

УДК: 534.2
ОЕСД: 1.03

Влияние взаимного положения винтов гексакоптера на излучаемую звуковую мощность

Кривун К.В.^{1*}, Тимушев С.Ф.²

¹ Студент

² Д.т.н., профессор кафедры 202

^{1,2} Московский авиационный институт (НИУ), г. Москва, РФ

Аннотация

Мультикоптеры стали чрезвычайно популярными и используются в самых разных областях, от наблюдения за дорожным движением или пожарной обстановкой до раздачи Интернета или холодных напитков. Бесшумность и эффективность винтовой двигательной установки являются критическими аспектами современных беспилотных летательных аппаратов. Развитие этого направления авиационной техники в условиях ужесточения норм по шуму невозможно без эффективных методов оптимизации, работающих совместно с системами автоматизированного проектирования. В данной статье рассматривается программное обеспечение, основанное на методе расчета звукообразования и шумоизлучения винта дрона с учетом разложения вихревой и акустической мод в дозвуковом изоэнтропическом потоке. Возможности метода продемонстрированы на примерах отдельного ротора и конфигурации гексакоптер в режиме висения над землей. Представлено сравнение двух конфигураций с одинаковой геометрией винта по излучаемой звуковой мощности и аэродинамическим параметрам.

Ключевые слова: звук, вихрь, декомпозиция, мультикоптер, винт.

Effect of the hexacopter propellers' mutual position on the emitted sound power

Krivun K.V.^{1}, Timushev S.F.²*

¹ Student

² DSc., professor of the department 202

^{1,2} Moscow Aviation Institute (NRU), Moscow, Russia

Abstract

Multicopters have become extremely popular and are used in areas ranging from monitoring traffic or fire conditions to distributing the Internet or cold drinks. The noiselessness and efficiency of a propeller propulsion system are critical aspects of modern unmanned aerial vehicles. The development of this area of aviation technology in the context of tightening noise standards is impossible without effective optimization methods that work in conjunction with computer-aided design systems. This article discusses software based on a method for calculating sound generation and noise emission by a drone propeller, taking into account the decomposition of the vortex and acoustic modes in a subsonic isentropic flow. The possibilities of the method are demonstrated in the examples of a separate rotor and hexa configuration in the mode of hovering above the ground. Comparing two configurations with the same propeller geometry in terms of emitted sound power and aerodynamic parameters are presented.

Keywords: *sound, vortex, decomposition, multicopter, propeller.*

*E-mail: krivun0200@mail.ru (Кривун К.В.)

Введение

В последние десять лет мультикоптеры стали широко применяться во многих областях, однако беспилотные летательные аппараты создают шум, который раздражает население [1-4] и оказывает отрицательное воздействие на здоровье людей [5, 6]. Необходимость снижения шума и разработки соответствующих стандартов диктует необходимость новых исследований для понимания природы генерации шума гексакоптера и поиска оптимальных конструктивных решений [7]. Об этом говорят регулярно проводимые в США и Западной Европе конференции по шуму мультикоптеров (дронов) [8, 9]. В шуме гексакоптеров с электроприводом преобладает шум винта, используемого в его двигательной установке. Спектр акустического сигнала винта включает широкополосную компоненту и доминирующие над ней дискретные составляющие, проявляющихся на частотах, кратных частоте следования лопастей. Таким образом, шум винта можно разделить на гармонический, который появляется в [10, 11] в виде сигнала с основной частотой следования лопастей (ЧСЛ), широкополосный и узкополосный случайный шум [12].

Тестирование и прогнозирование шума винтов для различных конфигураций мультикоптеров являются очень активными областями исследований.

В вычислительной акустике лопаточных машин доминируют методы, основанные на применении так называемой аэроакустической аналогии, включая уравнение Лайтхила [13], и учет влияния твердых границ в области источника, представленный в работах Керла [14], Флоукс-Уильямса и Хоукинса [15]. Для расчета аэродинамического шума лопаточных машин в аэроакустической аналогии было сформулировано применение теоремы Кирхгофа [16].

Уравнение Лайтхила изначально получено для малых пульсаций давления в мелкомасштабной турбулентности, в то время как при обтекании лопастей винтов образуются крупномасштабные вихревые возмущения, которые генерируют акустическое излучение в каскадном процессе распада на мелкие вихри [17].

При разработке расчетного метода учитывается, что колебания параметров основного течения вызывают появление акустических возмущений, распространяющихся со скоростью звука в рабочей среде. В то же время возмущения основного течения распространяются со скоростью потока воздуха. Последнюю форму нестационарного движения называют «псевдозвуком» [18] или вихревой модой [19, 20].

