

УДК 629.735.45

ПРИМЕНЕНИЕ OPENFOAM ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОХООБТЕКАЕМЫХ ТЕЛ

В.В. ЕФИМОВ, А.Ю. НАЗАРОВ

Статья представлена доктором технических наук, профессором Ципенко В.Г.

Представлено обоснование возможности применения пакета OpenFOAM для получения аэродинамических характеристик плохообтекаемых тел и изучения их зависимости от геометрических параметров данных тел.

Ключевые слова: OpenFOAM, аэродинамические характеристики, модель турбулентности, вертолет, груз на внешней подвеске.

Введение

На современном этапе развития науки и техники наиболее рациональным методом изучения параметров вертолета с грузом на внешней подвеске является численное моделирование. При численном моделировании динамики грузов на внешней тросовой подвеске вертолета [1; 2] в качестве исходных данных требуется иметь значения аэродинамических коэффициентов во всем диапазоне углов атаки и скольжения с определенным шагом по данным углам.

Получение «сферических» аэродинамических характеристик тел различной формы в лабораторных условиях путем продувок в аэродинамических трубах является весьма трудоемкой и дорогостоящей задачей. На сегодняшний день все чаще для получения аэродинамических характеристик тел применяются методы вычислительной гидродинамики. Работы отечественных и зарубежных исследователей показывают, что численное моделирование турбулентных течений может давать вполне адекватные результаты [3; 4]. Неоспоримым преимуществом CFD-методов (от англ. Computational Fluid Dynamics – вычислительная гидродинамика) по сравнению с экспериментальными являются значительно меньшие финансовые и временные затраты.

В связи с этим актуальным становится вопрос об оценке возможности исследования влияния геометрических параметров плохообтекаемого тела на его аэродинамику в турбулентном потоке средствами CFD-методов, реализованных в свободно распространяемом пакете прикладных программ OpenFOAM.

Описание задач

Для изучения влияния геометрии плохообтекаемых тел на их аэродинамические характеристики было выбрано две задачи: исследование влияния удлинения плоской призмы на коэффициент лобового сопротивления при ее обтекании турбулентным потоком ($Re = 3 \cdot 10^5$), а также исследование влияния удлинения круглого цилиндра на коэффициент лобового сопротивления при его обтекании турбулентным потоком вдоль оси ($Re = 3,4 \cdot 10^5$). В литературе приведены экспериментальные данные по данным задачам, что позволяет оценить адекватность получаемых результатов. На рис. 1 представлены данные экспериментов, взятые из [6].

В качестве инструмента для решения поставленных задач был выбран пакет прикладных программ OpenFOAM (Open Source Field Operation And Manipulation CFD ToolBox – пакет программ для операций и манипуляций с полями с открытым исходным кодом). OpenFOAM – свободно распространяемая открытая интегрируемая платформа вычислительной гидродинамики для операций с полями (скалярными, векторными и тензорными). Этот пакет сегодня является одним из известных приложений, предназначенных для вычислений по методу конечных объемов (FVM).

