

УДК: 534.83
OECD: 1.03

Экспериментальное исследование шума винто-кольцевого двигателя

Чернышов П.С.^{1*}, Кузнецов П.Н.²

¹Младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Газотурбинные и энергетические комплексы», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ,

²Старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Динамика полёта и управление беспилотных авиационных систем», Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, РФ

Аннотация

В статье представлено экспериментальное исследование акустических характеристик спроектированного винто-кольцевого двигателя. Оцениваются значения уровня звукового давления в различных точках пространства вне области конвективного потока. Для оценки акустической эффективности проводятся замеры как спроектированного винто-кольцевого двигателя, так и его конструкции без использования внешнего воздушного кольца, то есть исключительно воздушного винта. Значения уровня звукового давления измеряются с изменением его скорости вращения и угла установки лопастей, что даёт возможность оценить изменение акустического поля при динамическом управлении режимом работы. Исследование показало, что использование воздушного кольца вместе с воздушным винтом позволяет существенно изменить аэроакустическое поле и повысить акустическую эффективность двигателя в целом. Наблюдается заметное снижение шума при работе пропеллера и оценивается снижение значения уровня звукового давления. Экспериментальные результаты подтверждают эффекты, полученные ранее в численных расчетах винто-кольцевого двигателя, а также гипотезы, принятые на этапе проектирования.

Ключевые слова: аэроакустика, эксперимент, винто-кольцевой двигатель, беспилотные летательные аппараты, шум воздушного винта

Experimental study of an impeller propulsion system noise

Chernyshov P.S.^{1*}, Kuznetsov P.N.²

¹Junior Researcher, Research Laboratory 'Gas Turbine and Power Complexes', Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia,

²Senior Researcher, Research Laboratory 'Flight Dynamics and Control of Unmanned Aerial Systems', Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

Abstract

The paper presents an experimental study of the aeroacoustics of the developed impeller propulsion device. The values of the sound pressure level at different points in space outside the convective flow are considered. To evaluate the acoustic efficiency, measurements are made of both the designed impeller and its design without the use of an external air ring, i.e. only the propeller. The sound pressure level values are measured with changing its rotation speed and blade angle, which makes it possible to evaluate the acoustic field

*E-mail: ChernPvl@yandex.ru (Чернышов П.С.)

change under dynamic control of the operation mode. A noticeable reduction in noise during impeller operation is observed and a reduction in the sound pressure level is estimated. The experimental results confirm the effects obtained in early numerical calculations, as well as the hypotheses adopted at the design stage.

Keywords: *aeroacoustics, experiment, impeller, unmanned aerial vehicles, impeller noise*

Введение

На сегодняшний день огромное распространение получают беспилотные летательные аппараты (далее БЛА) мультикоптерного типа. Они широко применяются для аэрофотосъемки, например для мониторинга земель сельскохозяйственного назначения, водных и лесных массивов, маркшейдерских работ на горных предприятиях, различных промышленных объектах, в поисковых и археологических работах. Также перспективным направлением использования БЛА является перевозка грузов различной массы и назначения, в том числе в условиях городской среды. В связи с этим важной проблемой является экологический аспект их использования, в частности, наиболее острой проблемой является повышенное шумообразование БЛА, которое на сегодняшний день не удовлетворяет строгим нормам по шуму для БЛА с массой полезной нагрузки от 20 кг, то есть для наиболее востребованных размеров для грузоперевозок. Проектирование же транспортных БЛА по типу аэротакси подразумевает ещё более высокое излучение шума, что существенно ограничивает их разработку на сегодняшний день.

Современные транспортные и грузовые БЛА в полной мере сталкиваются с данными проблемами, отчего по большей части их применение вблизи и внутри городской среды невозможно и требует значительных вложений в специальную инфраструктуру. Улучшение акустических свойств силовых установок открыло бы путь к широкому применению БЛА в условиях городской среды, что позволило бы существенно улучшить логистическую эффективность городов и населенных пунктов.

Под улучшением акустических свойств или повышением акустической эффективности подразумевается изменение показателя, который характеризует способность разработанной конструкции снижать уровень шума, излучаемый ВКД. В рамках данного объекта исследования таким показателем рассматриваются акустические характеристики в окружающем движитель пространстве.