В данной статье проводится сравнительный анализ гармонического шума двух конфигураций гексакоптера и одиночного винта на режиме висения.

1. Акустико-вихревой метод

Акустико-вихревой метод основан на работах Блохинцева, Ландау, Кроу [21] и Артамонова [22]. Производится декомпозиция поля скоростей и пульсаций давлений на вихревую (псевдозвук) и акустическую моду с последующей линеаризацией уравнений движения в дозвуковом изоэнтропическом течении. Метод был подробно протестирован на базе экспериментальной модели – воздушного насоса [23]. Проведены предварительные работы по созданию однопроцессорной версии ПО, которое реализует аналогичный метод для трехмерных течений в лопаточных машинах. Результаты расчетов получены для дискретных компонент ЧСЛ в осевом вентиляторе [24-26] и шнекоцентрбежном насосе [27].

В качестве основной физической причины нестационарного процесса генерирования звука винтом гексакоптера на частотах следования рабочих лопаток рассматривается перенос вихревых возмущений, которые возникают в результате

движения периодически неоднородного потока с окружной скоростью ротора.

Записываем поле скоростей в форме [28]:

$$V = U + \nabla\varphi = U + V_a \quad (1)$$

Здесь U – скорость вихревой моды, φ – акустический потенциал, V_a – акустическая скорость. В результате линеаризации уравнений движения сжимаемой среды получаем волновое уравнение колебаний энтальпии потока (a_0 – скорость звука в невозмущенной среде):

$$\frac{1}{a_0^2} \frac{d^2 h}{dt^2} - \Delta h = s. \quad (2)$$

Функция источника s в уравнении (2) является пульсацией функции S , которую можно получить из поля скоростей вихревой моды:

$$S = \nabla \cdot (U \nabla U) = \nabla \cdot \left(\frac{1}{2} \nabla U^2 - U \cdot \nabla \cdot U \right). \quad (3)$$

Пренебрегая конвективными членами в уравнении (2), в декартовой системе координат получаем:

$$\frac{1}{a_0^2} \frac{\partial^2 h}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = s \quad (4)$$

$$S = 2 \left(\frac{\partial U_y}{\partial x} \cdot \frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial x} \cdot \frac{\partial U_x}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial y} \cdot \frac{\partial U_y}{\partial z} - \frac{\partial U_x}{\partial x} \cdot \frac{\partial U_y}{\partial y} - \frac{\partial U_x}{\partial x} \cdot \frac{\partial U_z}{\partial z} - \frac{\partial U_y}{\partial y} \cdot \frac{\partial U_z}{\partial z} \right). \quad (5)$$

Для решения уравнения (4) используется маршевый метод [29] в комплексной арифметике для каждой гармоники ЧСЛ.

Учет фазовых характеристик акустических волн производится с использованием локального комплексного акустического импеданса Z , при этом граничное условие для k – гармоники ЧСЛ задано в виде:

$$\frac{\partial(h_k - g_k)}{\partial n} = -\frac{1}{a_0 Z_k} \frac{\partial(h_k - g_k)}{\partial t}, \quad (6)$$

где k – номер гармоники ЧСЛ, n – нормаль к границе, g – пульсация энтальпии вихревой моды.

В уравнении (2) источник шума выделяется в результате строгих математических преобразований. Такой подход убирает условности, связанные с определением источника акустических волн в методе аэроакустической аналогии и гарантирует, что численное моделирование адекватно отражает источник акустических колебаний.

Уравнение (4) решается в два этапа. На первом этапе производится расчет вихревой моды – нестационарного течения в модели несжимаемой среды (уравнения Навье-Стокса и $k - \varepsilon$ модель турбулентности [30] с граничными условиями в форме пристеночных функций).

После достижения сходимости к квазистационарному периодическому решению определяется источниковая функция. На втором этапе решается неоднородное волновое уравнение для определения пульсаций энтальпии h .

2. Расчетное исследование

2.1. Предмет исследования

Расчетное исследование проведено для винта Parrot Mambo Drone. Диаметр винта 70 мм, частота вращения 12000 об/мин.

Рассматриваются две конфигурации с шестью винтами (конфигурация винтов «Гекса») в сравнении с отдельным винтом в режиме висения. Винты помещены в расчетную область в форме полусферы радиусом 5 м. Нижняя часть полусферы моделирует твердую абсолютно отражающую поверхность.

Плоскость вращения винта, показанная сечением со стрелкой на рисунке 1, расположена на расстоянии 1.5 м от твердой поверхности.

Используется однопроцессорная версия программного обеспечения, созданного на базе пакета FlowVision 2.5x.