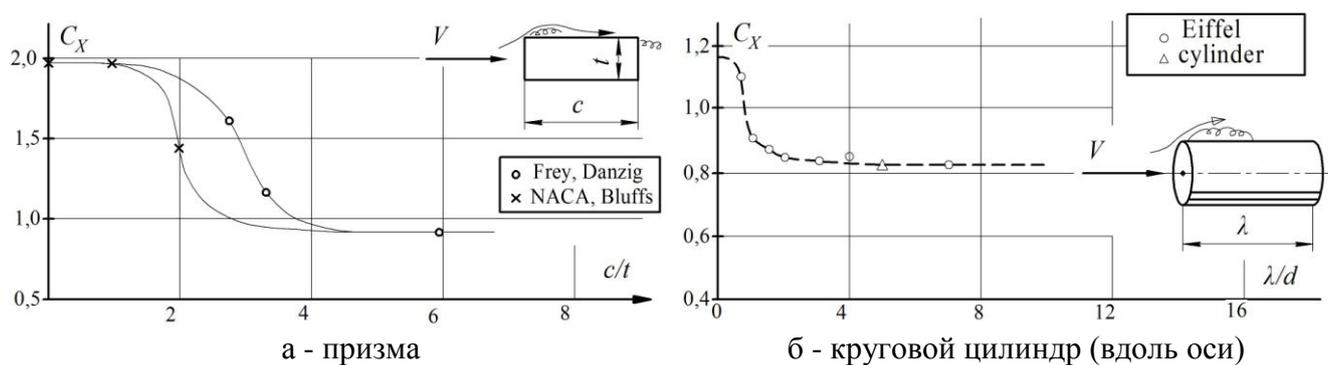


Рис. 1. Зависимости коэффициента лобового сопротивления тел от их удлинения

Расчеты производились на неструктурированных сетках гибридным методом IDDES, являющимся улучшенной модификацией метода DES. Метод DES был предложен в качестве альтернативы RANS- и LES-методам при расчете пристеночных течений с обширными отрывными зонами, для которых RANS-модели не способны обеспечить приемлемую точность, а LES-методы требуют чрезмерно больших вычислительных ресурсов [5]. Существуют две его модификации – DDES (Delayed DES – задержанный DES) и IDDES (DDES with Improved wall-modeling capabilities) – метод DDES с улучшенным пристеночным LES моделированием. В пакете OpenFOAM данный метод реализован на базе модели турбулентности Спаларта и Аллмараса (SA-модель) [7; 8]. Настройка параметров модели турбулентности, задание начальных условий на границах расчетной области проводились в соответствии с [4]. В качестве решателя использовался pisoFOAM, предназначенный для решения задач с нестационарными течениями жидкости. Шаг по времени выбирался таким образом, чтобы число Куранта не превышало единицы. Число Куранта для ячейки определяется как

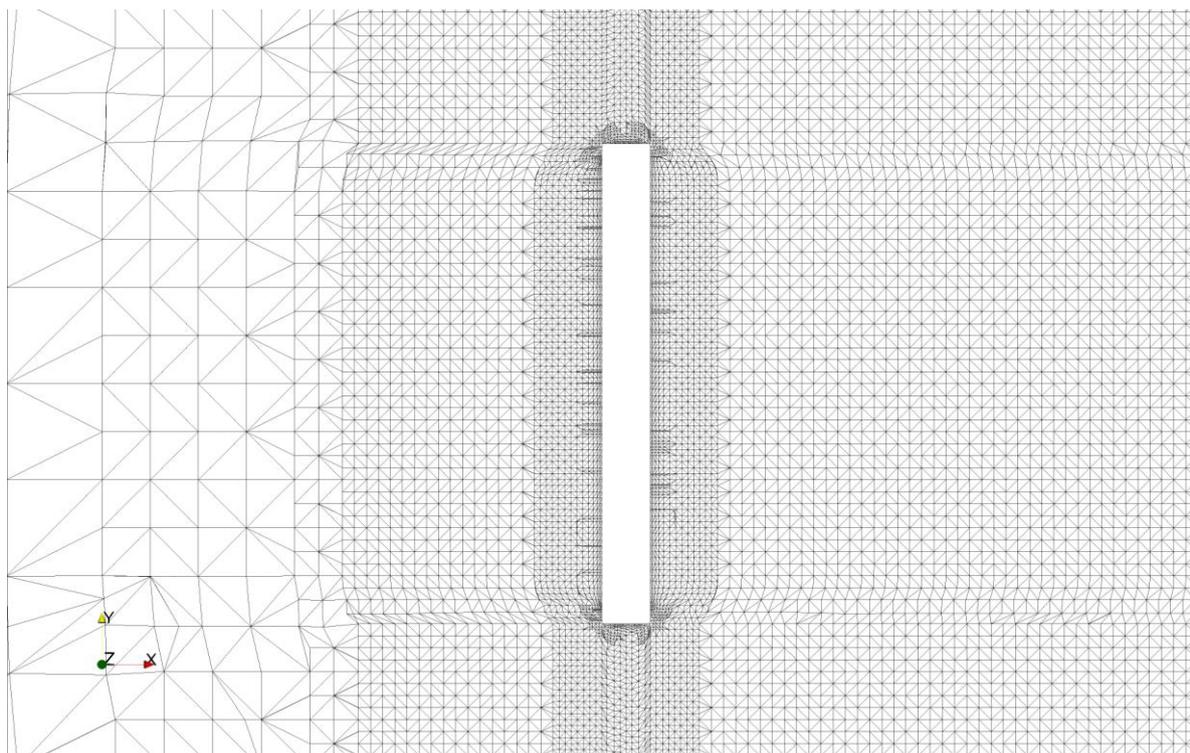
$$Co = \frac{\delta t \cdot |U|}{\delta x}, \quad (1)$$

где δx – размер ячейки в направлении скорости; δt – шаг по времени; $|U|$ – модуль скорости через ячейку. Обычно шаг по времени составлял 10^{-5} с.

