

УДК 533.6.011: 629.7.01

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВИХРЕВОГО ПОТОКА НА ПРОФИЛЬ КРЫЛА

В.Т. КАЛУГИН, А.С. ЕПИХИН, С.В. СТРИЖАК

С помощью математического моделирования с использованием метода крупных вихрей проведено исследование по определению акустического шума, создаваемого системой цилиндр-профиль крыла в дозвуковом потоке. Проведено сравнение с результатами эксперимента, проведенного в безэховой камере.

Ключевые слова: моделирование, метод крупных вихрей, сетка, цилиндр, крыло, акустическая аналогия, частота, спектр, отрывное течение.

Введение

Проблемы неблагоприятного акустического воздействия авиационной техники на людей и окружающую среду, включающие проблемы снижения аэродинамического шума, уменьшения интенсивности звукового удара на местности от летательных аппаратов (ЛА), приобретают в последние годы все большую актуальность в связи с усилением борьбы за улучшение экологической ситуации [1]. Снижение шума в авиации и на транспорте является актуальной задачей. Как правило, источниками шума являются различные элементы ЛА (шасси, закрылки, каверны). При обтекании таких элементов возникают вихревые нестационарные турбулентные течения газа. Они являются источниками возмущений, распространяющихся в окружающей среде и создающих акустическое давление. Для определения и оценки уровня шума необходимо проводить эксперимент в безэховых камерах и математическое моделирование. Один из подходов в численном моделировании связан с гибридным методом моделирования. Гибридный метод включает в себя расчет вихревых нестационарных турбулентных течений газа на базе подходов LES, DES, RANS+LES, акустической аналогии для расчета акустических полей в дальнем поле и быстрого преобразования Фурье для получения спектра шума [2].

Моделирование и результаты расчета

Одной из эталонных задач в области вычислительной аэроакустики является расчет обтекания тела в форме цилиндр-профиль крыла (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения цилиндр-профиль крыла

Для данного примера существуют как результаты эксперимента с PIV, так и тестовые расчеты [3; 4]. Исходные данные по эксперименту, проведенному в аэродинамической трубе с безэховой камерой в The Ecole Centrale de Lyon, доступны в работе [3]. В ходе эксперимента были получены данные по значениям скорости, пульсациям скорости, давлению в контрольных точках, значениям частоты и SPL (Sound Pressure Level – уровень звукового давления) в различных точках, где были расположены микрофоны.

Для моделирования течения целесообразно использовать модель крупных вихрей. Крупномасштабные вихревые структуры за телом рассчитывались при помощи интегрирования фильтрованных уравнений Навье-Стокса. Для получения фильтрованных уравнений использовался коробочный фильтр. Мелкие вихри, размер которых не превышал шага расчетной сетки, моделировались с помощью модели на базе дифференциального уравнения для подсеточной кинетической энергии [5]. Для дискретизации уравнений использовался метод конечных объемов. Расчетная схема имеет второй порядок точности по пространству и времени. Основные этапы решения задачи включали:

- 1) построение STL поверхности;
- 2) построение расчетной сетки (утилита snappyHexMesh);
- 3) расчет в открытом пакете OpenFoam (решатель pisoFoam);
- 4) визуализацию результатов расчета в пакете Paraview.

Для расчета акустического давления и спектра шума использовалась ранее разработанная библиотека libAcoustics в составе пакета OpenFOAM. В основе данной библиотеки используется акустическая аналогия Керла и библиотека быстрого преобразования Фурье [6]. Адаптивная

сетка включала в себя шестигранники (рис. 2). Расчеты проводились для значений $c = 0,1$ м, $d = 0,01$ м, $V = 72$ м/с, $\rho = 1,2$ кг/м³, $\mu = 1,5 \times 10^{-5}$ Па·с, $Re_d = 4,8 \times 10^4$, $Re_c = 4,8 \times 10^5$, соответствующих эксперименту [3]. Виртуальные микрофоны (A, B, C) располагались на расстоянии $R = 1,85$ м, угол положения микрофонов θ задавался равным 60° , 90° , 120° (рис. 2). Размеры расчетной области выбирались равными $-0,44$ м \times $-0,56$ м \times 0 м и $1,24$ м \times $0,56$ м \times $0,8$ м относительно положения центра цилиндра. Количество ячеек 1,34 млн. (рис. 3).