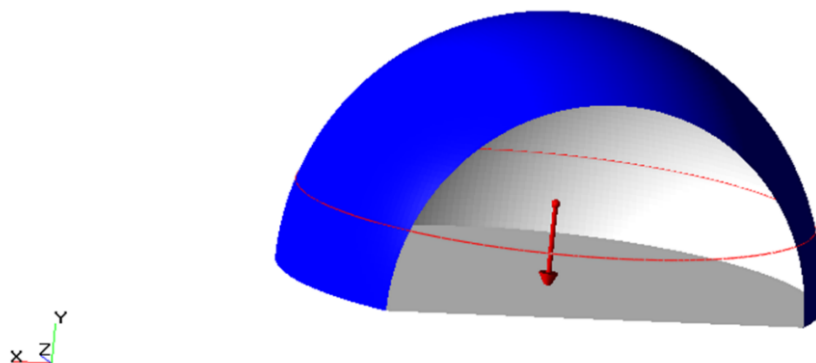


Рис. 1. Расчетная область

2.2. Конечно-разностная сетка и граничные условия

Начальная сетка образована прямоугольными (кубическими) ячейками с размером грани 0.1667 м. Этот размер обеспечивает свыше пяти ячеек сетки на длину волны первой гармоники ЧСЛ лопастей винта.

Вблизи винта проводится адаптация (измельчение) узлов сетки, при этом каждая ячейка первоначальной сетки делится на восемь ячеек, образуя сетку первого уровня. Дальнейшее измельчение приводит к сетке второго уровня и т.д. В данной работе использовались сетки до 7-го уровня адаптации вблизи винтов. Прилегающая к области винтов сетка имеет шестой уровень адаптации. На рисунке 2 показана адаптированная сетка для конфигурации Гекса.

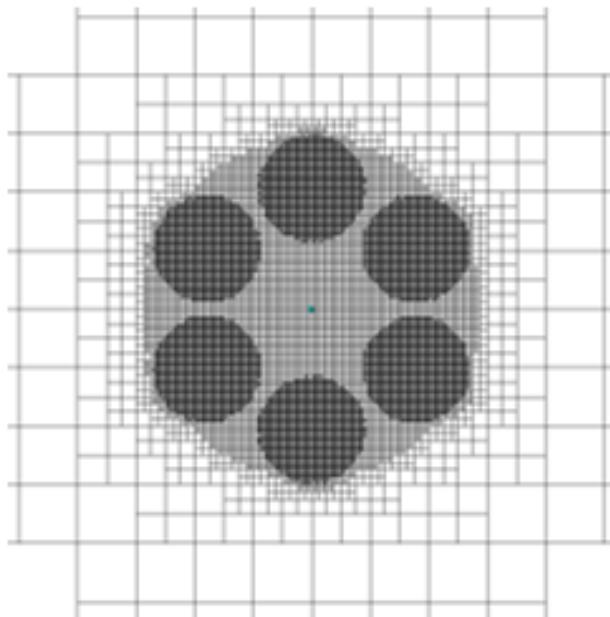


Рис. 2. Адаптация сетки вблизи шести винтов, вид в плане

На «воздушной» границе полусферы задается условие нулевого давления (относительно «опорного» атмосферного давления) и нулевых градиентов скорости. На «твердой» границе задан логарифмический профиль скорости при шероховатости 1000 мкм. На поверхности винта также задан логарифмический закон для профиля скорости с нулевой шероховатостью.

На твердой границе задан бесконечный акустический импеданс. На воздушной границе акустический импеданс равен акустическому сопротивлению $Z = \rho \cdot a_0$.

2.3. Результаты расчета параметров вихревой моды

Расчеты проведены «методом подвижного тела» — в процессе расчета винт поворачивается, моделируя реальное вращение. На рисунке 3 приведено характерное распределение мгновенного поля давления и скорости в плоскости, прилегающей к плоскости вращения винта (7 мм над лопастями винтов), которое показывает существенную неоднородность давления, обусловленную вихревым характером обтекания лопастей потоком.

