

МЕТОД РАСЧЕТА ОБТЕКАНИЯ ТЕЛЕСНОЙ МОТОГОНДОЛЫ С УЧЕТОМ РЕАКТИВНОЙ СТРУИ ОТ ДВИГАТЕЛЯ

Исследования интерференции элементов компоновки (крыло, закрылок, мотогондола двигателя) летательного аппарата (ЛА) в целях улучшения его аэродинамических характеристик имеет большой практический интерес. Использование натуральных экспериментов при решении данных задач требует значительных материальных затрат и не всегда позволяет получить полную картину рассматриваемого физического явления. В связи с этим актуальными остаются вопросы математического моделирования течения газа около элементов компоновки ЛА с учетом их интерференции.

Известно [1, 2], что местоположение мотогондолы двигателя, параметры реактивной струи на летательном аппарате существенно влияют на распределенные характеристики воздушного потока около поверхности самолета. Это влияние, как правило, приводит к дополнительному интерференционному сопротивлению [2]. Существующие методы расчета интерференции между работающим двигателем и ЛА основаны на моделировании мотогондолы двигателя тонкими поверхностями [3, 4], что не дает возможности рассчитывать подсосывающую силу на носовой части воздухозаборника, донное сопротивление мотогондолы и их влияние на остальные части ЛА. Поэтому разработка метода расчета телесных мотогондол является весьма актуальной. Моделирование телесной мотогондолы проводилось в работе [5], однако использование одного активного сечения для моделирования работы реактивного двигателя не позволило получить полную физическую картину обтекания мотогондолы с работающим реактивным двигателем. Целью данной статьи является разработка численного метода расчета обтекания телесной мотогондолы с учетом реактивной струи от двигателя. Для повышения точности определения параметров течения около мотогондолы

работа двигателя моделируется двумя активными сечениями.

Рассмотрим обтекание несжимаемым идеальным газом телесной мотогондолы (рис. 1) с двумя активными сечениями в проточной части,

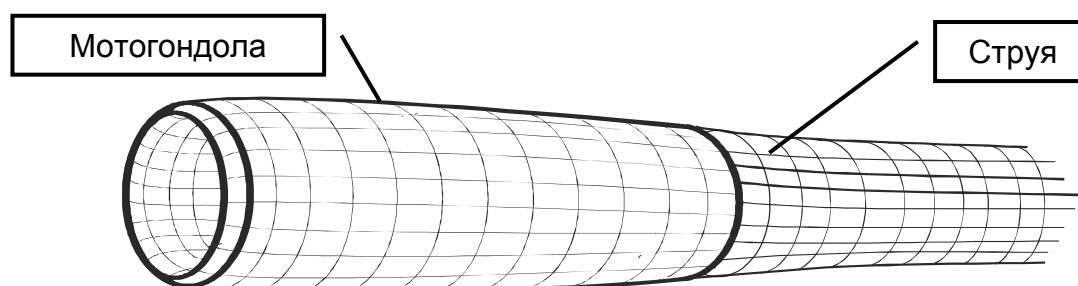


Рисунок 1 – Геометрическое представление мотогондолы и струи

которые разделяют всю область течения на две подобласти А и С (рис. 2) с разными значениями полного давления P_0 и плотности ρ . Считаются известными: тяга двигателя R , полная температура газа в области С (рис. 2) T_{0C} , скорость набегающего потока V_∞ и высота полета H . Требуется определить параметры течения около мотогондолы в струе и вне струи.

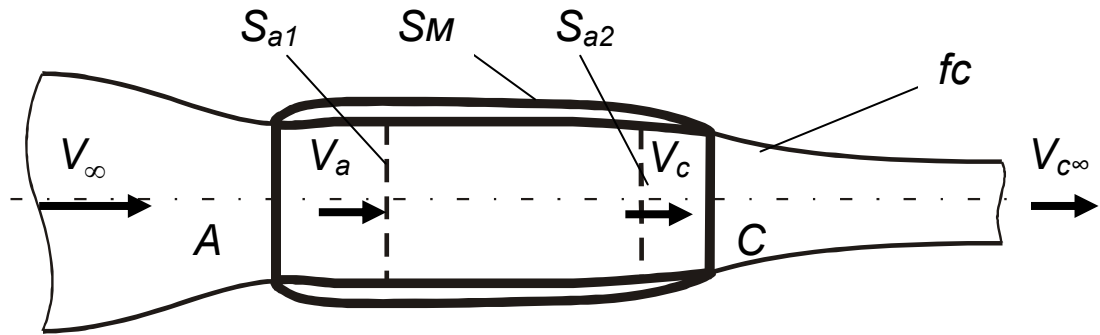


Рисунок 2 – Схема моделирования работы двигателя

В каждой подобласти А и С удовлетворяется уравнение Лапласа для возмущенного потенциала

