Трёхмерные осесимметричные потенциальные течения идеальной жидкости

Верещагин Антон Сергеевич
канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель

Кафедра аэрофизики и газовой динамики ФФ НГУ

1 февраля 2019 г.

Аннотация

Основные определения

Определение
Течение называется осесимметричным, если существует такая прямая l, что во всех плоскостях, проходящих через l картина течения одинакова и траектория жидкой частицы лежит в полуплоскостях, проходящих через l.

Определение
Течение называется потенциальным, если в некоторой области пространства можно определить потенциал $\varphi(t, x, y, z)$, такой что

$$\vec{v} = \operatorname{grad} \varphi.$$

Основные уравнения

Для трёхмерных потенциальных течений идеальной жидкости определённых в некоторой области пространства справедливы следующие уравнения.

Уравнение неразрывности

$$\operatorname{div}\vec{v} = \Delta\varphi = 0, \quad \vec{v} = \nabla\varphi$$

Интеграл Коши

$$\frac{\nabla\varphi^2}{2} + \frac{p}{\rho} = f(t)^1$$

Интеграл Коши позволяет найти распределение давления по заданному потенциалу, определённому из уравнения неразрывности ($\rho = const$).

[1] Считаем, что поле внешних сил отстутствует

Уравнение неразрывности в различных системах координат

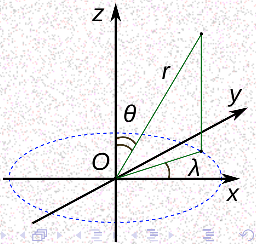
Сферическая система координат r, θ, λ

$$\frac{1}{r^2\sin\theta}\left\{\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\sin\theta\frac{\partial\varphi}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\varphi}{\partial\theta}\right)+\frac{\partial}{\partial\lambda}\left(\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial\varphi}{\partial\lambda}\right)\right\}=0,$$

где

$$v_r=\frac{\partial\varphi}{\partial r},\quad v_\theta=\frac{1}{r}\frac{\partial\varphi}{\partial\theta},\quad v_\lambda=\frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial\varphi}{\partial\lambda}.$$

В случае осесимметричного течения можно пренебречь зависимостью φ от λ.



Уравнение неразрывности в различных системах координат

Цилиндрическая система координат r, θ, z

$$\frac{1}{r}\left\{\frac{\partial}{\partial r}(rv_r) + \frac{\partial}{\partial \theta}v_\theta + \frac{\partial}{\partial \lambda}(rv_z)\right\} = 0,$$

где

$$v_r = \frac{\partial \varphi}{\partial r}, \quad v_\theta = \frac{1}{r}\frac{\partial \varphi}{\partial \theta}, \quad v_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z}.$$

В случае осесимметричного течения вдоль оси Oz можно пренебречь зависимостью φ от θ.

Источник в пространстве

Сферически симметричное течение

$$\varphi = \varphi(r) \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 \frac{d\varphi}{dr}\right) = 0.$$

Источник в пространстве

Сферически симметричное течение

$$\varphi = \varphi(r) \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 \frac{d\varphi}{dr}\right) = 0.$$

Потенциал источника, расположенного в точке с координатами (a, b, c)

$$\varphi(x, y, z) = -\frac{q}{4\pi\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2}}.$$

Источник в пространстве

Сферически симметричное течение

$$\varphi = \varphi(r) \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 \frac{d\varphi}{dr}\right) = 0.$$

Потенциал источника, расположенного в точке с координатами (a, b, c)

$$\varphi(x, y, z) = -\frac{q}{4\pi\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2}}.$$

Расход жидкости через любую поверхность, охватывающую центр источника S

$$q = \int\limits_S v_n dS = \int\limits_S \frac{\partial\varphi}{\partial n} dS.$$

Потенциал

Рассмотрим источник и сток одной и той же обильности q, находящиеся на оси Oz на расстоянии l друг от друга. Тогда их суммарный потенциал будет иметь вид

$$\varphi = -\frac{q}{4\pi\sqrt{x^2 + y^2 + (z - l/2)^2}} + \frac{q}{4\pi\sqrt{x^2 + y^2 + (z + l/2)^2}}.$$