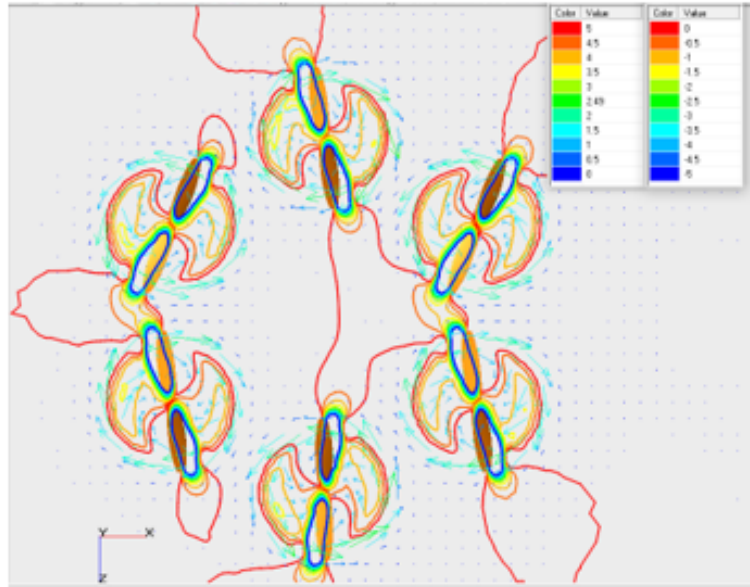


Рис. 3. Мгновенное поле давления и скорости над плоскостью вращения винтов для первой схемы положения винтов Гекса, м/с, Па

Мгновенное поле давления в меридиональной плоскости имеет неоднородность на два порядка ниже, чем в плоскости вращения винта, поэтому источник гармонических пульсаций ЧСЛ определяется в основном распределением давления на лопастях винта. Структура источника S , который определяется формулой (5), ранее уже была описана в [28].

2.4. Результаты расчета акустической моды

2.4.1. Акустического поле отдельного винта

В постпроцессорной обработке результатов расчетов определялась средняя интенсивность звука I на поверхности полусферы и излучаемая звуковая мощность Π по формулам:

$$I = \frac{A^2}{2\rho a_0}. \quad (7)$$

Здесь A – амплитуда гармоники ЧСЛ, ρ_0 и a_0 – плотность и скорость звука в невозмущенной среде. Интегрирование интенсивности производится по поверхности полусферы F :

$$\Pi = 10 \lg \left(\frac{\iint F IdF}{10^{-12}} \right) \text{ дБ}. \quad (8)$$

Важно отметить, что в плоскости вращения фиксируется устойчивая структура поля в виде квази-спиральных мод источника квадрупольного типа. Распределение амплитуды акустического давления существенно меняется в зависимости от расстояния до винта. Вблизи винта это обусловлено затуханием колебаний вихревой моды. В плоскости вращения винта, при увеличении расстояния до 10 – 20 его диаметров, амплитуда колебаний снижается в 100 раз. Таким образом, влияние конфигурации винтов гексакоптера на акустическое поле обусловлено интерференцией вихревых источников, то есть гидродинамическое взаимодействие с учетом их взаимного положения [31, 32], а также интерференции в ближнем звуковом поле.

2.4.2. Результаты расчета акустического поля для двух разных взаимных положений винтов в конфигурации Гекса (Hexa)

Источниковая функция гармонического шума ЧСЛ отдельного винта представляет собой две соосных, вращающихся вместе с ротором, вихревые зоны. Для снижения генерации шума необходимо снизить интерференцию этих зон. Рассмотренное взаимное положение винтов показано на рисунке 4.

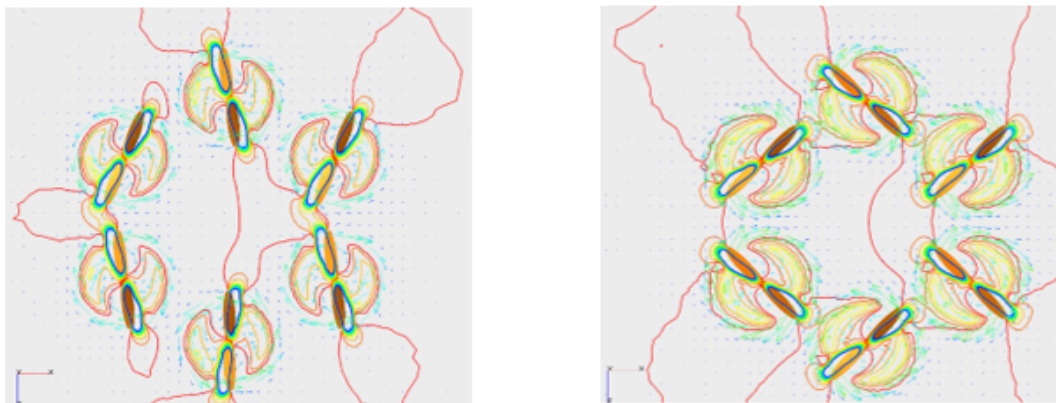


Рис. 4. Варианты взаимного положения винтов (слева – положение 1, справа – положение 2)

На рисунках 5 и 6 представлены сравнительные результаты поля акустического давления в плоскости вращения и распределения первой гармоники амплитуды ЧСЛ на боковой поверхности сферической области расчета.

