

УДК 533.6.011

РЕАЛИЗАЦИЯ ГИБРИДНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ОБТЕКАНИЯ МАНЕВРЕННОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТКРЫТОГО ПАКЕТА OpenFOAM

А.С. ЕПИХИН, В.Т. КАЛУГИН

Показана возможность применения открытого вычислительного комплекса OpenFOAM для расчета аэродинамических характеристик летательного аппарата с учетом локальных отрывных течений. Проведен обзор методов моделирования турбулентных течений и установлено, что для численного расчета крупномасштабных вихревых структур целесообразно использовать вихреразрешающие подходы, а также проводить анализ численных схем и калибровку констант подсеточной модели. В работе даны рекомендации по использованию различных моделей турбулентности для моделирования вихревых течений. Проведен анализ диссипативности численных схем путем решения задачи о вырождении однородной изотропной турбулентности с применением пакета OpenFOAM и LES подхода. Описана и реализована методика совмещения RANS и LES подходов с применением зонирования расчетной области. В качестве примера применения реализованной методики расчета проведено численное моделирование обтекания тормозного щитка, установленного на фюзеляж перспективного маневренного самолета. Получены структуры обтекания летательного аппарата при дозвуковой скорости 50 м/с и его аэродинамические характеристики, а также проведено сравнение с экспериментальными данными и другими подходами моделирования турбулентных течений.

Ключевые слова: открытый пакет OpenFOAM; нестационарные вихревые течения; летательный аппарат; тормозной щиток; гибридная методика расчета; совмещение RANS и LES подходов.

ВВЕДЕНИЕ

Движение летательных аппаратов (ЛА) сопровождается отрывом потока, который приводит к перераспределению давления на его поверхности и изменению аэродинамических характеристик. Исследование вихревых течений и их взаимодействие с управляющими поверхностями ЛА стало одной из актуальных задач в области авиации и ракетостроения. Обтекание элементов конструкции ЛА воздушным потоком с образованием срывающихся с его поверхностей вихрей обуславливает нестационарный характер изменения их аэродинамических характеристик. С другой стороны, вихревые течения, генерируемые различными надстройками крыла, фюзеляжа или фонаря ЛА, могут воздействовать на элементы его конструкции, что вызывает их тряску (бафтинг). В настоящее время многочисленные исследования сконцентрированы на бафтинге килевого оперения [1–3], что необходимо учитывать при проектировании облика ЛА и решении практических задач по моделированию их обтекания. В случае сложного пространственного течения экспериментальные оценки нестационарных аэродинамических характеристик летательных аппаратов представляют значительные трудности, поэтому повышение точности и достоверности их определения целесообразно осуществлять с применением различных методов суперкомпьютерного моделирования вихревых течений вязкого газа. В настоящее время находят применение универсальные коммерческие пакеты типа STAR-CD, ANSYS CFX, FlowVision и др. Альтернативой является развитие открытых пакетов, например OpenFOAM, который позволяет решать широкий круг задач механики сплошной среды [4, 5] не только с использованием стандартных решателей и утилит, но и осуществлять их доработку.

ОПИСАНИЕ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Использование численных методов в аэродинамике дает возможность получить наиболее полную картину обтекания, а также выявить влияние отдельных элементов конструкции на значения аэродинамических характеристик и траекторию движения ЛА. При прямом численном моделировании (DNS) решаются полные нестационарные уравнения Навье – Стокса, что позволяет получить мгновенные характеристики турбулентных течений. Применение *DNS* ограничено имеющимися вычислительными ресурсами и высокой требовательностью к разностным схе-