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0. \quad (1)$$

Уравнение Лапласа для внешней задачи Неймана решаем при следующих граничных условиях:

- на поверхности S_i выполняется условия непротекания

$$(\nabla \varphi + \vec{V}_\infty) \vec{n} = 0, \quad (x, y, z) \in S_i;$$

- на бесконечном удалении от поверхности и его следа жидкость находится в состоянии покоя, поэтому

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \nabla \varphi = 0, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2};$$

- при переходе через поверхности тангенциального разрыва скорости f_i (поверхность пелены) должно соблюдаться условие непрерывности давления и нормальной составляющей скорости

$$p_+ = p_-, \quad (\nabla \varphi \cdot \vec{n})_+ = (\nabla \varphi \cdot \vec{n})_- \quad (x, y, z) \in f_i;$$

- на острых краях L_i поверхностей S_i выполняется условие Чаплыгина – Жуковского о конечности скорости

$$p_+ = p_-, \quad (\nabla \varphi \cdot \vec{n})_+ = (\nabla \varphi \cdot \vec{n})_- \quad (x, y, z) \in L_i.$$

Особенностью расчета параметров невязкого газа является учет влияния струи от реактивного двигателя.

Возмущенный потенциал применительно к решению поставленной задачи можно представить в виде

$$\begin{aligned} \varphi(x, y, z) = & -E \int_{S_M} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial n} - \varphi \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r} \right) dS_M + \\ & + E \int_{S_{a1}} \left[\frac{1}{r} \frac{\dot{m}}{\rho_c S_{a1}} - \varphi \frac{d}{dn} \left(\frac{1}{r} \right) \right] dS_{a1} + \int_{S_{a2}} \left[\frac{1}{r} \frac{d\Delta\varphi_{a2}}{dn} - \varphi \frac{d}{dn} \left(\frac{1}{r} \right) \right] dS_{a2} + (2) \\ & + E \int_{f_c} \Delta\varphi_c \frac{d}{dn} \left(\frac{1}{r} \right) df_c, \end{aligned}$$

где \dot{m} – массовый расход через первое активное сечение; S_{a1} – поверхность первого активного сечения; S_{a2} – поверхность второго активного сечения; S_M – поверхность мотогондолы; f_c – поверхность струи.

Первое слагаемое уравнения (2) является интегралом по поверхности мотогондолы. Значение источника запишем, используя условие непротекания на этих поверхностях

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = \frac{\partial \varphi}{\partial x} n_x + \frac{\partial \varphi}{\partial y} n_y + \frac{\partial \varphi}{\partial z} n_z = -\vec{V}_\infty \cdot \vec{n},$$

где \vec{V}_∞ – скорость набегающего потока.

Второе слагаемое уравнения (2) представляет собой интеграл по поверхности первого активного сечения, которое моделируется слоем диполей. Интенсивность диполей определяется исходя из выполнения условия сохранения массы воздуха, проходящего через контур двигателя.

Третье слагаемое представляет собой интеграл по поверхности второго активного сечения, которое моделируется слоем источников. На этой поверхности формируется перепад полных давлений, температуры и нормальной скорости.

Для второго активного сечения из уравнения импульсов для потока идеальной сжимаемой жидкости следует выражение тяги двигателя [6, 7]

$$\vec{R} = \int_{S_{a2}} (\rho \vec{n} + \rho \vec{V} \cdot V_n) dS. \quad (3)$$

Если сделать допущение, что $\vec{V} = |\vec{V}| \cdot \vec{n}$, то уравнение (3) можно представить в виде

$$R = (\rho_c - \rho_a) S_{a2} + (\rho_c V_c^2 - \rho_a V_a^2) S_{a2}, \quad (4)$$

где p_c, V_c, ρ_c – соответственно статическое давление, скорость и плотность в области С;

p_a, V_a, ρ_a – статическое давление, скорость и плотность в области А;

S_{a2} – площадь внутреннего канала мотогондолы в области второго активного сечения.

Применив уравнение Бернулли, выразим статическое давление p_c и p_a через полные давления p_{0c} и p_{0a} :

$$p_c = p_{0c} - \frac{\rho_c V_c^2}{2}, \quad p_a = p_{0a} - \frac{\rho_a V_a^2}{2}.$$

Используя уравнение неразрывности $\rho_a V_a = \rho_c V_c$, выражение (4) можно записать следующим образом:

$$R = (p_{0c} - p_{0a})S_{a2} + \frac{\dot{m}}{2}(V_c - V_a), \quad (5)$$

где \dot{m} – массовый расход через активное сечение

$$\dot{m} = \rho_a V_a S_{a2}. \quad (6)$$

Полные давления в области А и С (рис. 2) можно так:

$$p_{0c} = p_\infty + \frac{\rho_c V_1^2}{2}, \quad p_{0a} = p_\infty + \frac{\rho_\infty V_\infty^2}{2}.$$

Тогда

$$R = \left(\frac{\rho_c V_1^2}{2} - \frac{\rho_\infty V_\infty^2}{2} \right) S_a + \frac{\dot{m}}{2}(V_c - V_a), \quad (7)$$

где V_1 – скорость на срезе сопла (рис. 2).

