

УДК 533.6.011

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫМ ОТРЫВНЫМ ТЕЧЕНИЕМ В БЛИЖНЕМ СЛЕДЕ

В.Т. КАЛУГИН, А.С. ЕПИХИН, Е.А. ЦЫКУНОВА

Показана возможность применения открытого пакета OpenFOAM для расчета нестационарных вихревых течений и управления ими при исследовании обтекания круглого цилиндра с установленной за ним пластиной. Получены структуры обтекания и аэродинамические характеристики, а также проведена оценка возмущений, вызванных срывом вихрей с поверхности цилиндра. Даны рекомендации по управлению течением в области ближнего следа.

**Ключевые слова:** вихревое воздействие, пульсации сил, цилиндр, пластина, численное моделирование, OpenFOAM, модель турбулентности LES.

### Введение

При дозвуковом обтекании твердых тел за ними возникает зона отрывного течения, параметры потока в которой носят пульсационный характер. Нестационарность обусловлена развитием на теле вихревых зон (вихрей), которые в результате гидродинамической неустойчивости могут срывать в поток, образуя сложные структуры течения. Твердые тела, расположенные в области ближнего следа, в данном случае испытывают нестационарные нагрузки, что вызывает бафтинговые явления [1].

Целью работы является исследование возможности численного расчета вихревых структур и управления ими в дозвуковом турбулентном потоке. Для решения задач математического моделирования выбран открытый пакет OpenFOAM, который применяется для решения задач механики сплошной среды.

### Вычислительный комплекс OpenFOAM

Это свободно распространяемое программное обеспечение с открытым исходным кодом (лицензия GNU GPL), поддерживающее параллельные вычисления для моделирования задач механики сплошных сред, реализованное на языке программирования C++. Пакет является полностью модульным и поставляется с растущим набором написанных решателей, применимых к широкому кругу задач. Решатель – численная модель интегрирования дифференциальных уравнений в частных производных, основанная на методе конечного объема. В задаче использовался решатель PISO FOAM, который применим для нестационарного несжимаемого турбулентного потока и использующий алгоритм PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators – неявный метод с разделением операторов) для связи уравнения скорости и давления. В расчетах отрывных течений вокруг цилиндра использовался метод крупных вихрей (LES) [2]. Трехмерная неструктурированная расчетная сетка построена вокруг твердотельных моделей с помощью утилиты snappyHexMesh.

### Модель турбулентности LES для расчета нестационарных турбулентных течений

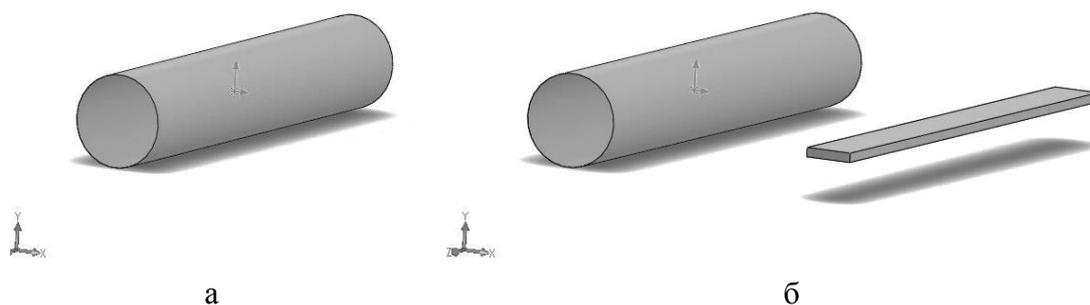
Метод моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES) основан на пространственной "фильтрации" системы трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса. Система уравнений LES по форме аналогична системе уравнений RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes – уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу). Однако физическое содержание

этих двух систем различно. Так, дополнительные (содержащие напряжения Рейнольдса) члены RANS описывают влияние всех турбулентных неоднородностей на осредненное решение, в то время как аналогичные члены уравнений LES ("подсеточные" напряжения) описывают влияние только относительно мелких (с размерами, меньшими размера фильтра  $\Delta$ ) вихрей на зависящее от времени решение отфильтрованных уравнений. В рамках LES вихревые структуры с размерами, превышающими размеры фильтра, разрешаются "точно", а моделируются вихревые структуры меньших размеров [3].