мам. Невозможность практического использования исходной системы уравнений Навье – Стокса привела к появлению различных подходов к моделированию турбулентных течений, среди которых наиболее известные – решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса (RANS), метод крупных вихрей (LES) [6], также ряд гибридных подходов, среди которых выделяют метод отсоединенных вихрей (DES) и его модификации (DDES, IDDES) [7], а также гибридные RANS-LES подходы [8]. Так, для задач внешней аэродинамики, связанных с расчетом безотрывных течений или течений с ограниченными отрывными зонами, наиболее целесообразно применять *RANS* модели турбулентности, например, модель Спаларта и Аллмараса (SA модель), или Ментера. Однако из-за высокой степени диссипации энергии данные модели не подходят для моделирования развитых отрывных течений с крупномасштабными вихревыми структурами. Метод LES основывается на идее пространственной фильтрации исходной системы уравнений от мелких турбулентных неоднородностей, имеющих размеры порядка размеров фильтра. Важной особенностью подсеточных моделей для LES является то, что входящие в них эмпирические константы зависят от используемых для решения задачи методов и численных схем. Такой подход позволяет существенно увеличить точность моделирования вихревых течений, но по сравнению с RANS подходом значительно увеличивает требования к расчетной сетке, а следовательно, увеличивает вычислительные ресурсы на несколько порядков. Снизить эти затраты, сохранив точность моделирования позволяет использование гибридных вихреразрешающих подходов. Метод DES и его модификации (DDES, IDDES) является первым гибридным подходом. В них область модели LES определяется автоматически по наличию турбулентных составляющих течения и характерному размеру сеточного разрешения. Существуют и другие гибридные подходы, например, зонный RANS-LES подход основан на выделении в расчетной области подобласти, где используется модель LES. Это во многих случаях дает возможность увеличить точность решения, получаемого в этой подобласти. Таким образом, для численного моделирования крупномасштабных вихревых структур целесообразно использовать вихреразрешающие подходы, а также проводить анализ численных схем и при необходимости осуществлять калибровку констант подсеточной модели.

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ДИСКРЕТИЗАЦИИ КОНВЕКТИВНЫХ СЛАГАЕМЫХ

Наибольшее влияние на численную диссипацию схемы при дискретизации уравнений движения оказывает преобразование конвективных слагаемых. Выбор оптимальной схемы дискретизации – одна из основных проблем при моделировании течений с помощью вихреразрешающих моделей турбулентности. Оценка диссипативности численных схем проводилась путем решения задачи о вырождении однородной изотропной турбулентности [9] с применением пакета OpenFOAM и LES подхода. В качестве подсеточной модели турбулентности использовалась модель одного дифференциального уравнения кинетической энергии. Полученные результаты моделирования показаны на рис. 1.

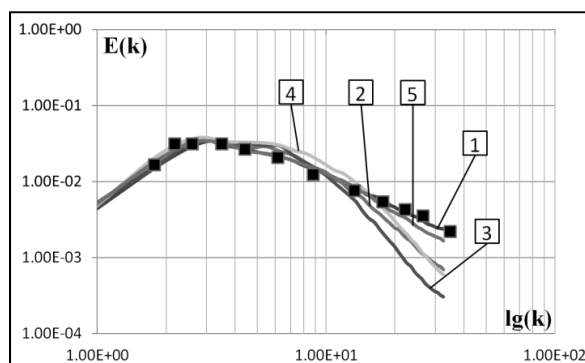


Рис. 1. Энергетические спектры для численных схем:

1 – центрально-разностная; 2 – смешанная с коэффициентом смешения 0.9; 3 – gamma с коэффициентом 0.1; 4 – LUST; 5 – filteredLinear2 с коэффициентом 0.5; ■ – экспериментальные значения [9]

Проведенный анализ численных схем, реализованных в пакете OpenFOAM, показывает, что наименее диссипативна центрально-разностная схема 1 (рис. 1), которая правильно описывает эволюцию вихревых структур, однако данная схема неустойчива. При использовании смешанной схемы 2 с коэффициентом смешения 0.9 заметно повышается ее диссипативность. Схема gamma 3 при значении параметра, который указывает долю противоточности, равном 0.1 и схема LUST 4, дают занижение энергии в области высоких частот. Схема filteredLinear2 5 корректно описывает эволюцию вихревых структур с небольшим занижением в области высоких частот и при этом не содержит осцилляций при значении параметра схемы больше 0.5.