Диполь в пространстве

Потенциал

Рассмотрим источник и сток одной и той же обильности q, находящиеся на оси Oz на расстоянии l друг от друга. Тогда их суммарный потенциал будет иметь вид

$$\varphi = -\frac{q}{4\pi\sqrt{x^2+y^2+(z-l/2)^2}} + \frac{q}{4\pi\sqrt{x^2+y^2+(z+l/2)^2}}.$$

При переходе к пределу при $l \to 0$, а $q \to \infty$, причём $ql = M$, получится предельный потенциал

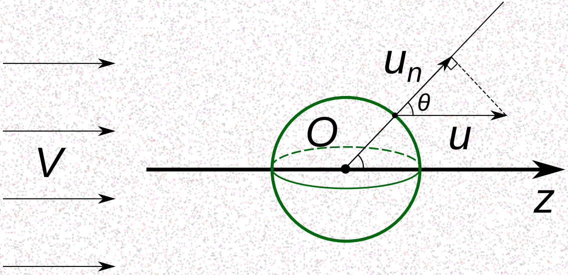
$$\varphi = -\frac{Mz}{4\pi r^3} \quad \text{или} \quad \varphi = -\frac{M}{4\pi}\frac{\partial}{\partial l}\left(\frac{1}{r}\right),$$

где M – момент диполя; l – направление оси диполя.

Обтекание сферы

Постановка

Требуется найти распределение скорости и давления при потенциальном обтекании сферы радиуса R, движущейся поступательно вдоль оси Oz со скоростью u, в потоке идеальной жидкости, имеющей на бесконечности скорость V, направленную вдоль оси Oz, и давление p_∞.



Математическая постановка

Основные уравнения

В сферической системе координат пренебрегаем зависимостью от λ. Тогда для функции $\varphi = \varphi(r, \theta)$ запишем уравнение неразрывности

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 \sin\theta \frac{\partial \varphi}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial \theta}\left(\sin\theta \frac{\partial \varphi}{\partial \theta}\right) = 0.$$

Граничные условия на сфере

$$v_n = \left.\frac{\partial \varphi}{\partial n}\right|_{r=R} = u\cos\theta.$$

Граничные условия на бесконечности

$$v_r = \left.\frac{\partial \varphi}{\partial r}\right|_{r\to\infty} = V\cos\theta, \quad v_\theta = \frac{1}{r}\left.\frac{\partial \varphi}{\partial \theta}\right|_{r\to\infty} = -V\sin\theta.$$

Решение задачи об обтекании сферы

Упрощение

Пусть $\varphi(r,\theta) = Q(r)\cos\theta$, тогда уравнение неразрывности будет иметь вид

$$r^2\frac{d^2Q}{dr^2} + 2r\frac{dQ}{dr} - 2Q = 0.$$

Аналитическое решение

$$\varphi(r,\theta) = \left(Vr + \frac{V-u}{2}\frac{R^3}{r^2}\right)\cos\theta,$$

которое можно переписать в виде

$$\varphi = Vz - \frac{R^3}{2}(V-u)\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{1}{r}\right).$$

Видно, это сумма потенциала поступательного движения потока со скоростью V и потенциала диполя с моментом $M = 2\pi R^3(u-V)$.

Обтекание покоящейся сферы

Если $u = 0$, тогда

$$\varphi = V\left(r + \frac{1}{2}\frac{R^3}{r^2}\right)\cos\theta$$

и

$$v_r = V\left(1 - \frac{R^3}{r^3}\right)\cos\theta, \quad v_\theta = -V\left(1 + \frac{R^3}{2r^3}\right)\sin\theta.$$

Максимальное значение скорости на поверхности сферы достигается в точках $\theta = \pm\pi/2$ и равно $3/2V$.

