

Вопросы аэродинамики летательных аппаратов

ББК 39.52

Базов Т.Х., Жучков И.А., Кулашев М.Ф., Косой В.А., Лежнев М.В., Рябухин М.И.

РАСЧЕТ ТЕЧЕНИЯ ВНЕ ТУРБУЛЕНТНОЙ ОБЛАСТИ ПЛОСКОЙ СВОБОДНОЙ СТРУИ В СПУТНОМ ПОТОКЕ МЕТОДОМ НАЛОЖЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ

Вследствие эжектирующего действия турбулентных струй в окружающем их пространстве возникают вторичные потенциальные течения, знание которых необходимо при решении ряда практических задач [1]. В то же время эти течения поддаются теоретическим исследованиям с применением относительно несложного математического аппарата. Последнее обстоятельство делает их весьма заманчивыми как объект для демонстрации различных аэродинамических процессов при преподавании курса аэродинамики студентам и курсантам авиационных вузов.

При решении подобных задач применяются различные методы. Так, в работе [1] широко используется метод интегральных соотношений, а для исследования взаимодействия струи со спутным потоком применен метод "фиктивного стока", при котором спутный поток заменяется стоком, распределенным вдоль оси струи.

Такой метод требует развитого абстрактного мышления и не пригоден для преподавания студентам и курсантам, у которых этот способ мышления еще недостаточно развит.

В то же время, вторичное течение вне турбулентной области струи можно представить как результат суммирования двух потенциальных потоков, а именно, потока, вызванного эжектирующим действием затопленной струи (т.е. струи, истекающей в неподвижное пространство), и равномерного спутного потока.

На рис. 1 показана картина взаимодействия свободной струи со спутным потоком, полученная в камере для визуализации обтекания тел плоским потоком жидкости [2], воспроизведенной на кафедре аэродинамики и динамики полета Краснодарского военного авиационного института.

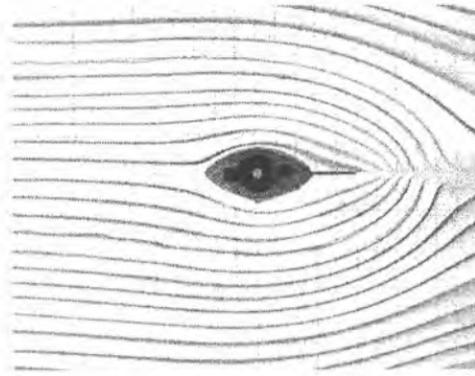


Рис. 1. Фотография взаимодействия свободной струи со спутным потоком.

При решении задачи расчета потенциального течения, индуцированного плоской свободной струей, предлагается применить метод наложения потенциальных потоков [3].

В полярной системе координат функцию тока суммарного потока можно представить в виде:

$$\psi = \psi_0 + v_\infty r \sin \theta, \quad (1)$$

где ψ — функция тока суммарного потока, v_∞ — скорость спутного потока, r — полярный радиус, θ — полярный угол, ψ_0 — функция тока вне турбулентной области плоской затопленной струи.

В работе [4] функция ψ_0 представлена в безразмерной форме в виде:

$$\bar{\psi}_0 = -0,526 \frac{\sqrt{r} \sin \theta_0}{\cos \frac{\theta_0}{2}} \cos \frac{\theta}{2}, \quad (2)$$

где $\psi_0 = \frac{\psi}{U_0 h_c}$, $r = \frac{r}{h_c}$, h_c — высота сопла, θ_0 — угол полураствора струи.

С учетом (2) выражение (1) примет вид:

$$\bar{\psi} = -0,526 \frac{\sqrt{r} \sin \theta_0}{\cos \frac{\theta_0}{2}} \cos \frac{\theta}{2} + m \bar{r} \sin \theta, \quad (3)$$

где $m = \frac{v_\infty}{U_0}$ — параметр спутности, U_0 — скорость истечения струи.