МЕТОДИКА СОВМЕЩЕНИЯ RANS И LES ПОДХОДОВ

В случае расчета обтекания сложных трехмерных объектов и реальных конфигураций ЛА модели типа RANS не способны обеспечить приемлемую точность, а LES подход требует больших вычислительных ресурсов. В свою очередь гибридный метод DES и его модификации, которые предложены в качестве альтернативы RANS и LES подходам, демонстрируют хорошую точность [10]. Однако данный подход накладывает определенные условия на качество расчетной сетки [11], построение которой представляет значительные трудности и требует большого количества времени. Альтернативой является применение гибридных подходов, идея которых состоит в использовании ресурсоемкой модели LES лишь в областях, где необходимо увеличить точность моделирования, и использование экономичных RANS моделей в остальных областях расчетной области.

Анализ исходных файлов OpenFOAM показал, что готового решения для применения зонального метода расчета аэродинамических характеристик не существует. В результате была реализована собственная методика, основанная на совмещении RANS и LES подходов, позволяющая использовать комбинацию моделей крупных вихрей и моделей осреднения по Рейнольдсу. Ключевая идея данной методики состоит в том, что подавляющее большинство моделей турбулентности, реализованных в OpenFOAM, в качестве выходных результатов возвращают поля турбулентной вязкости и кинетической энергии турбулентности. С другой стороны, учет турбулентности в уравнении баланса импульса в OpenFOAM осуществляется через аппроксимацию эффективного тензора напряжений, численная реализация которого определяется на уровне каждой модели самостоятельно и показана на рис. 2.

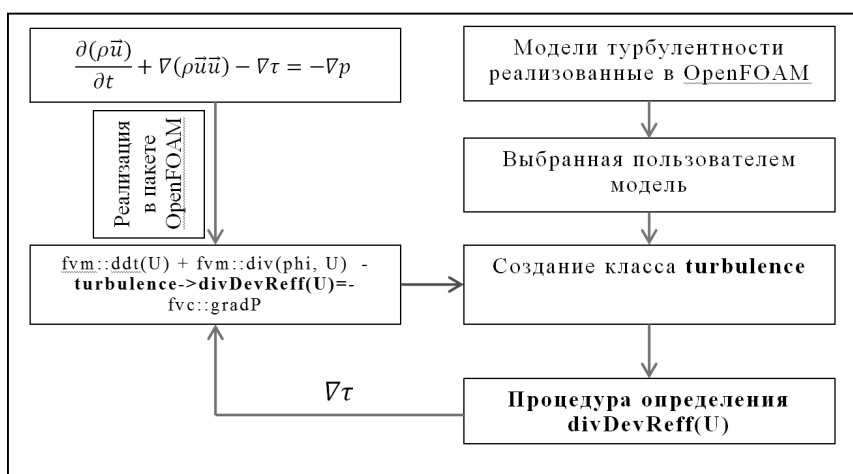


Рис. 2. Схема учета турбулентности в уравнении импульса в пакете OpenFOAM

Таким образом, решение задачи совмещения RANS и LES моделей OpenFOAM на программном уровне состоит в разработке метода, позволяющего получить общую матрицу коэф-

коэффициентов от двух различных моделей турбулентности, которая затем будет передана в уравнение сохранения импульса модели течения газа. В этом случае задача связывания RANS и LES моделей включает в себя три процедуры:

- 1) определение подобластей использования RANS и LES методов, исходя из структуры течения и целей исследования;
- 2) выбор RANS модели для вычисления турбулентной вязкости и LES модели для вычисления подсеточной вязкости;
- 3) вычисление смешанной вязкости ν_t с использованием соотношений, предложенных в работе [12]:

$$\nu_t = (\nu_{rans} - \nu_{sgs}) / \pi \arctan(-40 \frac{x_k}{C_2 - C_1} + 10 \frac{C_2 + C_1}{C_2 - C_1} + 0.5(\nu_{rans} + \nu_{sgs})),$$

где $x_k = \frac{x_1 - C_1}{C_2 - C_1}$, $x_1 = \frac{l_{Pr}}{C \cdot d}$, $l_{Pr} = \frac{1}{0.55} \nu_{rans} / \sqrt{k}$; C , C_2 , C_1 – эмпирические константы; d – характерный размер ячейки; ν_{rans} , ν_{sgs} – турбулентная вязкость для RANS и LES моделей соответственно; k – кинетическая энергия турбулентности.