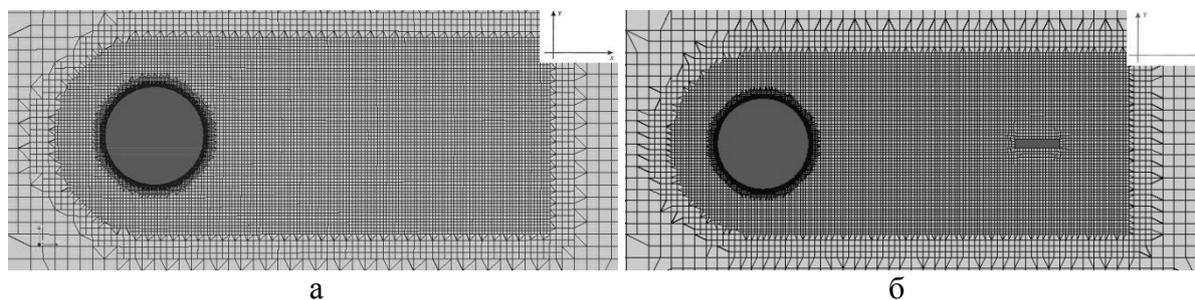
Преимущество LES перед RANS состоит в том, что благодаря относительной однородности и изотропности мелкомасштабной турбулентности задача построения подсеточных моделей оказывается существенно более простой, чем построение моделей турбулентности для RANS, когда необходимо моделировать весь спектр турбулентности.

### Постановка задачи

Для проведения численного моделирования создана трехмерная расчетная область с размерами:  $x = 17 \cdot d$  м;  $y = 10 \cdot d$  м;  $z = 3 \cdot d$  м. Исследуемыми моделями являются: 1 – цилиндр с диаметром  $d = 0,4$  м и длиной  $l_z = 3 \cdot d$  м (рис. 1а); 2 – цилиндр, за которым на расстоянии  $L_1 = 1,5 \cdot d$  м,  $L_2 = 3 \cdot d$  м,  $L_3 = 4,5 \cdot d$  м установлена пластина шириной  $b = 0,5 \cdot d$  м, толщиной  $h = 0,1 \cdot d$  м, длиной  $l_z = 3 \cdot d$  м (рис. 1б). Начало координат совпадает с центром масс цилиндра. Дополнительно выполнялось сгущение сетки и построение призматических слоев у поверхности цилиндра. Фрагменты расчетной сетки представлены на рис. 2.



**Рис. 1.** Схема расчетной модели при численном моделировании: а – цилиндра; б – цилиндра и пластины на расстоянии  $L_1 = 3 \cdot d$  м



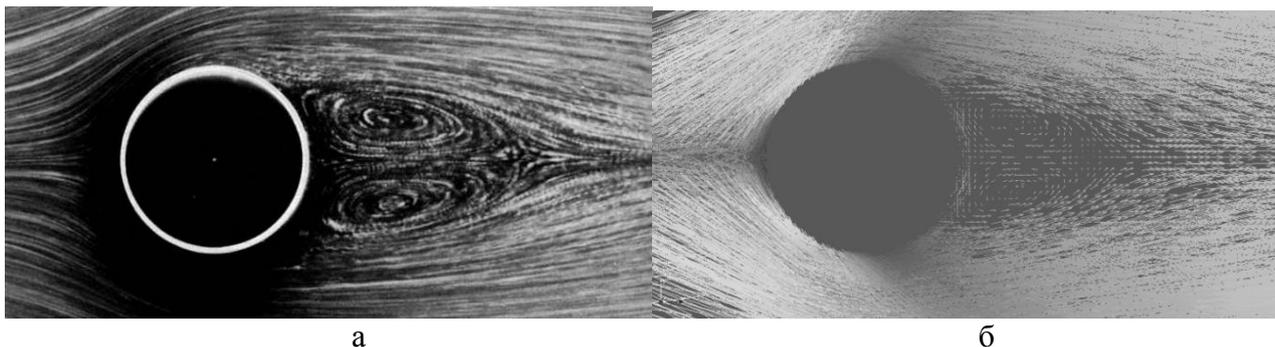
**Рис. 2.** Фрагмент расчетной сетки в плоскости  $x0y$  в задаче обтекания: а – цилиндра; б – цилиндра и пластины на расстоянии  $L_1 = 3 \cdot d$  м