1. Конструкция винто-кольцевого движителя

Основная роль в снижении шумогенерации беспилотных летательных аппаратов состоит в аэроакустическом совершенствовании их силовой установки, поскольку именно они являются наиболее интенсивным источником акустического излучения.

В качестве силовой установки БЛА обычно рассматриваются воздушные винты. Их использование позволяет реализовать схему мультикоптера, отличающуюся простотой конструкции, возможностью реализации режима вертикального взлёта и посадки и относительно простой системой управления.

Более предпочтительным вариантом является использование воздушного винта в совокупности с воздушным кольцом, имеющим аэродинамический профиль в своем сечении. Предложенная конструкция представлена на рисунке 1, где D_v – диаметр воздушного винта, D_k – внутренний диаметр воздушного кольца, L – продольная длина воздушного кольца, а h – ширина торцевого зазора между концом лопасти и внутренней стенкой воздушного кольца. В экспериментальных исследованиях использовался винто-

кольцевой движитель с диаметром воздушного винта $D_v = 0,78$ м, $h = 3,9$ мм, длина $L = 0,469$ м, $D_k = 0,7878$ м.

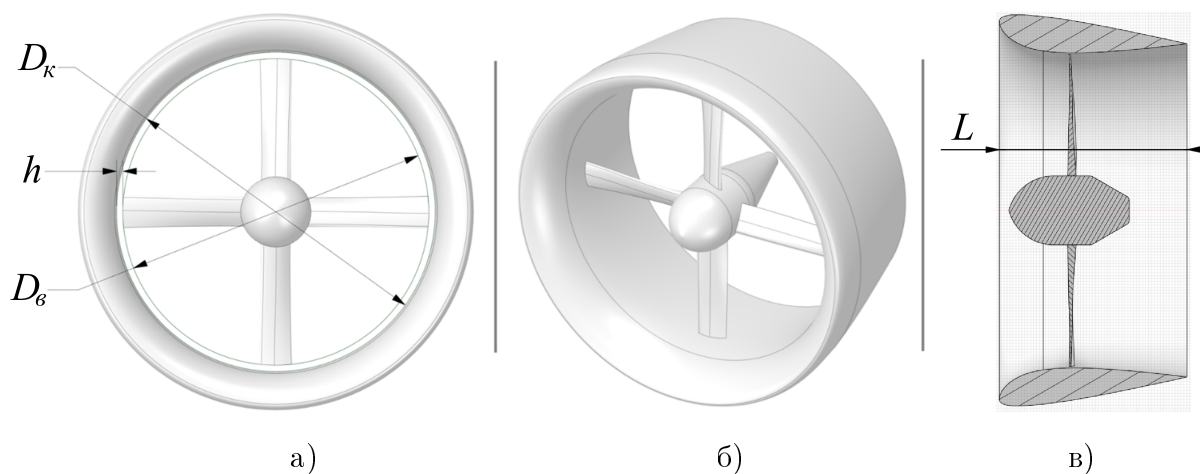


Рис. 1. Конструкция винто-кольцевого движителя (а – вид в плане; б – изометрический вид, в – осевое сечение)

Воздушное кольцо позволяет увеличить скорость потока в плоскости вращения винта и, следовательно, расход воздуха через ометаемую воздушным винтом площадь. Воздушный винт расположен в наиболее узком сечении канала воздушного кольца и за счёт своего вращения позволяет создать циркуляцию скорости вокруг профиля кольца. Это приводит к увеличению тяги движителя и заметному снижению момента сопротивления вращению на лопастях воздушного винта, что увеличивает профильный коэффициент полезного действия (далее КПД) лопастей.

Конструкция воздушного кольца крайне эффективно работает с высоконагруженным воздушным винтом К184В, который характеризуется высоким значением тяги, приводной мощности, а также низкими габаритами. Совокупность винта и кольца образует единую конструкцию, которая называется винто-кольцевой движитель (далее ВКД).