Для работы с различными подобластями реализована специальная утилита, которая анализирует созданную с помощью сеточного генератора snappyHexMesh расчетную сетку, и сохраняет скалярное поле данных, где каждой ячейке сетки соответствует одно из трех значений: 1 – подобласть RANS, 0.5 – смешанная область, 0 – подобласть LES. Следует отметить, что для RANS методов, как правило, применяются устойчивые противоточные схемы, которые слишком диссипативны для LES. В свою очередь для метода LES необходимы низкодиссипативные схемы, которые могут быть неустойчивы в области RANS. Поэтому в выбранных подобластях целесообразно использовать различные схемы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОБТЕКАНИЯ ЛА С ТОРМОЗНЫМ ЩИТКОМ

Для примера применения реализованной гибридной методики расчета, совмещающей RANS и LES методы, проведено численное моделирование обтекания тормозного щитка, установленного на фюзеляж перспективного маневренного самолета (рис. 3). В качестве RANS модели турбулентности использовалась $k-\omega$ SST, для LES – модель одного дифференциального уравнения для подсеточной кинетической энергии. Область применения RANS и LES моделей задается начальными условиями. В данном случае необходимо точное моделирование отрыва потока с тормозного щитка и учет влияния вихрей на килевой стабилизатор. При этом течение в остальной области может быть получено при помощи RANS модели. Исходя из целесообразности использования той или иной модели турбулентности построена расчетная сетка с количеством $11 \cdot 10^6$ ячеек и дополнительным измельчением в области между тормозным щитком и килевым стабилизатором (для применения в ней LES подхода) (рис. 4).

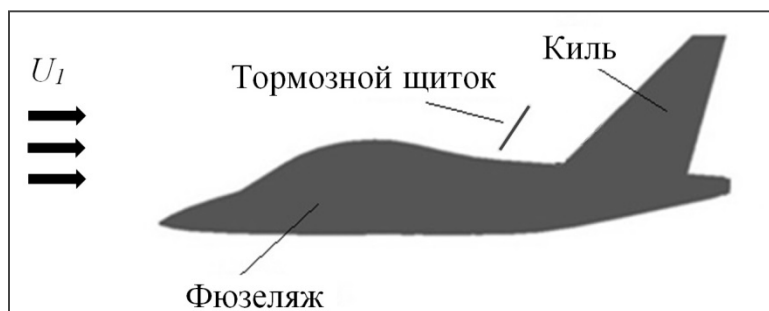


Рис. 3. Схема исследуемой модели ЛА с тормозным щитком

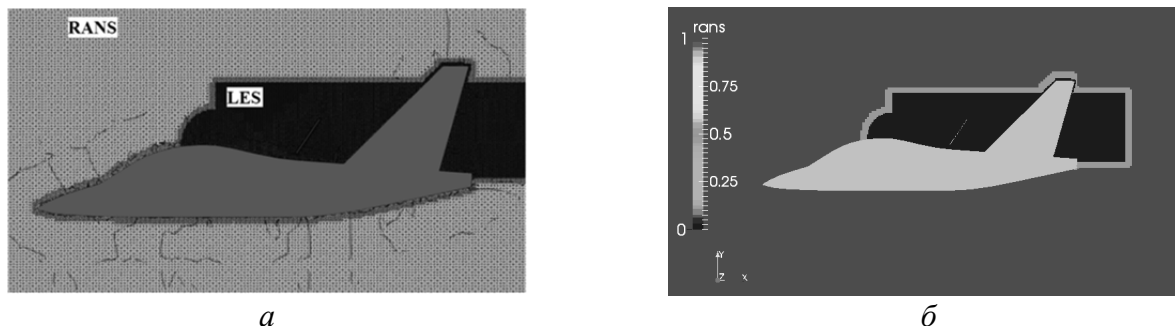


Рис. 4. Зонирование расчетной области:
а – расчетная сетка; б – массив данных для RANS и LES подобластей

