

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОНАЛЬНОГО ШУМА КВАДРОКОПТЕРА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ FLOWVISION

Д.В. Клименко<sup>1</sup>, А.В. Радостин<sup>2</sup>, С.Ф. Тимушев<sup>1</sup>,  
**А.В. Февральских<sup>2</sup>**, Д.К. Щеглов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Московский авиационный институт (НИИ), Москва,  
irico.harmony@gmail.com*

<sup>2</sup>*ООО «Тесис», Москва, a.fevralskih@gmail.com*

<sup>3</sup>*Акционерное общество «Северо-Западный региональный центр  
Концерн ВКО «Алмаз-Антей» - Обуховский завод»,  
Санкт-Петербург, dou@goz.ru*

Развитие интереса к легким беспилотным летательным аппаратам стимулирует потребность в моделировании акустических характеристик этого вида техники. Особенно важным являются такие расчеты для различных компоновок летательного аппарата с несколькими винтами.

В работе представлены результаты апробации новых возможностей для выполнения акустических расчетов с использованием программного комплекса FlowVision на примере тонального шума квадрокоптера. Методика расчета основана на акустико-вихревой декомпозиции уравнений движения сжимаемой среды. Предлагаемый метод акустико-вихревой декомпозиции базируется на математически строгом преобразовании уравнений движения сжимаемой среды, которое приводит к неоднородному волновому уравнению относительно пульсаций энтальпии с источником членом, зависящим от поля скоростей вихревой моды. Возмущения давления в ближнем поле при этом рассматриваются как сумма акустических пульсаций и псевдозвука.

Расчет состоит из двух этапов. На первом этапе выполняется численное моделирование аэродинамики вращающегося пропеллера, по результатам которого накопленная информация о распределении амплитудно-частотных характеристик «гидродинамического источника звука» вблизи пропеллера (рисунок 1) сохраняется в файл, который используется на втором этапе расчета – в ходе решения волнового акустического уравнения.

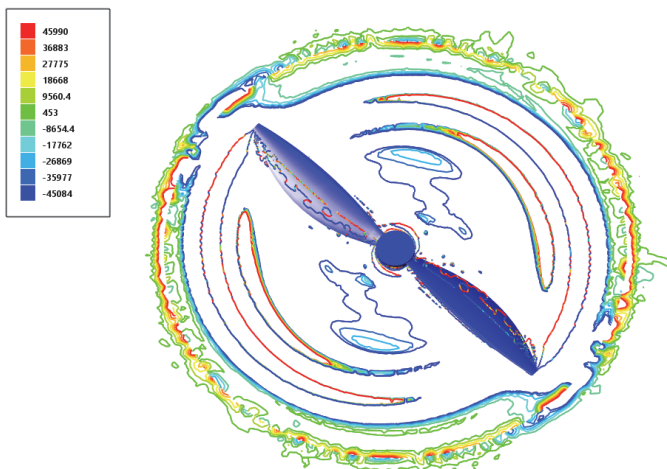


Рис. 1. Мгновенные изолинии переменной «гидродинамический источник звука» по результатам численного моделирования в программном комплексе FlowVision

В ходе решения задачи определены аэродинамические и акустические характеристики одиночного пропеллера APC Slow Flyer 10x4,7, получено отличное согласование значений коэффициентов тяги и мощности, определенных по результатам численного моделирования, с опорными данными. Это косвенно указывает на достоверность результатов определения характеристик акустического источника. Для решения задачи о прогнозировании уровня тонального шума квадрокоптера в последующих акустических расчетах используется конфигурация из сохраненных копий акустического источника одиночного пропеллера, разнесенных в пространстве.

Возможности разработанного подхода демонстрируются на примере серии акустических расчетов шумовых характеристик компоновки квадрокоптера при различных вариантах взаимного расположения источников и их фазовых характеристик.

## Литература

1. Тимушев С.Ф. Численное моделирование нестационарных гидродинамических процессов в центробежных насосах и вентиляторах с целью снижения их виброактивности и шума: диссертация ... доктора технических наук. – Москва, 1995, 145 с.
2. J.V. Brandt, M.S. Selig. Small-Scale Propeller Performance at Low Speeds – Online Database. <https://mseelig.ae.illinois.edu/props/volume-1/propDB-volume-1.html>, 2010.
3. Аксенов А.А., Тимушев С.Ф., Клименко Д.В., Федосеев С.Ю. Применение акустико-вихревого метода для моделирования шума пропеллера мультикоптера. Математическое моделирование, 2023, т.35, № 6, с. 14-36.