Парадокс Даламбера для покоящейся сферы

Интеграл Бернулли

Так как течение потенциально и стационарно, то

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} = \frac{V^2}{2} + \frac{p_\infty}{\rho}$$

Выражение для давления

$$\frac{p - p_\infty}{\rho} = \frac{V^2}{2}\left(1 - \frac{9}{4}\sin^2\theta\right)$$

Суммарная сила, вызванная давлением потенциального течения жидкости на покоящуюся сферу, равна 0, вследствие симметрии распределения сил давления. Это называется парадоксом Даламбера.

Функция тока для осесимметричных течений

Уравнение неразрывности в цилиндрической системе координат с осевой симметрией в переменных (r, z)

$$\operatorname{div} \vec{v} = \frac{\partial}{\partial r}(r v_r) + \frac{\partial}{\partial z}(r v_z) = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial}{\partial r}(r v_r) = -\frac{\partial}{\partial z}(r v_z).$$

Существование полного дифференциала

$$d\psi = r v_r dz - r v_z dr = \frac{\partial \psi}{\partial z} dz + \frac{\partial \psi}{\partial r} dr$$

является полным дифференциалом (см. теорию про интегрирующий множитель).

Определение

Функцию $\psi(r, z)$ такую, что $v_r = \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial \psi}{\partial z}$, $v_z = -\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial \psi}{\partial r}$ называют функцией тока для осесимметричных течений.

Свойства функции тока

Постоянство на линиях тока

Уравнения линий тока в случае осесимметричного течения

$$\frac{dr}{v_r} = \frac{dz}{v_z},$$

поэтому на линиях тока

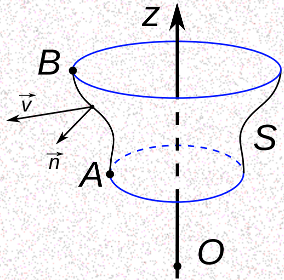
$$v_r dz - v_z dr = 0,$$

следовательно

$$d\psi = r(v_r dz - v_z dr) = 0$$

и $\psi = const$.

Свойства функции тока



Поток жидкости через поверхность S

$$\int\limits_S \vec{v}\cdot\vec{n}ds = \int\limits_0^{2\pi}\int\limits_B^A (v_z n_z + v_r n_r)\, rd\theta dl =$$

$$= 2\pi\int\limits_0^{l_0}\left(\left(-\frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial r}\right)\left(-\frac{\partial r}{\partial l}\right) + \frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial l}\right) rdl =$$

$$= 2\pi\int\limits_0^{s_0}\frac{d}{dl}\psi(r(l), z(l))dl = 2\pi(\psi(A) - \psi(B)),$$

$$r = r(l), \quad z = z(l),$$

$$(r, z)|_{l=0} = B, \quad (r, z)|_{l=l_0} = A.$$

Связь функции тока и потенциала для осесимметричных течений

Соотношения

$$\frac{\partial\varphi}{\partial r} = \frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial z}, \qquad \frac{\partial\varphi}{\partial z} = -\frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial r}$$

Полученные соотношения отличаются от условий Коши-Римана.

Связь функции тока и потенциала для осесимметричных течений

Соотношения

$$\frac{\partial\varphi}{\partial r} = \frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial z}, \qquad \frac{\partial\varphi}{\partial z} = -\frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial r}$$

Полученные соотношения отличаются от условий Коши-Римана.

Уравнение для функции тока

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2} - \frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial r} = 0$$

Полученное соотношение не является уравнением Лапласа, записанным в цилиндрической системе координат. В случае осесимметричных течений не работают методы ТФКП. В этом случае может быть применён метод источников и стоков.