Расчет проводился со следующими исходными данными: скорость набегающего потока $U_I = 50$ м/с, кинематическая вязкость $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, число Рейнольдса $Re = 1,5 \cdot 10^6$. Расчетный шаг по времени $\Delta t = 1,5 \cdot 10^{-6}$ с. На входе в расчетную область задавался модуль вектора скорости, который с каждым расчетным шагом увеличивался от $U_I = 0$ м/с до $U_I = 50$ м/с. Значения параметров модели турбулентности устанавливались исходя из степени турбулентности потока $Tu = 2$ %. На стенках тормозного щитка, килевого стабилизатора и фюзеляжа использовались условия прилипания и непроницаемости. Работа выполнена с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М.В. Ломоносова.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Получены аэродинамические характеристики ЛА с установленным тормозным щитком в зависимости от углов атаки $\alpha = -6^\circ, 0^\circ, 6^\circ, 12^\circ$ и различных моделей турбулентности (рис. 5, а).

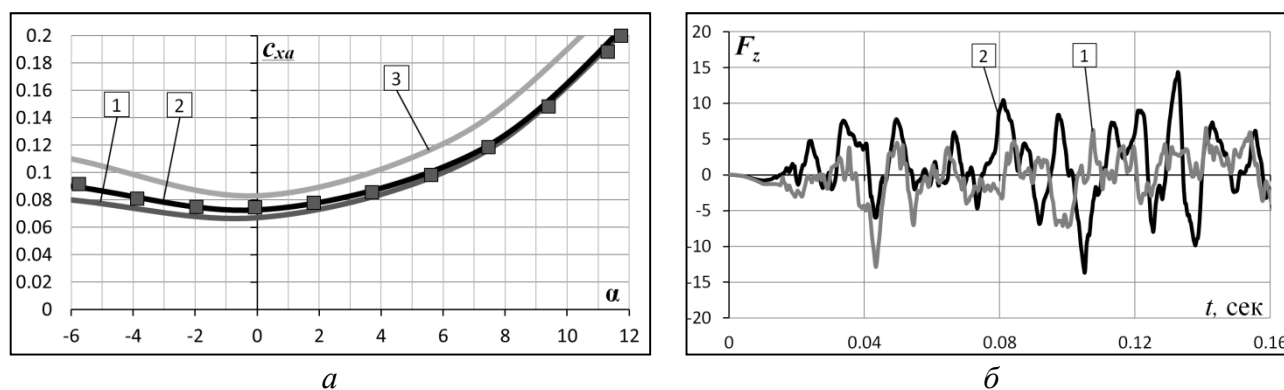


Рис. 5. Аэродинамические характеристики:
а – коэффициент лобового сопротивления ЛА в зависимости от углов атаки;
б – пульсации поперечной силы на киле; 1 – модель $k-\omega$ SST (RANS подход);
2 – реализованная гибридная методика; 3 – DDES подход; ■ – экспериментальные значения

Установлено, что DDES подход завышает значения аэродинамических характеристик. Это связано с использованием расчетной сетки, которая не соответствовала требованиям данного подхода. Увеличение количества ячеек приводит к улучшению качества сетки и к вычислительным затратам. RANS подход дает хорошие результаты при углах атаки больше 6° , при уменьшении же угла атаки погрешность возрастает до 12 %, что связано с особенностью обтекания тормозного щитка, установленного на фюзеляже ЛА при положительных и отрицательных углах атаки. На рис. 5, б представлены результаты расчета поперечной силы, действующей на киль ЛА. Видно, что реализованная гибридная методика дает хорошее совпадение аэродина-

мических характеристик на всем диапазоне углов атаки и корректно описывает эволюцию вихревых течений, в отличие от диссипативной RANS модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование реализованной методики совмещения RANS и LES подходов с применением зонирования расчетной области позволило получить структуры пространственного обтекания конфигурации ЛА и его аэродинамические характеристики. Применимость данного подхода к моделированию нестационарных вихревых течений дает возможность проводить детальный анализ обтекания ЛА с учетом бафтинговых эффектов при скоростях движения, соответствующих условиям несжимаемого потока.