Расчет проводился на неструктурированной сетке с количеством  $2 \times 10^6$  ячеек со следующими исходными данными: скорость набегающего потока  $U_1 = f(\text{Re})$  м/с; кинематическая вязкость  $1,5 \times 10^{-5}$  Па·с; число Рейнольдса изменялось от  $\text{Re}_1 = 20$  до  $\text{Re}_4 = 3,5 \times 10^6$ . В начальный момент времени все величины находятся в покое, скорость равна 0. Число Куранта не превышало значения  $\text{Co} = 0,2$ . На входе в расчетную область задавались модуль вектора скорости и значения

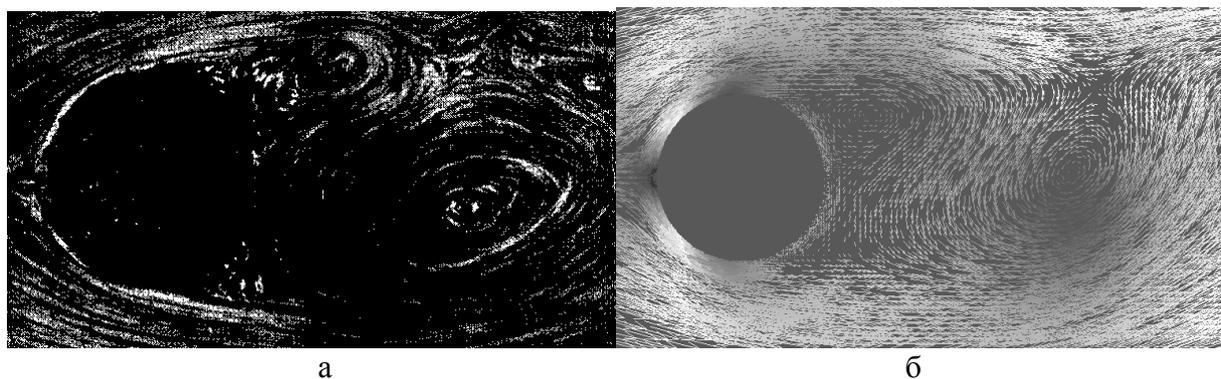
параметров моделей турбулентности исходя из степени турбулентности потока  $Tu = 1\%$ , на выходе – давление, для значений параметров турбулентности на стенках цилиндра использовались условия прилипания и непроницаемости. Параметр  $y^+$  лежит в пределах  $0,03 - 9$ , что соответствует накладываемым ограничениям на использование модели турбулентности.

### Обтекания цилиндра дозвуковым потоком

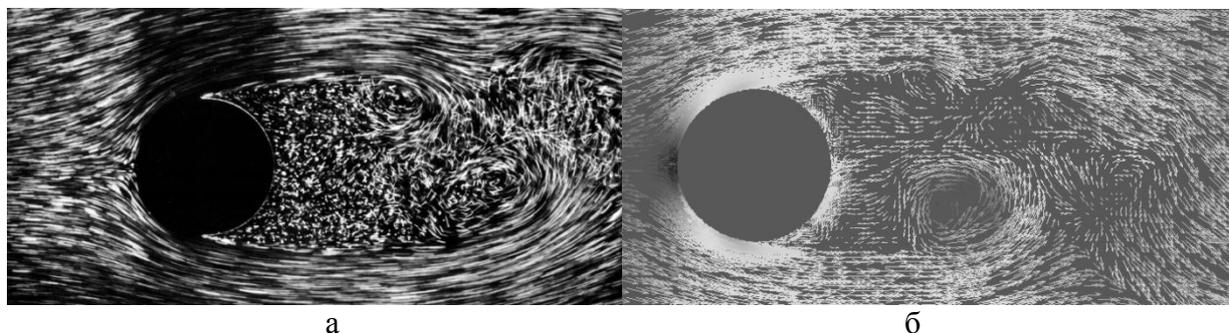
Проведена серия расчетов обтекания цилиндра, и получены вихревые структуры при различных числах Рейнольдса:  $Re_1 = 20$ ;  $Re_2 = 200$ ;  $Re_3 = 3,5 \times 10^4$ . Сравнение структур обтекания цилиндра для данных чисел Рейнольдса показано на рис. 3-5.



**Рис. 3.** Структура обтекания цилиндра при числе Рейнольдса  $Re = 20$ :  
а – эксперимент [4]; б – численное моделирование



**Рис. 4.** Структура обтекания цилиндра при числе Рейнольдса  $Re = 200$ :  
а – эксперимент [4]; б – численное моделирование



**Рис. 5.** Структура обтекания цилиндра при числе Рейнольдса  $Re = 3,5 \times 10^4$ :  
а – эксперимент [4]; б – численное моделирование

Получены коэффициенты лобового сопротивления цилиндра для различных чисел Рейнольдса (рис. 6). Видно, что расчетный коэффициент продольной силы хорошо совпадает с экспериментальными данными [5; 6], погрешность не превышает 10%.