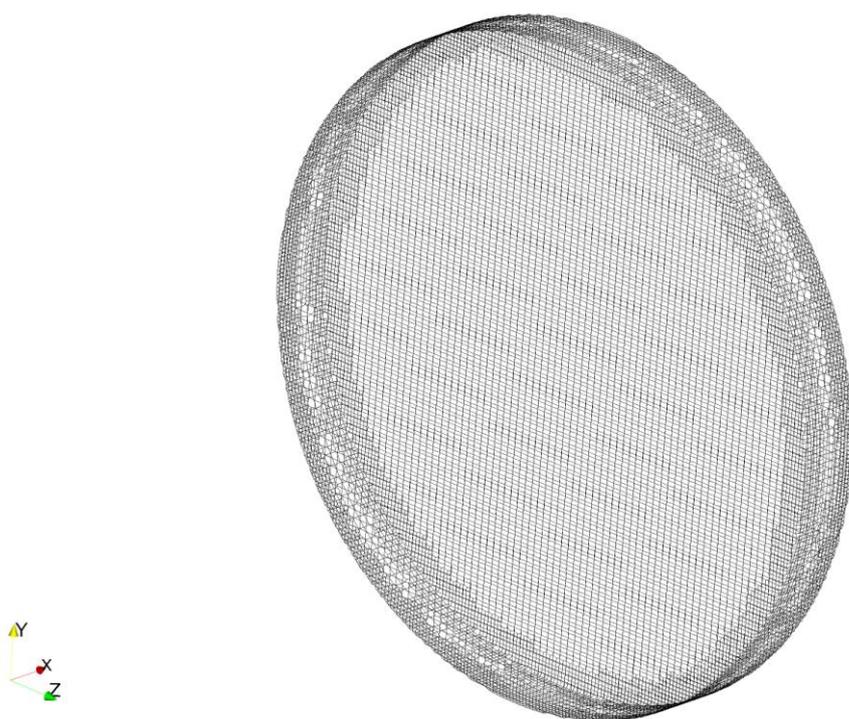
Расчетные сетки

Построение расчетных сеток производилось средствами OpenFOAM, входящими в стандартный пакет. Расчетная область (домен) всех задач представляет собой параллелепипед, разбитый на гексаэдральные элементы с помощью модуля blockMesh. Привязка сетки к поверхности тела и ее локальное улучшение производилось с помощью модуля snappyHexMesh. Стоит отметить возможность работы snappyHexMesh в параллельном режиме, что позволяет сократить затраты времени на создание сетки. Параметры модулей blockMesh и snappyHexMesh задавались таким образом, чтобы обеспечить приемлемое качество сетки вблизи поверхности исследуемого тела. Так параметр y^+ для расчетных сеток выдерживался в диапазоне 6...8, что вполне допустимо для данной модели турбулентности. На рис. 2, 3 приведены фрагменты расчетных сеток вблизи тел и на их поверхности.

Размер расчетной области превышал размеры исследуемого тела по каждой оси не менее чем в 10 раз. Скорость на входе в расчетную область задавалась постоянной и равной 5 м/с, что при известных размерах исследуемых тел обеспечивало необходимое число Рейнольдса.