Принимая $r^2 = x$, выражение (3) перепишем в виде уравнения:

$$ax^2 + bx + c = 0. \quad (4)$$

Решая его, находим линию тока суммарного потока:

$$\bar{r}_1 = \left(\frac{-b + \sqrt{b^2 + 4ac}}{2a} \right)^2, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} a &= m \sin \theta, \\ b &= 0,526 \frac{\sqrt{\sin \theta_0}}{\cos \frac{\theta_0}{2}} \cos \frac{\theta}{2}, \\ c &= \psi. \end{aligned} \quad (6)$$

Для построения поля скоростей воспользуемся связью между линией тока и потенциалом потока:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \theta} = - \frac{\partial \psi}{\partial r}. \quad (7)$$

Учитывая, что

$$\bar{\psi} = -A \cdot \bar{r}^{\frac{1}{2}} \cos \frac{\theta}{2} + m \bar{r} \sin \theta, \quad (8)$$

находим

$$\bar{\varphi} = A \cdot \bar{r}^{\frac{1}{2}} \sin \frac{\theta}{2} + m \cos \theta + c, \quad (9)$$

где

$$A = 0,526 \frac{\sqrt{\sin \theta_0}}{\cos \frac{\theta_0}{2}}. \quad (10)$$

Постоянную c находим из условия $\varphi = 0$ при $\theta = \pi$. Тогда $c = m$.

Находим полярный радиус эквипотенциальной линии:

$$\bar{r}_2 = \frac{[\bar{\varphi} - m(\cos \theta + 1)]^2}{A^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}} \quad (11)$$

или

$$\bar{r}_2 = \frac{2}{A^2} \cdot \frac{[\bar{\varphi} - m(1 + \cos \theta)]^2}{1 - \cos \theta}. \quad (12)$$

При $m = 0$ получим уравнение эквипотенциальной линии потока, индуцированного затопленной струей [4].

Для перехода к декартовой системе координат следует воспользоваться формулами перехода:

$$\bar{x}_{1,2} = \bar{r}_{1,2} \cos \theta; \quad y_{1,2} = \bar{r}_{1,2} \sin \theta. \quad (13)$$

Для построения картины течения необходимо и достаточно знать угол полураствора струи θ_0 . В работе [1] для предварительных расчетов рекомендовано принимать $\theta_0 = 11,5^\circ$.

На рисунках 2-5 показаны картины течения вне турбулентной области плоской свободной струи при различных значениях параметра сплутности m по мере его возрастания.