Используя уравнение массового расхода, представим скорость V_1 в виде

$$V_1 = \frac{\dot{m}}{\rho_c S_1}. \quad (8)$$

Подставив выражение (8) в выражение (7) и используя уравнение постоянства массового расхода, запишем

$$R + \frac{\rho_\infty V_\infty^2 S_a}{2} = \dot{m}^2 \left(\frac{S_a}{2\rho_c S_1^2} + \frac{1 - \frac{\rho_c}{\rho_\infty}}{2\rho_c S_a} \right). \quad (9)$$

Из этого выражения следует

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{R+B}{A}},$$

где $A = \left(\frac{S_a}{2\rho_c S_1^2} + \frac{1 - \frac{\rho_c}{\rho_\infty}}{2\rho_c S_a} \right)$, $B = \frac{\rho_\infty V_\infty^2 S_a}{2}$.

Из выражения (9) можно определить массовый расход через канал двигателя, но для этого необходимо определить плотность в области С. Для определения ρ_c необходимо знать статическую температуру T_c .

Для определения трех неизвестных (\dot{m}, T_c, ρ_c) необходимо решить систему нелинейных уравнений, состоящую из уравнения (9), выражения полной температуры

$$T_{0c} = T_c + \frac{k-1}{k} \frac{V_1^2}{R_{II}} \quad (10)$$

и выражения, описывающее изобарический процесс

$$\frac{\rho_\infty}{\rho_c} = \frac{T_c}{T_\infty}, \quad (11)$$

где k – показатель изэнтропы, R_{II} – универсальная газовая постоянная. Принимая во внимание выражение (8), запишем уравнение (10) как

$$T_{0c} = T_c + \frac{k-1}{k} \frac{\dot{m}^2}{R_{II} \rho_c^2 S_c^2}. \quad (12)$$

Решение этой системы уравнений находим итерационным путем.

Сначала задаем $T_c = T_{0c}$ и определяем значение ρ_c и \dot{m} из уравнения (10) и (9). Из уравнения (12) уточняем значение T_c и определяем новые значения ρ_c и \dot{m} . Так, в результате нескольких итераций получаем значения \dot{m}, T_c, ρ_c с необходимым приближением. Из этих выражений определим интенсивность источника на втором активном сечении

$$\frac{d\Delta\varphi_a}{dn} = V_c - V_a = \left(\frac{\dot{m}}{\rho_c S_{a2}} - \frac{\dot{m}}{\rho_\infty S_{a2}} \right). \quad (13)$$

Полное давление в области С найдем следующим образом

$$P_{0c} = P_\infty + \frac{\rho_c V_1^2}{2} = P_\infty + \frac{\dot{m}^2}{\rho_c S_1^2}. \quad (14)$$

Четвертое слагаемое уравнения (2) представляет собой интеграл по поверхности струи. Используя граничные условия об отсутствии пе-

репада статического давления в области А и С, и выполняя кинематическое условия совместности течения на границе раздела двух сред, определяем распределение момента диполей по поверхности струи f_c (рис. 2).

Пользуясь формулой тяги [5], можно записать

$$R = \dot{m}(V_{c\infty} - V_\infty) = \dot{m} \left(\frac{d\varphi_c}{dl} - \frac{d\varphi_\infty}{dl} \right) = \dot{m} \frac{d\Delta\varphi}{dl}, \quad (15)$$

тогда распределение момента диполей по поверхности струи f_c выразим в следующем виде [5]:

$$\Delta\varphi_C = \Delta\varphi_0 + \frac{R}{\dot{m}} L. \quad (16)$$

Здесь L – расстояние от среза сопла; $\Delta\varphi_0$ – разность потенциалов на срезе сопла.

Геометрическое положение поверхности струи определяем из уравнения

$$V_x \frac{\partial f_c}{\partial x} + V_y \frac{\partial f_c}{\partial y} + V_z \frac{\partial f_c}{\partial z} = 0,$$

которое получено из условия, что поверхность струи образована линиями тока. Уравнения (2) решаем панельным методом Марино [8].