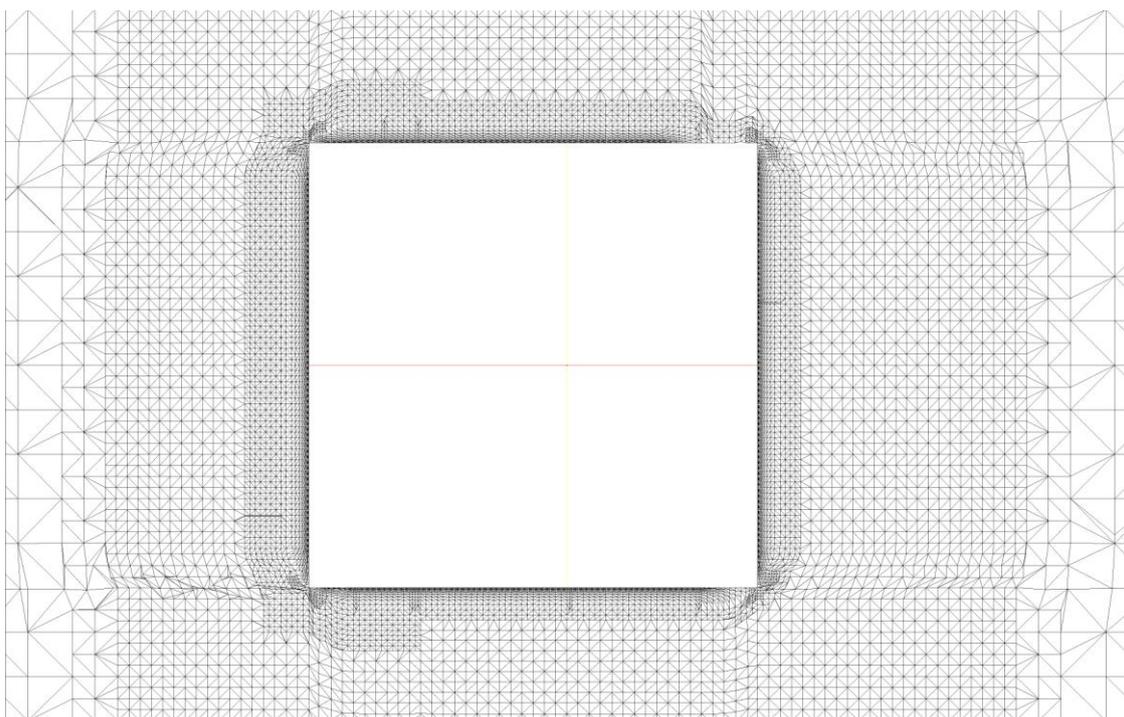


а - вблизи цилиндра

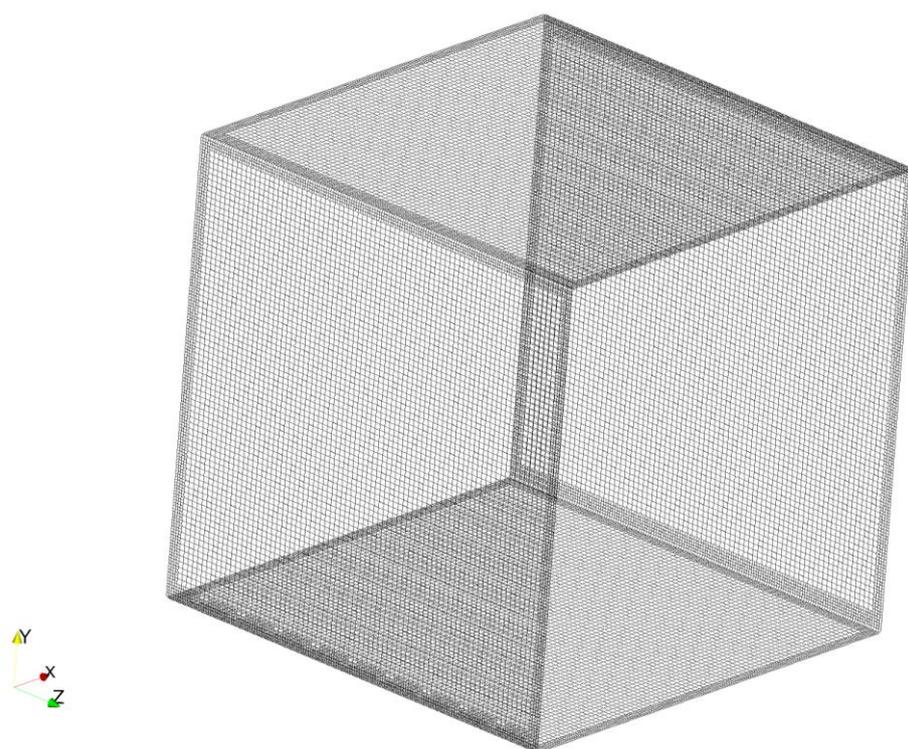


б - на поверхности цилиндра

Рис. 2. Расчетная сетка кругового цилиндра удлинением 0,1



а - вблизи призмы



б - на поверхности призмы

Рис. 3. Расчетная сетка призмы удлинением 1,0

Результаты расчетов

Расчеты проведены для призм с удлинением 0,2; 1; 2; 3; 4; 6 и цилиндров с удлинением 0,1; 0,5; 1; 2; 4. Примеры распределения полей скорости и давления представлены на рис. 4, 5 соответственно. Полученные в ходе расчетов значения коэффициента лобового сопротивления для каждого из тел нанесены на графики (рис. 6) для наглядного сравнения их с экспериментальными данными.