Результаты расчета звуковой мощности для двух вариантов взаимного расположения винтов в конфигурации Гекса (Hexa) сведены в таблицу 1, откуда видно, что разница в звуковой мощности двух рассмотренных вариантов составляет 4 дБ.

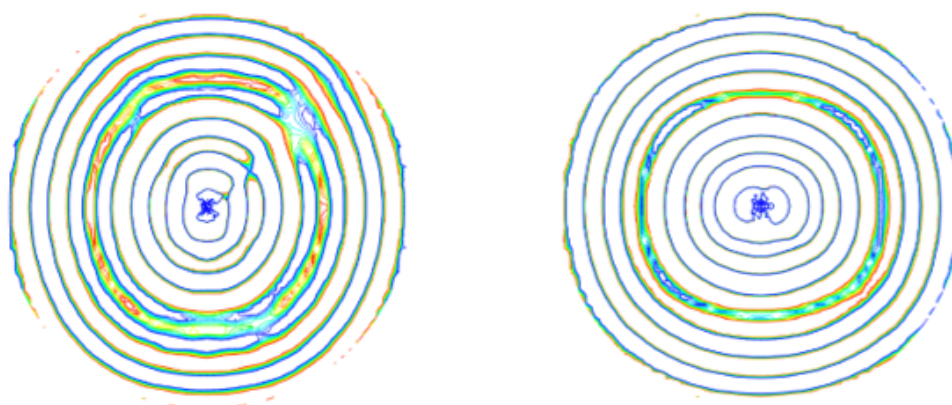


Рис. 5. Акустическое давление в плоскости вращения, шкала $+0.0025/-0.0025$ Па (слева – положение 1, справа – положение 2)

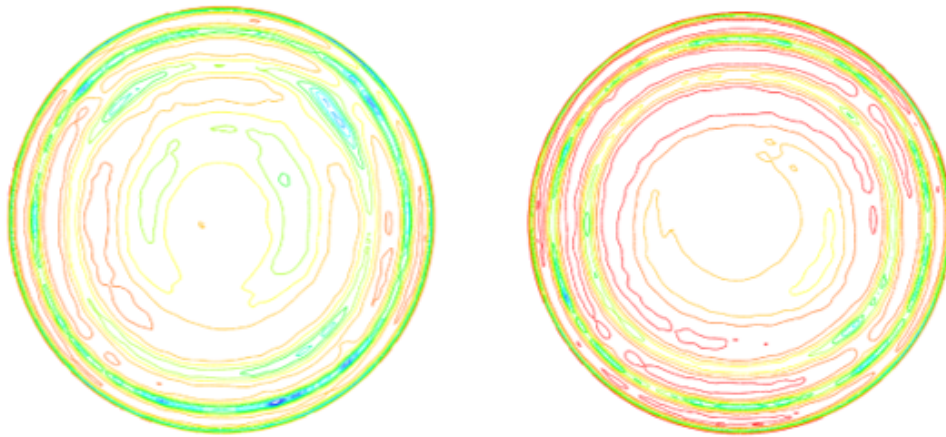


Рис. 6. Амплитуда первой гармоники ЧСЛ на сфере, шкала 55/25 дБ
(слева – положение 1, справа – положение 2)

Таблица 1

Излучаемая звуковая мощность

Конфигурация	Звуковая мощность, дВ
Отдельный винт	44
Гекса 1	50
Гекса 2	54

Заключение

Продемонстрировано использование акустико-вихревой декомпозиции с решением волнового уравнения прямым методом для моделирования шума винтов гексакоптера в режиме висения.

Мульти-роторные схемы дают повышение звуковой мощности первой гармоники ЧСЛ на 6-10 дБ по сравнению с одним ротором.

Изменение взаимного положения винтов позволяет снизить звуковую мощность ЧСЛ на 4 дБ.

Список литературы

1. “ABCNews: Whining drones bringing burritos and coffee are bitterly dividing Canberra residents.” <https://www.abc.net.au/news/2018-11-09/noise-from-drone-delivery-service-divides-canberra-residents/10484044>. Accessed: 11-03-2019.
2. “BBC News: Why your pizza may never be delivered by drone.” <https://www.bbc.com/news/business-46483178>. Accessed: 11-03-2019.
3. P.A Moshkov., V.F. Samokhin, A.A. Yakovlev «Selection of an audibility criterion for propeller driven unmanned aerial vehicle» // Russian Aeronautics. 2018. Vol. 61. No. 2. pp. 149-155. DOI: 10.3103/S1068799818020010

4. P. Moshkov, N. Ostrikov, V. Samokhin, A. Valiev «Study of Ptero-G0 UAV Noise with Level Flight Conditions» // 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2019. AIAA Paper No. 2019-2514. <https://doi.org/10.2514/6.2019-2514>
5. E. Franssen, Van C. Wichen, N. Nagelkerke and E. Lebret, “Aircraft Noise Around a Large International Airport and Its Impact on General Health and Medication Use,” *Occupational and Environmental Medicine*, Vol. 61, No. 5, 2004, pp. 405–413.
6. H. Swift, “A Review of the Literature Related to Potential Health Effects of Aircraft Noise,” Partnership for Air Transportation Noise and Emissions Reduction, Massachusetts Inst. of Technology PARTNERCOE-2010-003, Cambridge, MA, July 2010.
7. N. Kloet, S. Watkins, and R. Clothier «Acoustic signature measurement of small multi-rotor unmanned aircraft systems» *International Journal of Micro Air Vehicles*, vol. 9, pp. 3–14, Feb. 2017.
8. Andrey Aksenov, Petr Moshkov, Alexey Yakovlev, Dmitry Klimenko, Sergey Fedoseev Application of Acoustic-Vortex Decomposition for Numerical Simulation of Drone Propeller Noise. QUIET DRONES Second International e-Symposium 27th to 30th June 2022
9. Sergey Timushev, Alexey Yakovlev, Dmitry Klimenko, Andrey Aksenov, Vladimir Gavriluk, Pyotr Moshkov CFD-CAA Approach for Sound Generation and Propagation in the UAV Propeller With Subsonic Flow Quiet Drones. International e-Symposium on UAV/UAS Noise Remote from Paris – 19th to 21st October 2020
10. Abhishek Kumar Sahai “Consideration of aircraft noise annoyance during conceptual aircraft design” (PhD thesis) June 2016 <http://publications.rwth-aachen.de/record/668901>. Accessed: 27-02-2020.
11. C. E. Tinney and J. Sirohi “Multicopter Drone Noise at Static Thrust,” *AIAA Journal*, vol. 56, pp. 2816–2826, July 2018
12. B. Magliozzi, D. B. Hanson, and R. K. Amiet, “Propeller and Propfan Noise,” *Aeroacoustics of Flight Vehicles: Theory and Practice*, edited by H. H. Hubbard, Vol. 1, NASA Reference Publ. 1258, Hampton, VA, 1991, pp. 1–64.
13. M.J. Lighthill 1952 *Proceedings of the Royal Society, London A* 211, 564-587. On sound generated aerodynamically. Part I. General Theory
14. N. Curle The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound. *Proc. Royal Soc. A* 231, p.505-514, 1955
15. J. E. Ffowcs -Williams and D. L. Hawkings , “Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 264, No. 1151, 1969, pp. 321–342. doi:10.1098/rsta.1969.0031
16. F. Farassat and M.K. Myers «Extension of Kirchhoff’s formula to radiation from moving surfaces». *Journal of Sound and Vibration* 123, 451-461 1988.
17. А. Н. Колмогоров Уравнения турбулентного движения несжимаемой жидкости. *Изв. АН СССР, сер. физ.*, 6, №1–2, 56-58, 1942.
18. Д. И. Блохинцев Акустика неоднородной движущейся среды. М.: Наука, 1986
19. М.Е. Голдстейн Аэроакустика. М.: Машиностроение, 1981.
20. Е.П. Столяров Возбуждение звука малыми возмущениями энтропии и завихренности в пространственно неоднородных течениях сжимаемого идеального газа.- В кн. Акустика турбулентных потоков. М.: Наука, 1983
21. S.C. Crow Aerodynamic Sound Emission as a Singular Perturbation Problem.- *Studies in Applied Mathematics*, 1970, vol. XLIX, No.1.
22. К.И. Артамонов Термогидроакустическая устойчивость. М.:Машиностроение, 1982. – 261С.
23. S. Timouchev, J. Tourret, Numerical Simulation of BPF Pressure Pulsation Field In

Centrifugal Pumps. 19th International Pump Users Symposium, Houston, Texas (USA) 25-28 Feb 2002. Proceedings, pp.85-105

24. Serguei Timouchev, Anatoly Nedashkovsky, Goran Pavic Experimental Validation of Axial Fan 3D Acoustic-Vortex Method CFD-CAA Study. Proceedings of 3rd International symposium on Fan Noise 2007, 19-21 September 2007, Lyon, France

25. А. А. Аксенов, В. Н. Гаврилюк, С. Ф. Тимушев Численное моделирование тонального шума вентиляторов компьютерных устройств и систем кондиционирования. Акустический Журнал, 2016, том 62, № 4, с. 442–450

26. Тимушев С.Ф., Гаврилюк В.Н., Аксенов А.А., Клименко Д.В. Моделирование источника и акустического поля тонального шума лопаточных машин Noise. Theory and practice. Том 3 №3 (III, 2017)

27. Sergey F Timushev, Dmitry V Klimenko, «Computation of BPF pressure pulsations in the LRE screw-centrifugal pump with 3D acoustic-vortex method», INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 2553, 4157- 4165, 2017, Institute of Noise Control Engineering.

28. А. А. Аксенов, С. Ф. Тимушев, Д. В. Клименко, С. Ю. Федосеев Применение акустико-вихревого метода для моделирования шума пропеллера мультикоптера. Математическое моделирование, т.33, 2023. (В печати)

29. K.J. Baumeister Time-dependent difference theory for noise propagation in a two-dimensional duct.- AIAA Paper, 1980, No.80-0098, 7 p.

30. Wilcox, D. C., (1994) “Turbulence modeling for CFD” // DCW Industries, Inc. 460p.

31. Richard Healy Matthew Misiorowski Farhan Gandhi A Systematic CFD-Based Examination of Rotor-Rotor Separation Effects on Interactional Aerodynamics for Large eVTOL Aircraft. Presented at the Vertical Flight Society 75th Annual Forum & Technology Display, Philadelphia, Pennsylvania, May 13–16, 2019.

32. Brendan Smith, Farhan Gandhi, Robert Niemiec A Comparison of Multicopter Noise Characteristics with Increasing Number of Rotors/ Presented at the Vertical Flight Society’s 76th Annual Forum & Technology Display, Virginia Beach, Virginia, October 6-8, 2020.

References

1. “ABCNews: Whining drones bringing burritos and coffee are bitterly dividing Canberra residents.” <https://www.abc.net.au/news/2018-11-09/noise-from-drone-delivery-service-divides-canberra-residents/10484044>. Accessed: 11-03-2019.

2. “BBC News: Why your pizza may never be delivered by drone.” <https://www.bbc.com/news/business-46483178>. Accessed: 11-03-2019.

3. P.A Moshkov., V.F. Samokhin, A.A. Yakovlev «Selection of an audibility criterion for propeller driven unmanned aerial vehicle» // Russian Aeronautics. 2018. Vol. 61. No. 2. pp. 149-155. DOI: 10.3103/S1068799818020010

4. P. Moshkov, N. Ostrikov, V. Samokhin, A. Valiev «Study of Ptero-G0 UAV Noise with Level Flight Conditions» // 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2019. AIAA Paper No. 2019-2514. <https://doi.org/10.2514/6.2019-2514>

5. E. Franssen, Van C. Wichen, N. Nagelkerke and E. Lebet, “Aircraft Noise Around a Large International Airport and Its Impact on General Health and Medication Use,” Occupational and Environmental Medicine, Vol. 61, No. 5, 2004, pp. 405–413.

6. H. Swift, “A Review of the Literature Related to Potential Health Effects of Aircraft Noise,” Partnership for Air Transportation Noise and Emissions Reduction, Massachusetts Inst. of Technology PARTNERCOE-2010-003, Cambridge, MA, July 2010.

7. N. Kloet, S. Watkins, and R. Clothier «Acoustic signature measurement of small multi-rotor unmanned aircraft systems» *International Journal of Micro Air Vehicles*, vol. 9, pp. 3–14, Feb. 2017.
8. Andrey Aksenov, Petr Moshkov, Alexey Yakovlev, Dmitry Klimenko, Sergey Fedoseev Application of Acoustic-Vortex Decomposition for Numerical Simulation of Drone Propeller Noise. QUIET DRONES Second International e-Symposium 27th to 30th June 2022
9. Sergey Timushev, Alexey Yakovlev, Dmitry Klimenko, Andrey Aksenov, Vladimir Gavriyuk, Pyotr Moshkov CFD-CAA Approach for Sound Generation and Propagation in the UAV Propeller With Subsonic Flow Quiet Drones. International e-Symposium on UAV/UAS Noise Remote from Paris – 19th to 21st October 2020
10. Abhishek Kumar Sahai “Consideration of aircraft noise annoyance during conceptual aircraft design” (PhD thesis) June 2016 <http://publications.rwth-aachen.de/record/668901>. Accessed: 27-02-2020.
11. C. E. Tinney and J. Sirohi “Multirotor Drone Noise at Static Thrust,” *AIAA Journal*, vol. 56, pp. 2816–2826, July 2018
12. B. Magliozzi, D. B. Hanson, and R. K. Amiet, “Propeller and Propfan Noise,” *Aeroacoustics of Flight Vehicles: Theory and Practice*, edited by H. H. Hubbard, Vol. 1, NASA Reference Publ. 1258, Hampton, VA, 1991, pp. 1–64.
13. M.J. Lighthill 1952 *Proceedings of the Royal Society, London A* 211, 564-587. On sound generated aerodynamically. Part I. General Theory
14. N. Curle The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound. *Proc. Royal Soc. A* 231, p.505-514, 1955
15. J. E. Ffowcs -Williams and D. L. Hawkings , “Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 264, No. 1151, 1969, pp. 321–342. doi:10.1098/rsta.1969.0031
16. F. Farassat and M.K. Myers «Extension of Kirchhoff’s formula to radiation from moving surfaces». *Journal of Sound and Vibration* 123, 451-461 1988.
17. A. N. Kolmogorov *Upravneniya turbulentnogo dvizheniya neshimaemoj zhidkosti. Izv. AN SSSR, ser. fiz.*,6, №1–2,56-58, 1942.
18. D. I. Blohincev *Akustika neodnorodnoj dvizhushchejsya sredy*. M.: Nauka, 1986
19. М.Е. Голдстейн *Аэроакустика*. М.: Машиностроение, 1981. Marvin E. Goldstein *Aeroacoustics. McRAW-HILL International Book Company*, 1976
20. Е.Р. Stolyarov *Vozbuzhdenie zvuka malymi vozmushcheniyami entropii i zavihrennosti v prostranstvenno neodnorodnyh techeniyah szhimaemogo ideal'nogo gaza.- V kn. Akustika turbulentnyh potokov*. M.: Nauka, 1983.
21. S.C. Crow *Aerodynamic Sound Emission as a Singular Perturbation Problem.- Studies in Applied Mathematics*, 1970, vol. XLIX, No.1.
22. K.I. Artamonov *Termohydroacoustical instability*. M.: Mashinostroenie, 1982, 261p.
- .
23. S. Timouchev, J. Tourret, Numerical Simulation of BPF Pressure Pulsation Field In Centrifugal Pumps. 19th International Pump Users Symposium, Houston, Texas (USA) 25-28 Feb 2002. *Proceedings*, pp.85-105
24. Serguei Timouchev, Anatoly Nedashkovsky, Goran Pavic Experimental Validation of Axial Fan 3D Acoustic-Vortex Method CFD-CAA Study. *Proceedings of 3rd International symposium on Fan Noise 2007*, 19-21 September 2007, Lyon, France
25. A.A. Aksenov, V.N. Gavriyuk, S.F. Timushev «Numerical simulation of tonal fan noise of computers and air conditioning systems». *Acoustical Physics*, 62, 4, 447-455, 2016, Pleiades Publishing

-
26. Sergey F. Timushev, Vladimir N. Gavrilyuk, Andrey A. Aksenov, Dmitry V. Klimenko Turbomachinery tonal noise source and acoustic field CFD-CAA modeling in presence of SAS complex acoustic impedance boundaries Noise. Theory and practice. Vol. 3 №3 (III, 2017)
27. Sergey F Timushev, Dmitry V Klimenko, «Computation of BPF pressure pulsations in the LRE screw-centrifugal pump with 3D acoustic-vortex method», INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 255,3,4157- 4165, 2017, Institute of Noise Control Engineering.
28. Andrey Aksenov, Sergey Timushev, Dmitry Klimenko, Sergey Fedoseev Application of acoustic-vortex method for CFD-CAA modelling of multicopter noise. Mathematical modelling, 2023 vol.33 (to be published).
29. K.J. Baumeister Time-dependent difference theory for noise propagation in a two-dimensional duct.- AIAA Paper, 1980, No.80-0098, 7 p.
30. Wilcox, D. C., (1994) "Turbulence modeling for CFD" // DCW Industries, Inc. 460p.
31. Richard Healy Matthew Misiowoski Farhan Gandhi A Systematic CFD-Based Examination of Rotor-Rotor Separation Effects on Interactional Aerodynamics for Large eVTOL Aircraft. Presented at the Vertical Flight Society 75th Annual Forum & Technology Display, Philadelphia, Pennsylvania, May 13–16, 2019.
32. Brendan Smith, Farhan Gandhi, Robert Niemiec A Comparison of Multicopter Noise Characteristics with Increasing Number of Rotors/ Presented at the Vertical Flight Society's 76th Annual Forum & Technology Display, Virginia Beach, Virginia, October 6-8, 2020.