Для определения работоспособности представленного метода был проведен расчет и сравнение с экспериментальными данными [1] передней части мотогондолы. На рис. 3 показаны распределения коэффициента давления по передней части мотогондолы, полученные

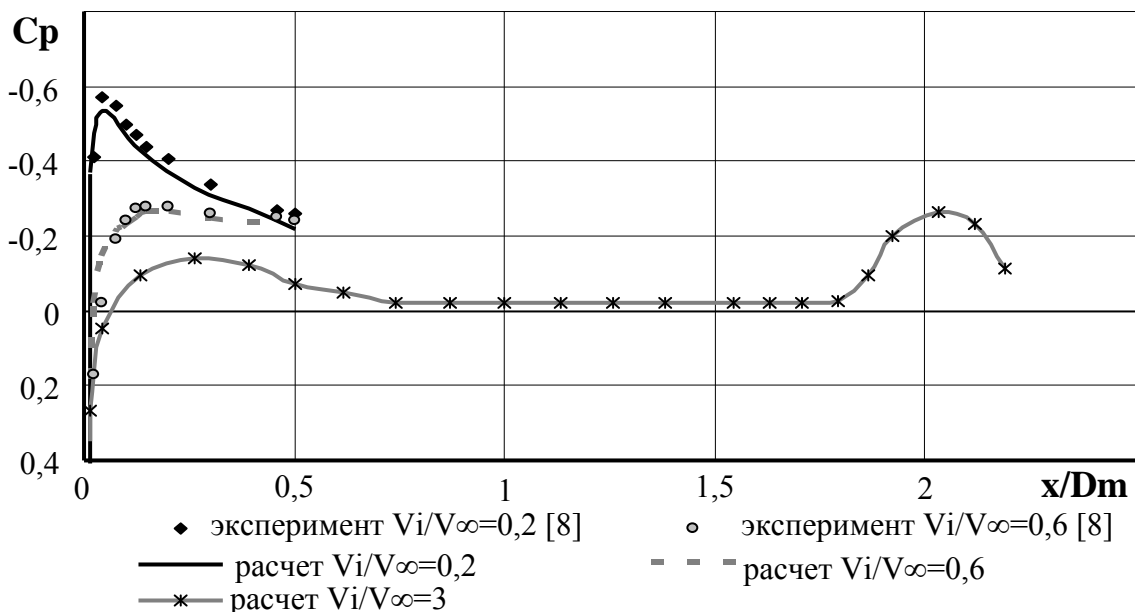


Рисунок 3 – Распределение коэффициента давления по передней и кормовой частям мотогондолы

для нескольких значений отношения скорости на входе в мотогондолу к скорости невозмущенного потока $\frac{V_i}{V_\infty} = 0,2$; $\frac{V_i}{V_\infty} = 0,6$; $\frac{V_i}{V_\infty} = 3$.

Полученные результаты позволяют судить о работоспособности разработанного метода.

Таким образом, разработан численный метод расчета параметров течения около телесной мотогондолы с работающим двигателем и влиянием реактивной струи. В качестве исходных данных берем: тягу двигателя, полную температуру на выходе двигателя, скорость и высоту полета ЛА.

Метод позволяет при расчете компоновки летательного аппарата одним из элементов, которой является мотогондола с имитацией работы двигателя и с учетом реактивной струи, получить более точную картину обтекания ЛА.

Список использованных источников

1. Кюхеман, Д. Аэродинамика авиационных двигателей [Текст] / Д. Кюхеман, И. Вебер. – М. : Изд. иностр. Литература, 1956. – 388 с.
2. Борисенко, А.И. Газовая динамика двигателей [Текст] / А.И. Борисенко. – М.: Оборон гиз. 1962. – 793 с.
3. Гайденок, В.И. Метод расчета стационарного и нестационарного обтекания летательного аппарата с работающей силовой установкой [Текст] / В.И. Гайденок, В.В. Гуляев, А.А. Колчанов. – М. : Труды ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, вып. 1313, 1986. – 58 с.
4. Тихонов, А.Н. Уравнение математической физики [Текст] / А.Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М. : Изд-во МГУ, 1999. – 798 с.
5. Лебедь, В.Г. Метод расчета обтекания дозвуковым потоком телесных мотогондол с учетом струи двигателя [Текст] / В.Г. Лебедь, А.Л. Сушко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сбор. науч. тру..– Х. : НАКУ «ХАИ», Вып. 34(2), 2002 – С. 23 – 30.
6. Михлин, С. Г. Курс математической физики [Текст] / С.Г. Михлин. – М. : Наука., 1968. – 575 с.
7. Седов, Л.И. Механика сплошной среды [Текст] / Л.И. Седов. – М. : Том 2. 1983. – 573 с.
8. Марино, П. Аэродинамика тел сложной формы в дозвуковом и сверхзвуковом потоках при стационарном и колебательных режимах течения [Текст] / П. Марино, Л. Чжень, Е. О. Сусью // Ракетная техника и космонавтика. – Т. 13, № 3, 1975. – С. 54 – 60.

Поступила в редакцию 18.11.2013.

Рецензент: д-р техн. наук, ст. науч. сотр. В.И. Сливинский, УкрНИИТМ, г. Днепрпетровск.