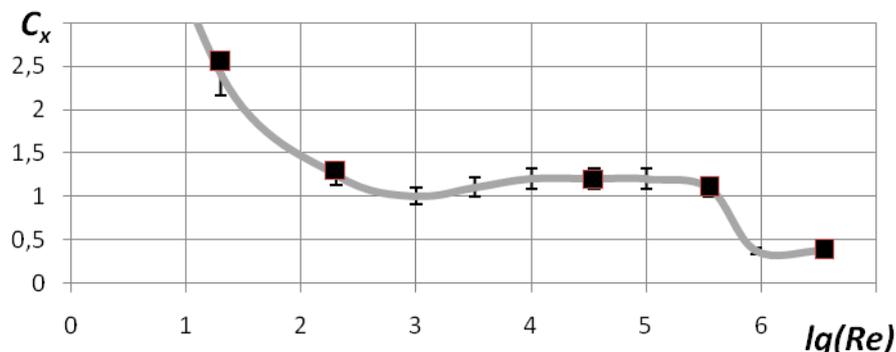


Рис. 6. Коэффициент продольной силы цилиндра в зависимости от числа Рейнольдса:  
 — теория; ■ — численное моделирование

### Обтекания цилиндра и пластины

Получены структуры обтекания цилиндра и пластины (рис. 7), а также аэродинамические характеристики при числе Рейнольдса  $Re = 3,5 \times 10^4$  (рис. 8).

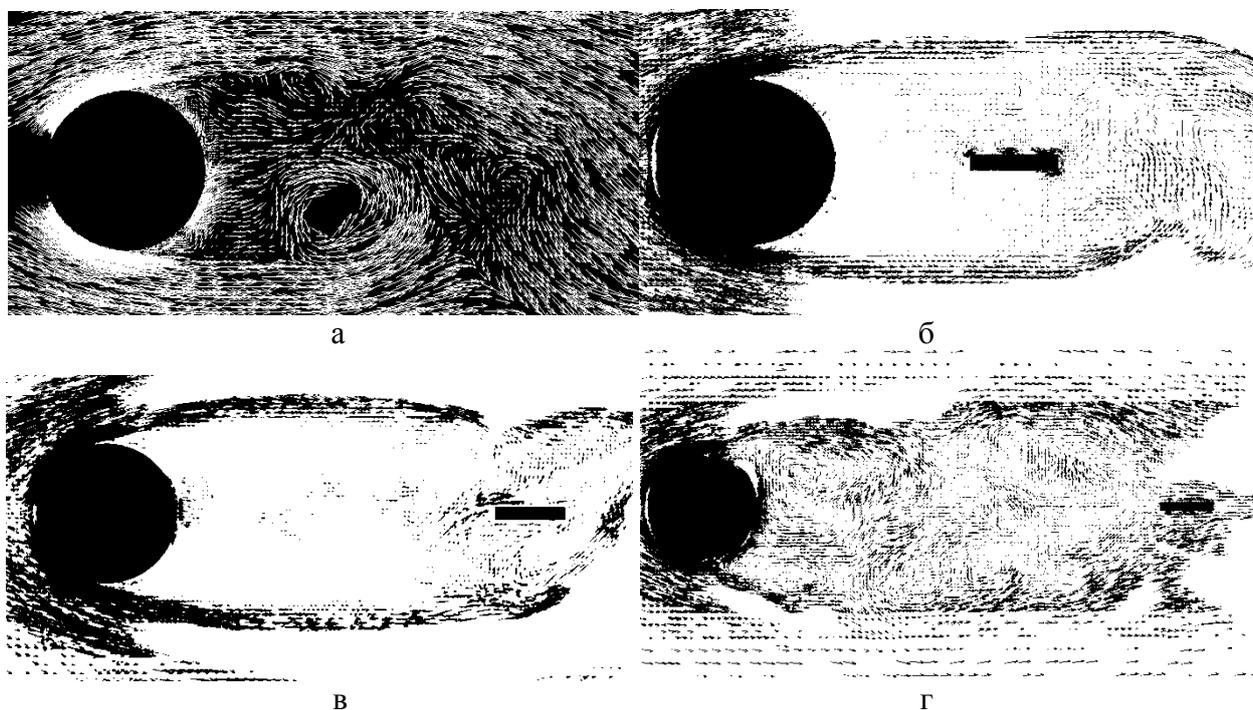
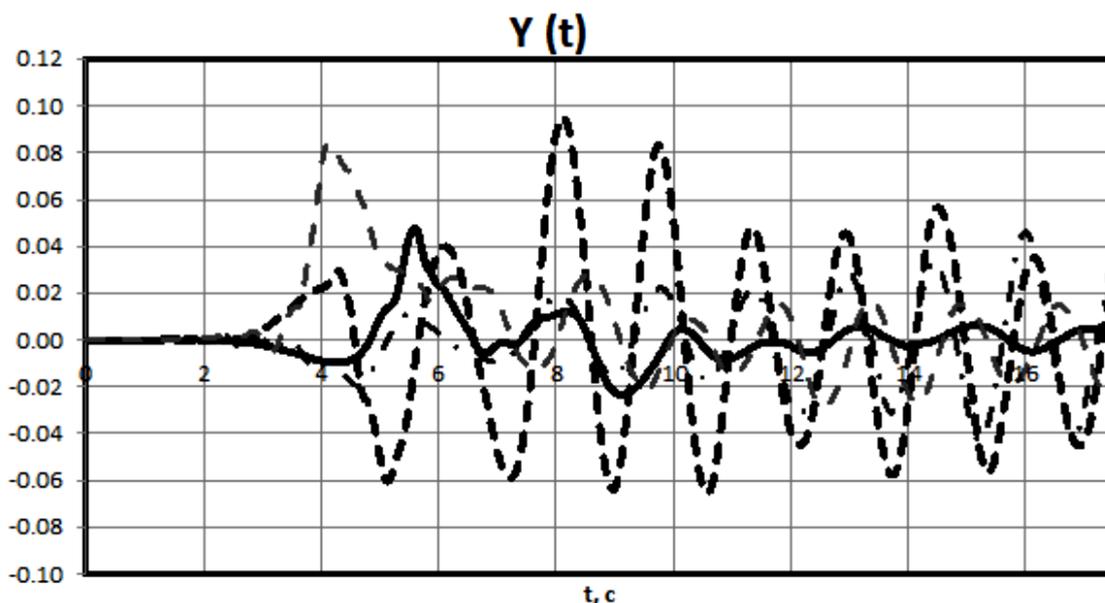


Рис. 7. Структура обтекания цилиндра при  $Re = 3,5 \times 10^4$ : а – без пластины; б – с пластиной на расстоянии  $L_1 = 1,5 \cdot d$  м; в – с пластиной на расстоянии  $L_2 = 3 \cdot d$  м; г – с пластиной на расстоянии  $L_3 = 4,5 \cdot d$  м

На рис. 7а показаны образование и отрыв вихревых зон с поверхности цилиндра, что приводит к существенным силовым нагрузкам (рис. 8). При размещении в ближнем следе твердого

тела (пластины) образуется единая отрывная зона (рис. 7б, в, г). При установке пластины на расстоянии  $L_1 = 1,5 \cdot d$  м заметно перестраивается структура течения, при этом величина пульсаций меняется незначительно. На расстоянии  $L_2 = 3 \cdot d$  м происходит существенное уменьшение пульсаций подъемной силы на цилиндре. Это происходит из-за дробления поля течения за счет твердого тела, установленного за цилиндром. В случае  $L_3 = 4,5 \cdot d$  м динамические нагрузки возрастают по сравнению с предыдущим вариантом. Полученный эффект также был обнаружен в работе [7].



**Рис. 8.** Пульсации подъемной силы цилиндра при  $Re = 3,5 \times 10^4$ : — — — без пластины, — — — с пластиной на расстоянии  $L_1 = 1,2$  м; — · — с пластиной на расстоянии  $L_2 = 0,6$  м; — — — с пластиной на расстоянии  $L_3 = 1,8$  м

## Заключение

Показана возможность применения открытого пакета OpenFOAM для численного моделирования вихревого обтекания тел с точностью, необходимой для инженерной практики.

Установлено, что нестационарные эффекты можно уменьшать путем внесения твердого тела в область ближнего следа. Проведен анализ влияния местоположения пластины за цилиндром на его динамические нагрузки. Найдено оптимальное расстояние  $L_1 = 3 \cdot d = 1,2$  м, при котором степень пульсаций подъемной силы значительно уменьшается.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алексюк А.И. *Исследование отрывных обтеканий тел методом численного решения уравнений Навье-Стокса*. Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2003.
2. Калугин В.Т., Голубев А.Г., Епихин А.С., Мичкин А.А. Возможности применения открытого пакета OpenFOAM для численного моделирования отрывных течений при до- и сверхзвуковых скоростях обтекания летательных аппаратов // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2014. № 199 (1). С. 23-30.
3. Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. *Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учеб. пособие*. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 88 с.
4. Ван-Дайк М. *Альбом течений жидкости и газа*. М.: Мир, 1986. 184 с.
5. Савицкий Г.А. *Ветровая нагрузка на сооружения*. М.: Изд-во литературы по строительству, 1972. 44 с.
6. Younis Nibras. The Role of Turbulent Integral Length Scale on The Drag of a Circular Cylinder in Cross Flow. *Electronic Theses and Dissertations*. 2010. P. 216.

7. **Chan A.S., Jameson A.** *Suppression of Vortex-Induced Forces on a Two-Dimensional Circular Cylinder by a Short and Thin Splitter Plate Interference*, ACL Report 2007-5, Aerospace Computing Laboratory, Stanford University, December 2007.

## MODELING CONTROL PROCESSES OF UNSTEADY SEPARATED FLOW IN THE NEAR WAKE

**Kalugin V.T., Epikhin A.S., Tsykunova E.A.**

The paper shows possibility of implementing the open source CFD software package OpenFOAM for calculation of unsteady vortex flows in researching of flow past cylinder with plate. Flow structure and aerodynamic characteristics have been obtained, and evaluation of the perturbations caused by the vortex shedding from the surface of cylinder has been conducted. Method of flow control in the region of the near wake has been proposed.

**Keywords:** vortex effect, forces pulsation, cylinder, plate, numerical modeling, open source package OpenFOAM, turbulence model LES.

### REFERENCES

1. **Aleksyuk A.I.** *Issledovanie otryvnykh obtekanij tel metodom chislennogo reshenija uravnenij Nav'e-Stoksa*. Avtoref. diss. ... kand. fiz.-mat. nauk. M. 2003. (In Russian).
2. **Kalugin V.T., Golubev A.G., Epikhin A.S., Michkin A.A.** *Vozможности primeneniya otkrytogo paketa OpenFOAM dlja chislennogo modelirovaniya otryvnykh techenij pri do- i sverhsvukovykh skorostjah obtekanija letatel'nyh apparatov*. *Nauchnyj Vestnik MGTU GA*. 2014. № 199 (1). Pp. 23-30. (In Russian).
3. **Garbaruk A.V.** *Modelirovanie turbulentnosti v raschetah slozhnykh techenij: ucheb. posobie*. SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta. 2012. 88 p. (In Russian).
4. **Van-Dayjk M.** *Aljбом techenij zhidkosti i gaza*. M.: Mir. 1986. 184 p. (In Russian).
5. **Savickij G.A.** *Vetrovaya nagruzka na sooruzheniya*. M.: Izd-vo literaturih po stroiteljstvu. 1972. 44 p. (In Russian).
6. **Younis Nibras.** *The Role of Turbulent Integral Length Scale on The Drag of a Circular Cylinder in Cross Flow*. *Electronic Theses and Dissertations*. 2010. P. 216.
7. **Chan A.S., Jameson A.** *Suppression of Vortex-Induced Forces on a Two-Dimensional Circular Cylinder by a Short and Thin Splitter Plate Interference*. ACL Report 2007-5. Aerospace Computing Laboratory. Stanford University. December 2007.

### Сведения об авторах

**Калугин Владимир Тимофеевич**, 1949 г.р., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана (1972), доктор технических наук, профессор кафедры динамики полета и управления движением летательных аппаратов МГТУ им. Н.Э. Баумана, автор более 250 научных работ, область научных интересов – аэродинамика струйных и отрывных течений, проектирование органов управления полетом.

**Епихин Андрей Сергеевич**, 1989 г.р., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана (2012), аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана, автор 7 научных работ, область научных интересов – управление процессами обтекания и проектирование органов управления.

**Цыкунова Елена Александровна**, студентка МГТУ им. Н.Э. Баумана, область научных интересов – аэродинамика струйных и отрывных течений, проектирование органов управления полетом.