Результаты проведенных в данной работе исследований по изучению различных методов моделирования вихревых нестационарных турбулентных течений газа позволяют говорить о принципиальной возможности применения методов математического моделирования и суперкомпьютерных технологий для решения широкого круга научных задач авиационной промышленности. В свою очередь, разработанный и реализованный зональный метод расчета позволяет, используя только утилиты пакета OpenFOAM и автоматический генератор сеток snappyHexMesh, с удовлетворительной точностью моделировать нестационарные турбулентные потоки газа, происходящие при обтекании тел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Breitsamter C., Schmid A.** Airbrake-Induced Fin-Buffer Loads On Fighter Aircraft // Journal of Aircraft. Vol. 45. No. 5 (2008). Pp. 1619-1630.
2. **Pettit C.L., Banford M., Brown D., Pendleton E.** Full-scale wind-tunnel pressure measurements on an F/A-18 tail during buffet. Journal of Aircraft, Volume 33. Number 6. November-December 1996. Pp. 1148-1156.
3. **Калугин В.Т., Епихин А.С.** Особенности расчета бафтинговых явлений при моделировании обтекания летательного аппарата с использованием открытого пакета OpenFOAM // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 212 (2). С. 32-37.
4. Возможности применения открытого пакета OpenFOAM для численного моделирования отрывных течений при до- и сверхзвуковых скоростях обтекания летательных аппаратов / В.Т. Калугин, А.Г. Голубев, А.С. Епихин, А.А. Мичкин // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 199 (1). С. 23-30.
5. **Калугин В.Т., Епихин А.С.** Численное моделирование нестационарных вихревых течений с использованием открытого пакета OpenFOAM // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 6. С. 21-24.
6. **Волков К.Н., Емельянов В.Н.** Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М.: Физматлит, 2008.
7. **Travin A., Shur M., Strelets M., Spalart P.R.** Physical and numerical upgrades in the detached-eddy simulation of complex turbulent flows // Proceedings of Euromech Coll. Les of complex transitional and turbulent flows, Munich, Germany. Kluwer, Dordrecht, 2002. Vol. 65. Pp. 239-254.
8. **Fröhlich J., von Terzi D.** Hybrid LES/RANS methods for simulation of turbulent flows, Progress in Aerospace Sciences. Vol. 44, Issue 5. 2008. Pp. 349-377.
9. **Comte-Bellot G., Corrsin S.** Simple Eulerian time correlation of full- and narrowband velocity signals in grid-generated "isotropic" turbulence // Journal of Fluid Mechanics. 1971. Vol. 48. Pp. 273-337.
10. **Головнев А.В.** Исследование аэродинамических характеристик модели маневренного самолета с механизированной передней кромкой крыла с помощью программного

комплекса *ANSYS FLUENT* / А.В. Головнев, А.Л. Тарасов // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 218. С. 42–49.

11. Spalart P.R., Strelets M.Kh., Garbaruk A.V., Grid Design and the Fate of Eddies in External Flows. In: Proc. of Workshop on Quality and Reliability of Large-Eddy Simulations II, 9–11 September, 2009, Pisa, Italy.

12. Шевчук И.В., Корнев Н.В. Опыт использования OpenFOAM для решения инженерных задач в университете Ростова. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.unicluster.ru/conf/2012/docs/203-experience-using-OpenFOAM-University-Rostock.pdf> (дата обращения 18.05.2014).

THE IMPLEMENTATION OF HYBRID METHODS FOR NUMERICAL SIMULATION FLOW ANALYSIS AROUND AN AIRCRAFT WITH THE USE OF OpenFOAM SOFTWARE PACKAGE

Epikhin A.S., Kalugin V.T.