Связь между функций тока и потенциалом

Предпосылки

$$d\psi = \frac{\partial\psi}{\partial r}dr + \frac{\partial\psi}{\partial z}dz = -r\left(\frac{\partial\varphi}{\partial z}dr - \frac{\partial\varphi}{\partial r}dz\right),$$

$$d\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial r}dr + \frac{\partial\varphi}{\partial z}dz = \frac{1}{r}\left(\frac{\partial\psi}{\partial z}dr - \frac{\partial\psi}{\partial r}dz\right),$$

Искомые соотношения

$$\psi(r,z) = \psi(r_0,z_0) + \int\limits_{r_0,z_0}^{r,z} r\left(\frac{\partial\varphi}{\partial r}dz - \frac{\partial\varphi}{\partial z}dr\right),$$

$$\varphi(r,z) = \varphi(r_0,z_0) + \int\limits_{r_0,z_0}^{r,z} \frac{1}{r}\left(\frac{\partial\psi}{\partial z}dr - \frac{\partial\psi}{\partial r}dz\right).$$

Функция тока для простейших осесимметричных течений

Поступательное движение

$$\varphi = Vz \quad \Rightarrow \quad \psi = -\frac{V^2}{2} r^2$$

Источник

$$\varphi = -\frac{q}{4\pi}\frac{1}{r^2+z^2} \quad \Rightarrow \quad \psi = \frac{q}{4\pi}\frac{z}{\sqrt{r^2+z^2}} + C$$

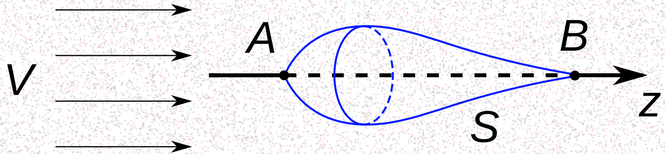
Диполь

$$\varphi = -\frac{M}{4\pi}\frac{z}{r^3} \quad \Rightarrow \quad \psi = -\frac{M}{4\pi}\frac{r^2}{(\sqrt{r^2+z^2})^3} + C$$

Продольное обтекание тела вращения

Постановка задачи

Требуется найти потенциал или функцию тока течения, описывающие осесимметричное течение идеальной жидкости на бесконечности направленной вдоль оси Oz около тела, образованного вращением заданной дуги AB вокруг оси Oz.



Продольное обтекание тела вращения

Метод источников и стоков

Рассмотрим на оси Oz распределенные источники и стоки с плотностью распределения $\mu(\zeta)$, где ζ – положении на оси Oz между точками A и B.

Функция тока от источников, распределённых вдоль оси Oz

$$\psi_1(r, z) = -\frac{1}{4\pi} \int\limits_A^B \mu(\zeta) \left(1 - \frac{z - \zeta}{\sqrt{r^2 + (z - \zeta)^2}} \right) d\zeta$$

Функция тока от поступательного потока

$$\psi_2 = -r^2 \frac{V}{2}$$

Продольное обтекание тела вращения

Искомый потенциал для задачи

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 = -r^2\frac{V}{2} + -\frac{1}{4\pi}\int_A^B \mu(\zeta)\left(1 - \frac{z-\zeta}{\sqrt{r^2+(z-\zeta)^2}}\right)d\zeta$$

Продольное обтекание тела вращения

Искомый потенциал для задачи

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 = -r^2 \frac{V}{2} + -\frac{1}{4\pi} \int_A^B \mu(\zeta) \left(1 - \frac{z - \zeta}{\sqrt{r^2 + (z - \zeta)^2}} \right) d\zeta$$

Условие «непроницаемости» тела

$$\int_A^B \mu(\zeta) = 0$$

Продольное обтекание тела вращения

Искомый потенциал для задачи

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 = -r^2\frac{V}{2} + -\frac{1}{4\pi}\int_A^B \mu(\zeta)\left(1 - \frac{z-\zeta}{\sqrt{r^2 + (z-\zeta)^2}}\right)d\zeta$$

Условие «непроницаемости» тела

$$\int_A^B \mu(\zeta) = 0$$

Поверхность тела – поверхность тока

$$\psi|_S = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{4\pi}\int_A^B \frac{(z-\zeta)\mu(\zeta)d\zeta}{\sqrt{\tilde{r}(z)^2 + (z-\zeta)^2}} = \frac{1}{2}V\tilde{r}(z),$$

где $r = \tilde{r}(z)$ – уравнение дуги AB, где z – координата между точками A и B.