Очевидно, что результаты численного моделирования с применением гибридного метода IDDES позволяют получать адекватные значения аэродинамических характеристик тел неудобобтекаемой формы при больших числах Рейнольдса. Кроме того, методы CFD, реализованные в пакете OpenFOAM, позволяют отслеживать влияние геометрических параметров на аэродинамические характеристики тел различной формы.

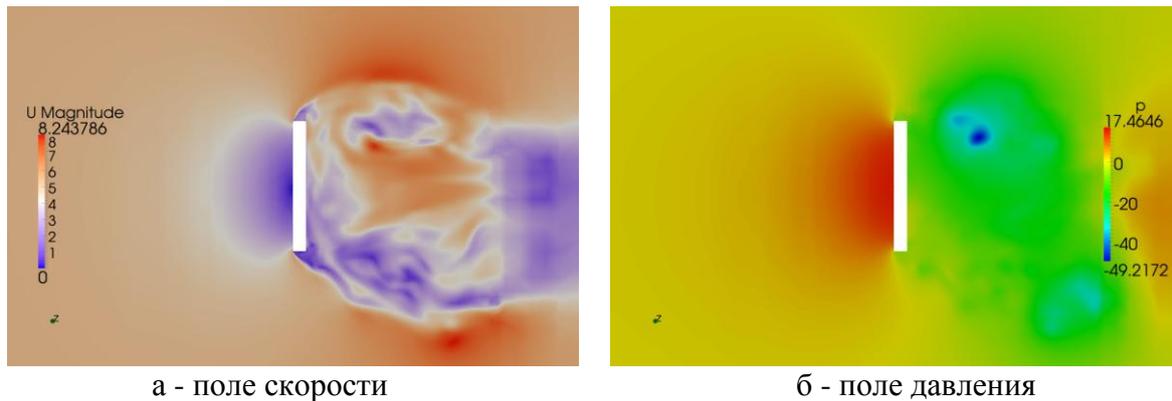


Рис. 4. Распределение величин скорости и давления для цилиндра ($\lambda = 0,1$)

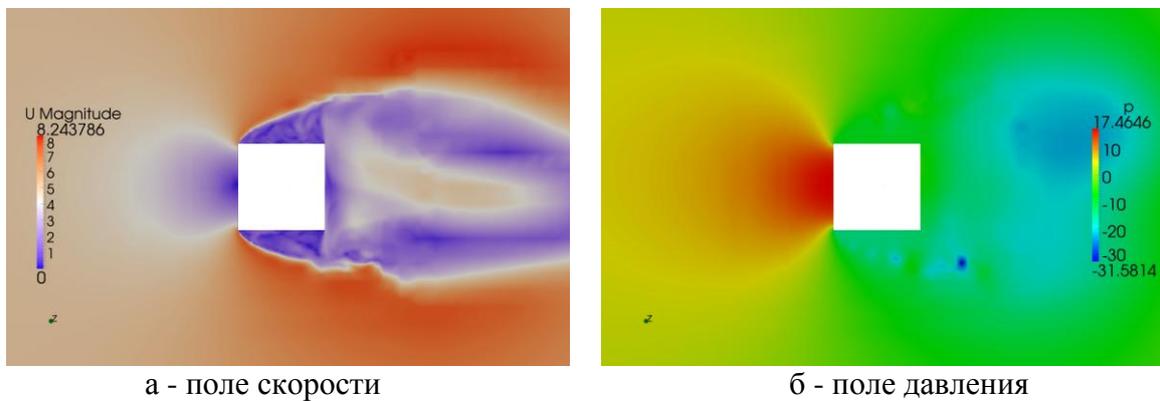


Рис. 5. Распределение величин скорости и давления для призмы ($\lambda = 1,0$)