The article describes the possibility of implementing the open source CFD software package OpenFOAM for aerodynamic characteristics calculation of aircraft taking into account the local turbulence flows. Computational simulation methods of turbulent flows were reviewed and it was recommended to use eddy-resolving approaches and to carry out the analysis of numerical schemes and constants of subgrid model for computational calculation of large scale vortex. The article contains recommendations how to use different turbulence models for numerical simulation of unsteady vortex flows. The analysis of numerical schemes was carried out by solving the problem of homogeneous isotropic turbulence decay on the bases of software package OpenFOAM and RANS-LES approach implementation. The method of combined implementation of RANS-LES approaches with the use of zonal RANS-LES methods were described and implemented in OpenFOAM software package. As an example of the hybrid RANS-LES approach the task of simulation flow field around an aircraft with airbrake at subsonic speed (50 m/s) has been tested. Flow structure has been obtained and compared with experimental data and other simulation methods.

Key words: OpenFOAM package; unsteady vortex flows; aircraft; airbrake; hybrid methods; combining RANS and LES approaches.

REFERENCES

1. Breitsamter C., Schmid A. Airbrake-Induced Fin-Buffer Loads On Fighter Aircraft. Journal of Aircraft. Vol. 45. No. 5 (2008). Pp. 1619–1630.

2. Pettit C.L., Banford M., Brown D., Pendleton E. Full-scale wind-tunnel pressure measurements on an F/A-18 tail during buffet. Journal of Aircraft. Volume 33. Number 6. November-December 1996. Pp. 1148–1156.

3. Kalugin V.T., Epikhin A.S. Computational modelling of buffeting effects using OpenFOAM software package. The MSTUCA Scientific Bulletin. 2015. Issue 212 (2). Pp. 32–37.

4. Kalugin V.T., Golubev A.G., Epikhin A.S., Michkin A.A. Applicability of the open source package openfoam for numerical modeling separated flow around an aircraft at subsonic and supersonic speeds. The MSTUCA Scientific Bulletin. 2014. Issue 199 (1). Pp. 23–30.

5. Kalugin V.T., Epikhin A.S. Numerical simulation vortex non-steady flow field using OpenFOAM software package. Automation. Modern technology. 2015. Issue 6. Pp. 21–24.

6. Volkov K.N., Emeljyanov V.N. Simulation of Large Eddies in Turbulent-Flow Calculations. Moscow: Phymathlit, 2008.

7. Travin A., Shur M., Strelets M., Spalart P.R. Physical and numerical upgrades in the detached-eddy simulation of complex turbulent flows. Proceedings of Euromech Coll. Les of complex transitional and turbulent flows, Munich, Germany. Kluwer, Dordrecht, 2002. Vol. 65. Pp. 239–254.

8. Fröhlich J., von Terzi D. Hybrid LES/RANS methods for simulation of turbulent flows. Progress in Aerospace Sciences. Vol. 44. Issue 5. 2008. Pp. 349–377.

9. Comte-Bellot G., Corrsin S. Simple Eulerian time correlation of full- and narrowband velocity signals in grid-generated “isotropic” turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 1971. Vol. 48, Pp. 273-337.

10. Golovnev A.V., Tarasov A.L. Research of aerodynamic characteristics of the model of maneuverable aircraft with mechanized leading edge using software ANSYS FLUENT. *The MSTUCA Scientific Bulletin*. 2015. Issue 218. Pp. 42–49.

11. Spalart P.R., Strelets M.Kh., Garbaruk A.V. Grid Design and the Fate of Eddies in External Flows. In: *Proc. of Workshop on Quality and Reliability of Large-Eddy Simulations II*, 9–11 September, 2009, Pisa, Italy.

12. Shevchuk I.V., Kornev N.V. URL: <http://www.unicluster.ru/conf/2012/docs/203-experience-using-OpenFOAM-University-Rostock.pdf> (data 18.05.2014).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Калугин Владимир Тимофеевич, д-р техн. наук, профессор кафедры Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Епихин Андрей Сергеевич, аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана.