

**СРАВНЕНИЕ СТАЦИОНАРНОГО И НЕСТАЦИОНАРНОГО РЕШЕНИЙ
ДЛЯ ЗАДАЧ ОБТЕКАНИЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРОВ
В ПРОГРАММЕ FLOW SIMULATION**

В вычислительном комплексе Flow Simulation задачи механики жидкости и газа решаются с помощью нестационарных уравнений Навье – Стокса [1], которые для несжимаемых сред имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right), \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где u – продольный компонент скорости, м/с; v – поперечный компонент скорости, м/с; p – давление, Па; ρ – плотность, кг/м³; ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с.

Система (1) решается с начальными условиями для момента времени $t = 0$: $u = u_0(x, y)$, $v = v_0(x, y)$, $p = p_0(x, y)$, где u_0 , v_0 , p_0 – заданные функции координат. Граничными условиями являются: 1) условие прилипания на поверхности тел $u = 0$ и $v = 0$ при $y = 0$; 2) условие достаточной удалённости границ от зон возмущения потоком.

В программе при выполнении дискретизации по времени для каждой ячейки расчётной сетки из условия Куранта определяется допустимый максимальный шаг по времени, зависящий от значений физических величин и от шага дискретизации по пространству. При решении нестационарной задачи выбирается минимальный из определённых шагов по времени (по всем ячейкам сетки в расчётной области) и с этим шагом выполняется переход к следующему моменту времени [1]. Метод решения, названный стационарным в программе FlowSimulation, представляет собой итерационный метод [1] с использованием многосеточного метода, где используются решения на вариационных подмножествах узлов и для каждого используется невязка, решение экстраполируется на нулевую величину невязки.

Для сравнения двух методов были использованы задачи по расчёту коэффициента лобового сопротивления тел.

Коэффициент лобового сопротивления вычислялся на основе метода импульсов. Согласно теореме импульсов изменение количества движения равно импульсу силы, действующей на обтекаемое тело [2]. Коэффициент сопротивления определялся формулой [2-4]

$$C_{xa} = \frac{\rho}{q \cdot 2 \cdot b} \int_{y=-\infty}^{y=+\infty} u_1 (u_\infty - u_1) dy,$$

где q – скоростной напор, H/m^2 ; u_∞ – скорость набегающего потока m/c ; u_1 – скорость в сечении следа позади тела, m/c ; b – продольная полуось рассматриваемого тела, m . Сечение в следе позади тела выбиралось отстоящим на $20b$ от задней кромки рассматриваемого тела.

В качестве первого объекта исследования был выбран круглый цилиндр диаметром $d = 2r = 62,5 \text{ мм}$. Расчёт обтекания круглого цилиндра в программе Flow Simulation производился для вязкой несжимаемой жидкости при разных числах Рейнольдса $Re = \rho u d / \mu$, где $\rho = 1,204 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха и $\mu = 1,81 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$ – динамическая вязкость воздуха при температуре $t = 20^\circ \text{ C}$.

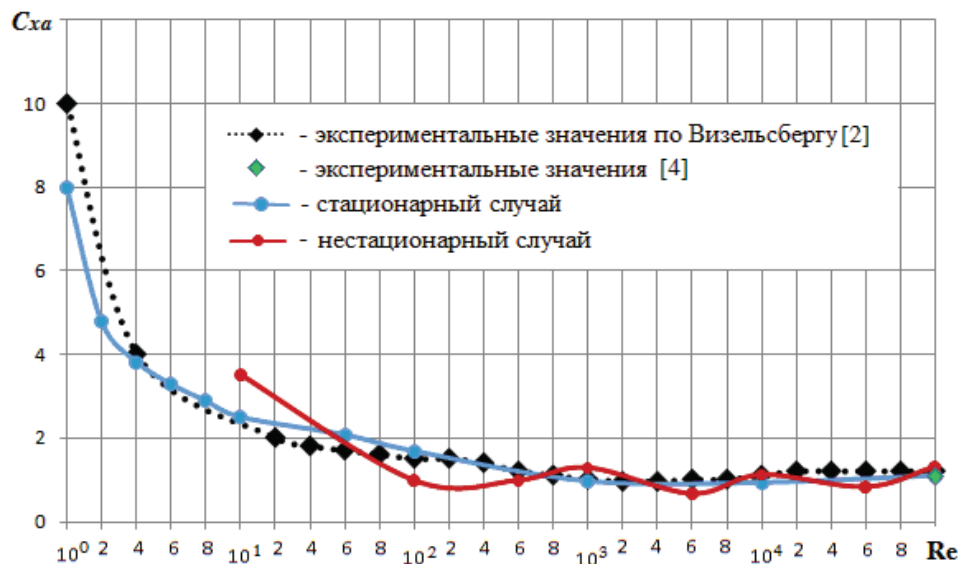


Рис. 1. Сравнение значений коэффициента лобового сопротивления кругового цилиндра от числа Рейнольдса по результатам моделирования с известными экспериментальными данными

На рис. 1 представлены результаты моделирования для стационарного и нестационарного случаев в сравнении с известными экспериментальными данными [2].

Наилучшие совпадения с экспериментальными данными наблюдаются для стационарного случая.

Были рассчитаны коэффициенты лобового сопротивления C_{xa} эллиптических цилиндров с различным соотношением полуосей a/b для числа Рейнольдса $Re=10^5$. Сравнение полученных данных с известными экспериментальными значениями [5] выявило удовлетворительное согласование (рис. 2).

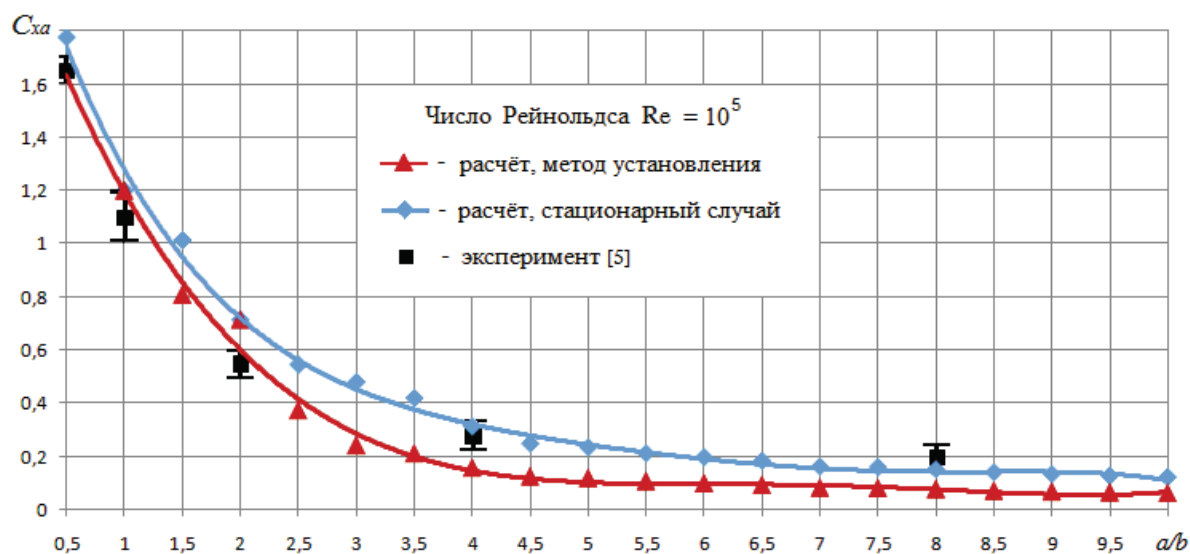


Рис. 2. Сравнение значений коэффициента лобового сопротивления для эллиптических цилиндров по результатам моделирования и эксперимента

В табл. 1 приведено сравнение значений коэффициентов лобового сопротивления C_{xa} , рассчитанных по методу импульсов, с экспериментальными данными [5, 6].

Таблица 1 – Сравнение значений коэффициентов лобового сопротивления C_{xa} для эллиптических цилиндров

a/b	Экспериментальные данные [5,6]	Стационарная постановка	Нестационарная постановка
0,5	1,6...1,7	1,779	1,630
1,0	1...1,2	1,200	1,200
2,0	0,5...0,6	0,713	0,712
4,0	~ 0,28	0,311	0,156
8,0	~ 0,2	0,150	0,075

Значения, полученные в результате моделирования в программе Flow Simulation, хорошо согласуются с известными экспериментальными данными. Нестационарный подход для решения задач по обтеканию тел потоком вязкой жидкости можно применять в диапазоне чисел Рейнольдса $10^2 \leq Re \leq 10^5$. Из двух методов расчёта при числах $Re < 10^5$ лучшее согласование с экспериментальными данными даёт стационарный метод.

Библиографический список

1. Алямовский, А.А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике [Текст] / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович Н.Б. Пономарёв – СПб.: БХВ-Петербург – 2008. – 1040 с.
2. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя [Текст] / Г. Шлихтинг – М.: Наука – 1974. – 618 с.
3. Горлин, С.М. Экспериментальная аэромеханика [Текст] / С.М. Горлин – М.: Наука – 1970. – 423 с.
4. Frolov, V.A. Reducing cylinder drag by adding a plate [Text] / V.A. Frolov, A.S. Kozlova //AIP Conference Proceedings. – 2017. – No.1893, 030074. (<https://www.scopus.com/inward/record.uri?partnerID=HzOxMe3b&scp=85034240937&origin=inward>)
5. Девнин, С.И. Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций [Текст] / С.И. Девнин – Л.: Судостроение – 1983. – 320 с.
6. Katz, J. Low-speed aerodynamics [Text] / J. Katz, A. Plotkin – McGraw-Hill Book Co., 1991.