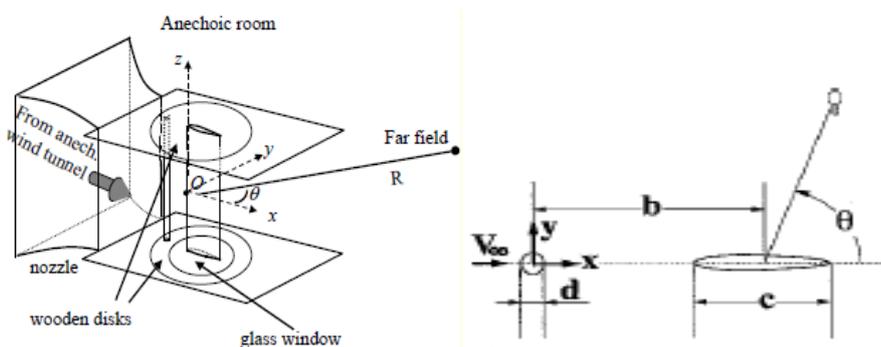


Рис. 2. Экспериментальная модель и расчетная область

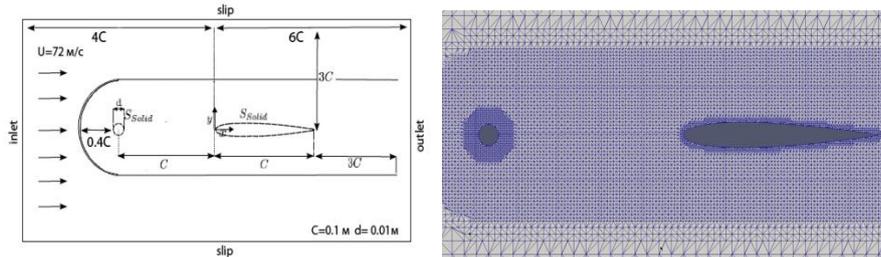


Рис. 3. Расчетная сетка и результаты расчета для цилиндра

На входе расчетной области на среднее значение скорости накладывались случайные возмущения в виде белого шума. На стенке задавались условия непротекания и прилипания. На выходе задавались условия продолжения потока или неотражающие граничные условия. В ходе расчета проводился анализ безразмерных величин x^+ , y^+ , z^+ и невязок. Расчетный шаг по времени выбирался равным $0,5 \times 10^{-6}$ с из соображений устойчивости решения. Общее время счета составило 0,2 с. В ходе расчета определялись значения коэффициентов продольной силы C_x и нормальной силы C_y для цилиндра и профиля крыла (рис. 4). Получено хорошее совпадение с результатами эксперимента [3].

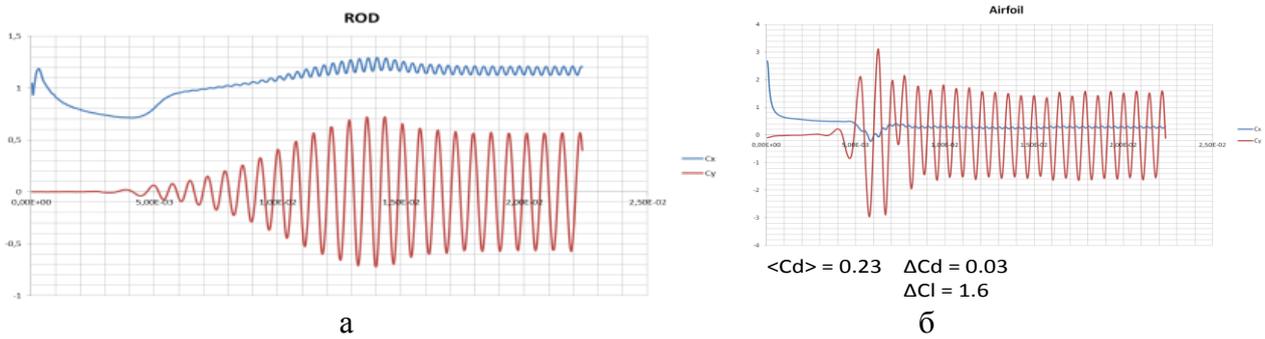


Рис. 4. Результаты расчета C_x , C_y для: а – цилиндра; б – профиля крыла

Q-изоповерхности характеризуют турбулентную вихревую отрывную структуру течения за цилиндром и профилем крыла [7]. За цилиндром образуется трехмерная турбулентная вихревая пелена, которая набегаёт на профиль крыла (рис. 5).

В результате турбулентный поток тормозится на кромке крыла, и образуется источник акустического звука. Авторы работ [3; 4] проводили исследования по определению уровня акустического шума в дальнем поле с использованием подходов URANS/LES/DES и акустической аналогии Фокса-Уильямса-Хокинга (FW-H). Результаты эксперимента и расчета представлены на рис. 6. Наиболее достоверные результаты получены с использованием модели LES и модели Смагоринского для подсчетной турбулентной вязкости. Максимальное значение SPL = 88 дБ.

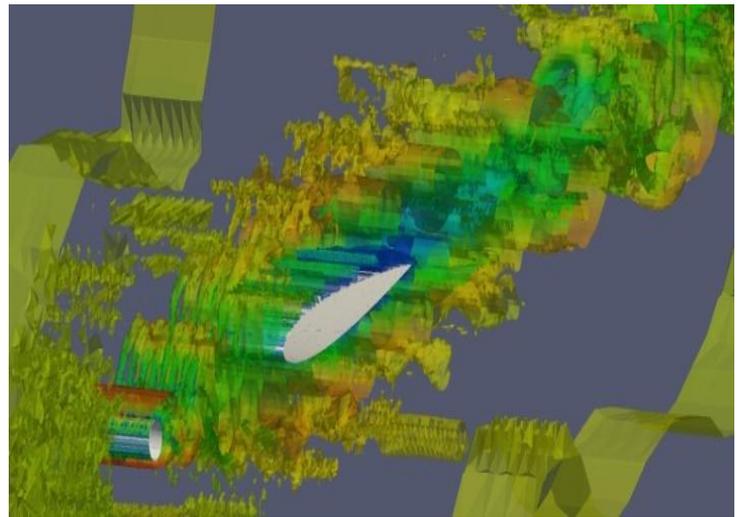


Рис. 5. Q-изоповерхности

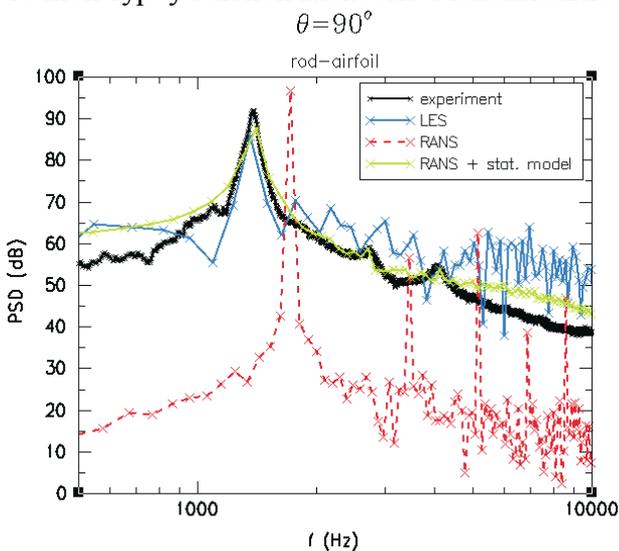


Рис. 6. Результаты эксперимента и расчета SPL для микрофона В по работе [3]

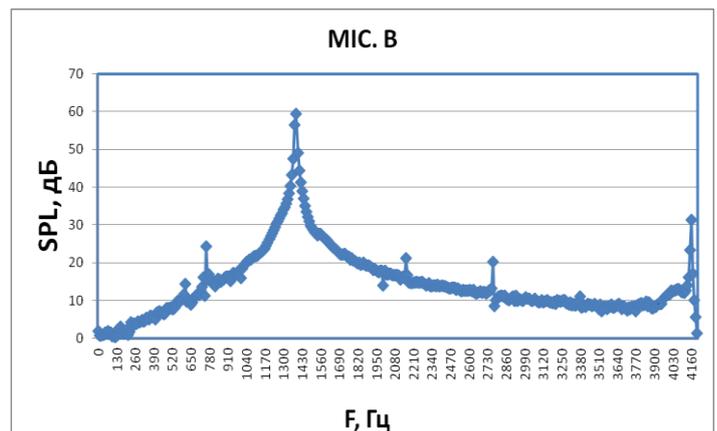


Рис. 7. Результаты расчета SPL для микрофона В

В результате расчета с использованием метода крупных вихрей и модели на базе дифференциального уравнения для подсчетной кинетической энергии получено хорошее совпадение для коэффициента продольной силы C_x , для цилиндра и профиля крыла по частоте ($F = 1380$ Гц), на которой наблюдается максимальное значение SPL (рис. 7).

Полученное значение числа Струхала $St = 0,2$ близко к экспериментальным значениям. При этом получено удовлетворительное совпадение по максимальному значению SPL, ошибка составила около 25 %. Для улучшения результатов необходимо провести дополнительные исследования по влиянию качества сетки, необходимо дальнейшее увеличение количества вычислительных ячеек по направлению Z. Также целесообразно расширить возможности разработанной ранее библиотеки libAcoustics и добавить акустическую аналогию Фокса-Уильямса-Хокинга (FW-H) для расчета SPL в дальнем поле [8]. Расчеты проводились с использованием вычислительных ресурсов web-лаборатории UniHUB (www.unihub.ru).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Копьев В.Ф.** Проблемы авиационной акустики, критичные при создании перспективных ВС с улучшенными экологическими характеристиками: тезисы докладов открытой всероссийской конференции по аэроакустике, 1-3 октября 2013. - Звенигород. - С. 5 – 8.
2. **Wagner C. et al.** Large-Eddy Simulation for Acoustics // N.Y.: Cambridge Univ. Press. 2007. P. 471.
3. **Jacob M. et al.** A rod-airfoil experiment as benchmark for broadband noise modeling // J. Theoret. Comput. Fluid Dynamics. 2005. Vol 19. PP. 171 – 196.
4. **V. Greschner et al.** Prediction of sound generated by a rod-airfoil configuration using EASM DES and the generalised Lighthill/FW-H analogy // Computers & Fluids. 2008. Vol. 37. PP. 402 – 413.
5. **Волков К.Н., Емельянов В.Н.** Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. - М.: Физматлит, 2008.
6. **Крапошин М.В., Сибгатуллин И.Н., Стрижак С.В.** Расчет параметров обтекания и акустического шума тандема цилиндров // Электронное научно-техническое изд. Наука и Образование. - Сентябрь 2013. - № 9. - С. 1 – 25.
7. **Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л.** Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учеб. пособие. - СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.
8. **Голдстейн М.Е.** Аэроакустика. - М.: Машиностроение, 1981.

PREDICTION OF NOISE FROM TURBULENT FLOW FOR AIRFOIL

Kalugin V.T., Epikhin A.S., Strijhak S.V.

The calculation of turbulent flow using LES model and prediction of sound generated by a rod-airfoil configuration was done using OpenFoam code and library libAcoustics. Good results are obtained for frequency and drag coefficients compared with results from experiment. The additional investigation need to be performed for improvement of SPL results.

Key words: turbulent flow, flow past cylinder, large eddy simulation, grid, rod-airfoil, acoustic analogy, frequency, SPL, open source code OpenFoam.

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 300 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 5 научных работ, область научных интересов – управление процессами обтекания и проектирование органов управления.

Стрижак Сергей Владимирович, 1970 г.р., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана (1993), кандидат технических наук, руководитель проектов ЗАО "Хьюлетт-Паккард АО", инженер МГТУ им. Н.Э. Баумана, автор 40 научных работ, область научных интересов – аэрогидродинамика и аэроакустика.