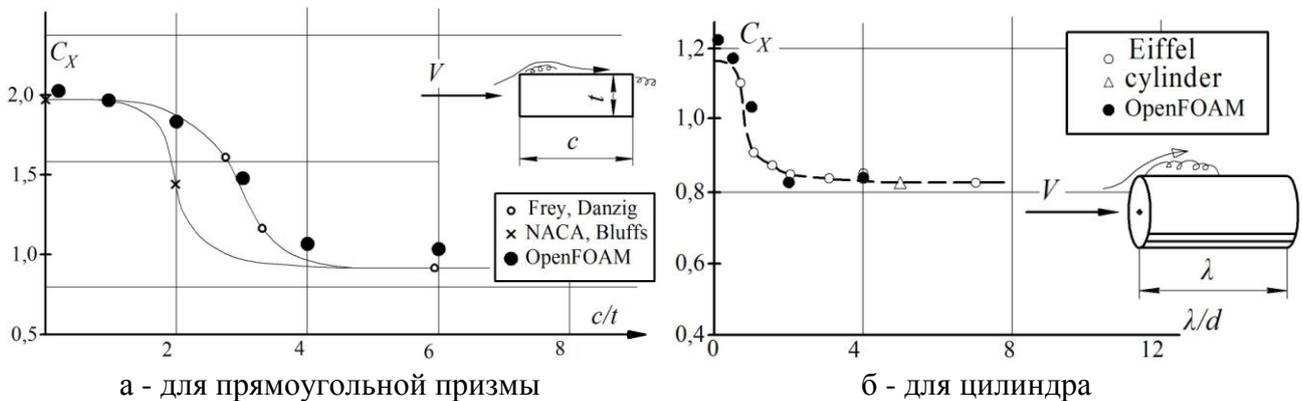


Рис. 6. Зависимость коэффициента лобового сопротивления тела от его удлинения

Подводя итог, можно говорить о состоятельности CFD методов, реализованных в пакете OpenFOAM для исследования влияния геометрических параметров грузов, перевозимых на внешней подвеске вертолета, на их аэродинамические характеристики, что, в конечном итоге, позволит оценить влияние геометрических параметров грузов на их динамику.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ефимов В.В.** Математическое описание движения груза на внешней подвеске вертолета // Научный Вестник МГТУ ГА, серия Аэромеханика и прочность. - 2007. - № 111. - С. 121 - 128.
2. **Козловский В.Б., Паршенцев С.А., Ефимов В.В.** Вертолет с грузом на внешней подвеске. - М.: Машиностроение / Машиностроение-Полет, 2008.
3. **Бычков И.М.** Верификация пакета прикладных программ OpenFOAM на задачах обтекания аэродинамических профилей: сб. материалов XIX школы-семинара «Аэродинамика летательных аппаратов». - М.: Изд-во ЦАГИ, 2008. - С. 36.
4. **Ефимов В.В., Назаров А.Ю., Незаметдинов Р.Ш.** Настройка пакета прикладных программ OpenFOAM для численного моделирования обтекания грузов на внешней тросовой подвеске вертолета // Научный Вестник МГТУ ГА. - 2013. - № 188. - С. 28 - 33.
5. **Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л.** Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учеб. пособие. - СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.
6. **Hoerner S.F.** Fluid-Dynamic Drag, Hoerner Fluid Dynamics, Bricktown New Jersey, 1965.
7. **Spalart P.R. and Allmaras S.R.** 1992, «A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows» AIAA Paper 92-0439.
8. **OpenFOAM** (version 2.0.0). The Open Source CFD Toolbox. User Guide. London: OpenCFD Ltd. 2011 (<http://www.openfoam.com/docs/>).

APPLICATION OPENFOAM TO STUDY THE EFFECT OF GEOMETRICAL PARAMETERS ON THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF BLUFF BODIES

Efimov V.V., Nazarov A.Y.

Justification of possibility of application of an OpenFOAM package for obtaining aerodynamic characteristics of bluff bodies and studying of their dependence on geometrical parameters.

Key words: OpenFOAM, aerodynamic characteristics, turbulence model, the helicopter, external sling.

Сведения об авторах

Ефимов Вадим Викторович, 1965 г.р., окончил МАИ (1988), кандидат технических наук, доцент кафедры аэродинамики, конструкции и прочности ЛА МГТУ ГА, автор 60 научных работ, область научных интересов – математическое моделирование динамики летательных аппаратов, эффективность летательных аппаратов.

Назаров Анатолий Юрьевич, 1988 г.р., окончил МГТУ ГА (2011), аспирант кафедры аэродинамики, конструкции и прочности ЛА МГТУ ГА, автор 1 научной работы, область научных интересов – вычислительная гидродинамика, математическое моделирование динамики летательных аппаратов.