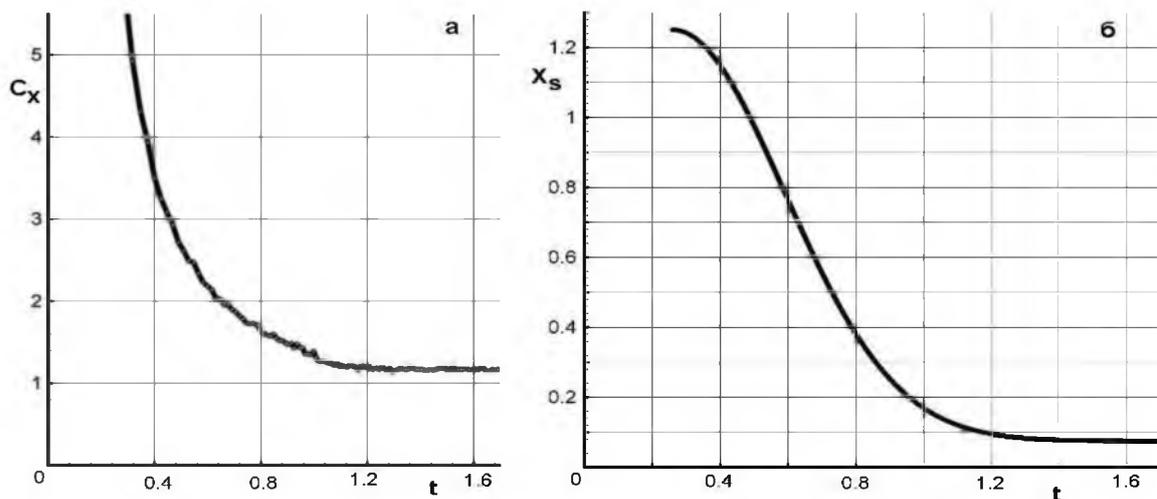


Рис. 3

В момент перехода от равноускоренного к равномерному движению $t = 1$ коэффициент сопротивления C_x равен 1,31 и затем при $t > 1$ монотонно убывает до 1,17. Процесс релаксации сопротивления занимает примерно 30% от периода разгона тела. При этом сила сопротивления уменьшается на 11 % по сравнению с ее мгновенным значением в момент «отключения» ускорения.

Заключение. Бессеточный метод ВВД позволяет определять нестационарные вихревые структуры и распределения напряжений трения и давления по поверхности тел, а

также суммарное аэродинамическое сопротивление от времени на режимах ускоренного и равномерного движения тела. При этом расположение линии отрыва потока на гладкой поверхности тела определяется автоматически в процессе расчета. Сравнение кривых на рис. 3 показывает, что примерно в тот же момент времени, когда стабилизируется положение линии отрыва, сила сопротивления выходит на квазипостоянное значение, соответствующее длительному равномерному движению.

Библиографический список

1. Белинский, В.Г. Сопротивление диска и сферы при ускоренном движении из состояния покоя / В.Г. Белинский В.Г., П.И. Зинчук // Бионика. – 1998. – Т. 27-28. – С. 88-99.
2. Белоцерковский, С.М. Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью / С.М. Белоцерковский, М.И. Ништ. – М.: Наука, 1978. – 351с.
3. Сарпкая, Т. Вычислительные методы вихрей. Фримановская лекция (1988) / Т. Сарпкая // Современное машиностроение. Сер. А. – 1989. – №10. – С. 1-60.
4. Гоман, О.Г. Численное моделирование осесимметричных отрывных течений несжимаемой жидкости. Под ред. М.И. Ништа / О.Г. Гоман, В.И. Карплюк, М.И. Ништ, А.Г. Судаков – М.: Машиностроение. – 1993. – 288 с.
5. Дынникова, Г.Я. Лагранжев подход к решению нестационарных уравнений Навье-Стокса / Г.Я. Дынникова // Докл. РАН. –2004. – Т. 399. – №1. – С. 42-46.
6. Андронов, П.Р.. Вихревые методы расчета нестационарных гидродинамических нагрузок /П.Р. Андронов, С.В. Гувернюк, Г.Я. Дынникова – М.: Изд-во Моск. ун-та. – 2006. – 184 с.