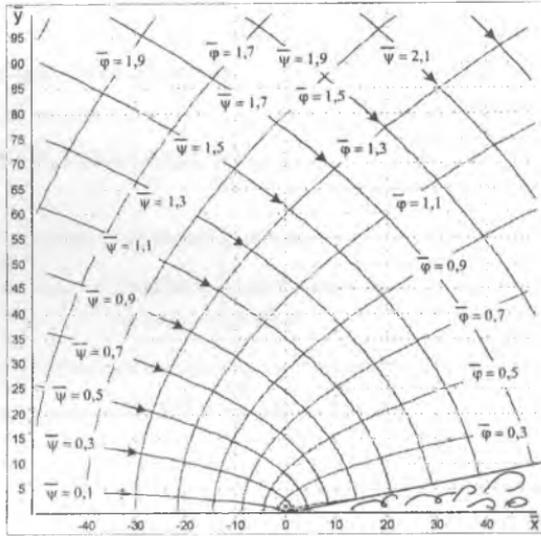


Рис. 2. Линии тока и эквипотенциальные линии при $m_{\kappa} = 0,003$

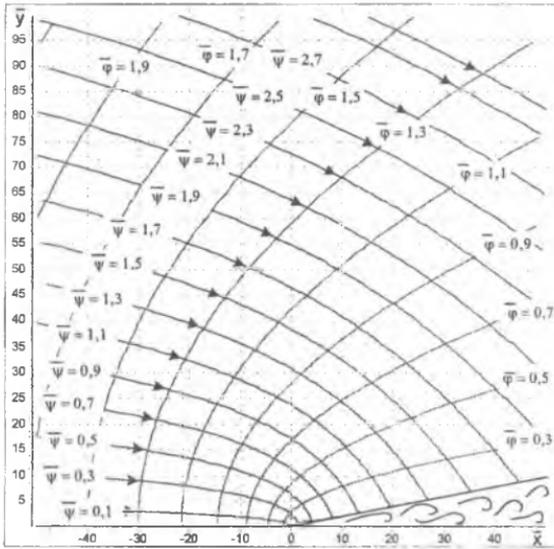


Рис. 3. Линии тока и эквипотенциальные линии при $m_k = 0,012$

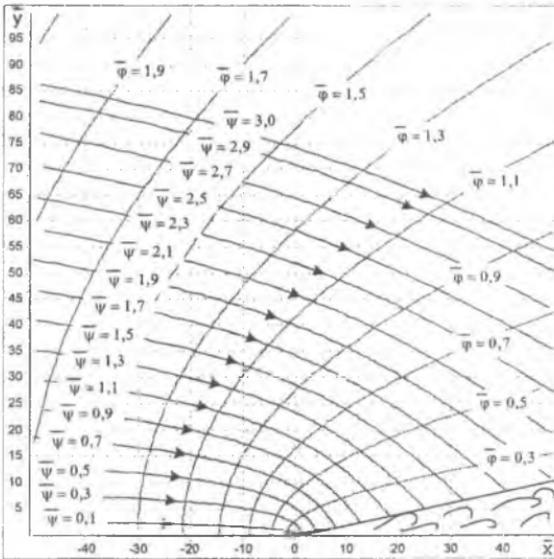


Рис. 4. Линии тока и эквипотенциальные линии при $m_k = 0,021$

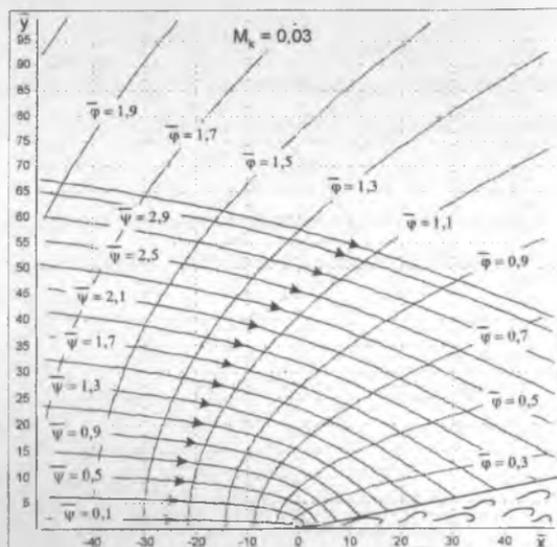


Рис. 5. Линии тока и эквипотенциальные линии при $m_k = 0,03$

Анализ показывает, что с увеличением параметра спутности m , т.е. с увеличением скорости спутного потока U_∞ , эжектирующее влияние струи уменьшается.

Качественно картины течения, представленные на рисунках, соответствуют картине течения, показанной на фотографии (рис. 1) в [4].

Библиографический список

1. Гиневский А.С. Теория турбулентных струй и следов. М., Машиностроение, 1969.
2. Кулашев М.Ф., Шахов В.Г. Чапаев В.Ф. Камера для визуализации обтекания тел плоским потоком жидкости. Авторское свидетельство СССР №726 456.
3. Бондарев Е.Н., Дубасов В.Т. и др. Аэрогидромеханика: Учебник для студентов высших учебных заведений. М., Машиностроение, 1993.
4. Кулашев М.Ф., Базоев Т.Х., Коссой В.А. Применение компьютерной технологии на примере расчета течения жидкости вне турбулентной области плоской и осесимметричной затопленных струй. Материалы первой межвузовской научно-методической конференции "Электромеханические преобразователи энергии "ЭМПЭ-02". Краснодар, КВАИ, 2002, с. 205-208.