

УДК 536.46

© М. М. Горохов, А. В. Корепанов, А. В. Микрюков
**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗОЛИРОВАННОЙ
ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ СФЕРЫ
НА ПЕРЕХОД ЛАМИНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ
В ТУРБУЛЕНТНОЕ**

Ключевые слова: численное моделирование, турбулентное течение, изолированная шероховатость, докритическое число Рейнольдса.

Abstract. Influence of the flow near sphere surface with isolated roughness on turbulence.

§ 1. Математическая модель

В работе [1] на основании данных Визельсбергера показано, что изолированная шероховатость, то есть шероховатость, создаваемая проволокой или другим телом, способствует более раннему переходу ламинарной формы течения в турбулентную. В [1] представлен опыт с обтеканием шара, у которого перед экватором закреплено проволочное кольцо. Действительно «наличие этого кольца вызвало искусственную турбулизацию пограничного слоя уже при умеренном числе Рейнольдса и повлекло за собой такое же понижение сопротивления, как и увеличение числа Рейнольдса при отсутствии кольца» [1]. В работе [2] проводится оценка величины изолированной шероховатости для переходных форм течения. Для наибольшей высоты шероховатости k_{dop} , при которой течение остается ламинарным, справедливо соотношение

$$\frac{u_k^* k_{dop}}{\nu} = 7. \quad (1.1)$$

Для критической высоты шероховатости $k_{кр}$ или наименьшей высоты шероховатости, при которой происходит переход от ламинарной формы течения в пограничном слое в турбулентную принято

$$\frac{u_k^* k_{кр}}{\nu} = 20. \quad (1.2)$$

Для оценки возможности расчета на основании представленной модели переходных процессов под влияние шероховатости проведен аналогичный численный эксперимент.

Введем криволинейную систему координат (ξ, η) и угловую координату φ . Область численного интегрирования имеет цилиндрическую форму (рис. 1.1). Тело вращения размещается внутри области интегрирования таким образом, чтобы оси симметрии области и тела совпадали. Расстояние от поверхности до границ области зависит от числа Рейнольдса. Область интегрирования делится секущими плоскостями σ , ориентированными параллельно направлению вектора скорости набегающего потока. На каждой секущей плоскости определяется ориентация координатных осей и на основании комплексного метода граничных элементов строится ортогональная конечно-разностная сетка.

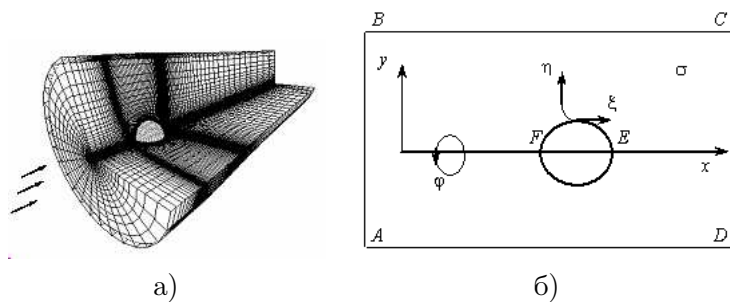


Рис. 1.1: Область интегрирования

Система уравнений вязкого изотермического несжимаемого пространственного течения в системе координат (ξ, η, φ) имеет

вид:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial \xi} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \eta} + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \varphi} = \mathbf{p} + \mathbf{b},$$

$$\mathbf{u} = yJ \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \end{pmatrix}, \mathbf{e} = yJ \begin{pmatrix} \rho U \\ \rho U u - \mu u_\xi \\ \rho U v - \mu v_\xi \\ \rho U w - \mu w_\xi \end{pmatrix}, \mathbf{f} = yJ \begin{pmatrix} \rho V \\ \rho V u - \mu u_\eta \\ \rho V v - \mu v_\eta \\ \rho V w - \mu w_\eta \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{g} = J \begin{pmatrix} \rho w \\ \rho w u - \mu y^{-1} u_\varphi \\ \rho w v - \mu y^{-1} v_\varphi \\ \rho w w - \mu y^{-1} w_\varphi \end{pmatrix}, \mathbf{p} = - \begin{pmatrix} 0 \\ y(p_\xi x_\xi - p_\eta y_\xi) \\ y(p_\xi y_\xi + p_\eta x_\xi) \\ J p_\varphi \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{b} = J \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{\mu w}{y} - 2\frac{\mu w_\varphi}{y} + w^2 & -\frac{\mu w}{y} + 2\frac{\mu v_\varphi}{y} - J v w \end{pmatrix}^T.$$

Здесь T — знак транспонирования матрицы, U, V — контравариантные составляющие проекций скоростей.

Граничные условия: на твердой поверхности (FE) —

$$U = 0, V = k_S \frac{U_\infty}{\sqrt{J}}, w = 0,$$

где k_S — безразмерный коэффициент вдува с поверхности; на входной (AB) и внешних (BC, AD) границах —

$$U = \frac{U_\infty}{\sqrt{J}}, V = 0, w = 0;$$

на выходной границе (CD) —

$$p = p_\infty, \frac{\partial U}{\partial \xi} = \frac{\partial V}{\partial \xi} = \frac{\partial w}{\partial \xi} = 0.$$

Моделирование турбулентного режима течения проводилось на основании использования двухпараметрической модели турбулентности.

§ 2. Результаты численного моделирования

Поскольку значения точного местоположения кольца и число Рейнольдса в [1, 2] не указаны, поэтому параметры при проведении вычислений подбирались. Как показали расчеты, кольцо начинает оказывать влияние на переходные процессы в пограничном слое, если его положение $\theta \geq 85^\circ$. Расчеты проводились при близком к критическому значению числа Рейнольдса $Re = 1,57 \cdot 10^5$, радиус кольца выбирался на основании зависимостей (1.1, 1.2). Критическая высота шероховатости $k_{kr}/d = 3 \cdot 10^{-3}$, удовлетворяющая выражению (1.1), а не оказывает заметного влияния на поведение пограничного слоя. С увеличением значения k_{kr} до величины $k_{kr}/d = 28\nu/u_k^* = 2 \cdot 10^{-2}$ наличие кольца привело к дополнительной турбулизации потока, смещению отрывной зоны вниз по течению (рис. 2.1) и в результате к снижению величины полного сопротивления с величины $C_x = 0,49$ до величины $C_x = 0,36$, что является аналогичным увеличению значения числа Рейнольдса до $Re = 2,3 \cdot 10^5$ в случае отсутствия кольца.

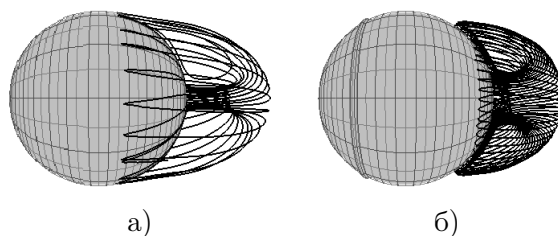


Рис. 2.1: Обтекание сферы при докритическом числе Рейнольдса $Re = 1,57 \cdot 10^5$: а) гладкая сфера; б) сфера с проволоочным кольцом

* * *

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1956. 742 с.
2. Шлихтинг Г. Возникновение турбулентности. М.: Иностран. лит., 1962. 204 с.