В плане аэродинамических свойств конструктивные особенности данного движителя приводят к увеличению тяги всего движителя на некоторых режимах полёта в 1,5-2 раза при сопоставимой приводной мощности. Несмотря на это, данная конструкция пока не распространена на БЛА в силу необходимости обеспечения эффективного для них режима полёта и подбора нужного профиля и кривки лопастей воздушного винта. Воздушное кольцо также может быть полезно для снижения генерации шума, поскольку оно не только экранирует шум, снижая его интенсивность в некоторых направлениях, но и также позволяет гасить турбулентные вихри, образующиеся на концах лопастей и являющиеся также источниками широкополосного шума.

Данная конструкция движителей уже рассматривалась в работах [1-4], где оценивалась их эффективность и применимость на грузовом БЛА при различных режимах полёта. Также особую исследовательскую глубину получили методы математического моделирования вращения ВКД [5-11] и влияние различных геометрических параметров ВКД, включая схему воздушного винта в составе движителя, на его аэродинамические свойства.

Численно оценивалось и аэроакустическое поле при работе ВКД [12-15]. Для рассматриваемой конструкции ВКД в работе [13] численным расчетом с применением акустической аналогии Фокса Вильямса-Хоукинга [16, 17] были определены

аэроакустическое поле при работе ВКД и направленность шума.

В классических работах, шум вращения воздушного винта разделяют на поверхностный шум, возникающий в результате воздействия на среду стационарных относительно лопастей аэродинамических сил, и на объёмный шум, возникающий вследствие периодического вытеснения среды объёмом лопастей при их вращении [18-19]. Также выделяют ударно-волновой шум, возникающий при взаимодействии ударно-волновых структур, шум вибрации поверхности лопасти, вихревой шум, вызванный срывом вихрей с обтекаемых поверхностей, и другие составляющие. С точки зрения газодинамики источником шума является совокупность когерентных турбулентных вихрей, которые генерируют акустические колебания либо на твёрдых поверхностях, например на лопастях, либо в аэродинамическом следе возмущенного потока.

В силу того, что результатом численного расчета являются пространственные поля газодинамических параметров, полностью описывающих физический процесс работы воздушного винта и индуцируемого им потока во всех точках рассматриваемого пространства, в задачах газодинамики обычно такая классификация шума не имеет четкого разделения. Однако такое разделение приводится для описания отдельных составляющих состава шума и преобладающих механизмов шумообразования на твёрдых поверхностях и в локальных областях физического пространства.

На данном этапе проводятся экспериментальные исследования изготовленной модели ВКД на газодинамическом стенде, где оцениваются исходящие от ВКД параметры излучения шума, а сами результаты численного моделирования используются для верификации математической модели и численной методики моделирования в целом. Верификация численной методики позволит скорректировать или подтвердить численную методику, что позволит более качественно проводить проектирование движителя методом моделирования газодинамики.

2. Постановка экспериментального исследования

Экспериментальное исследование генерируемого винтами БЛА уровня звука (далее УЗ) с помощью шумомера, было проведено в соответствии с разработанным методологическим планом, состоящим из трёх основных этапов:

1. Комплексная подготовка экспериментального стенда. Интеграция системы одновременного измерения УЗ в двух пространственных точках. БЛА был размещен в вертикальной плоскости на специально сконструированном измерительном стенде. Система управления БЛА была модифицирована для обеспечения возможности ручного регулирования частоты вращения винтомоторной группы и шага винта. Для агрегации и визуализации полученных данных было разработано специализированное программное обеспечение. Завершающим элементом подготовительного этапа стало позиционирование измерительных приборов в заранее определенных контрольных точках.

2. Проведение серии измерений УЗ от частоты вращения при различных углах установки винтов изменяемого шага (далее ВИШ). Винт изменяемого шага представляет из себя воздушный винт с устройством для изменения угла поворота лопастей. Уровень звука измерялся с частотной коррекцией А в соответствии с ГОСТ 12.1.026-80 «Шум: Определение шумовых характеристик источников шума в свободном звуковом поле над звукоотражающей плоскостью».

3. Проведение аналогичных измерений УЗ в зависимости от частоты вращения, но с использованием винто-кольцевого движителя.

На рисунке 2 схематически представлена экспериментальная система, включающая винто-кольцевой движитель и систему микрофонов для проведения акустических

измерений.

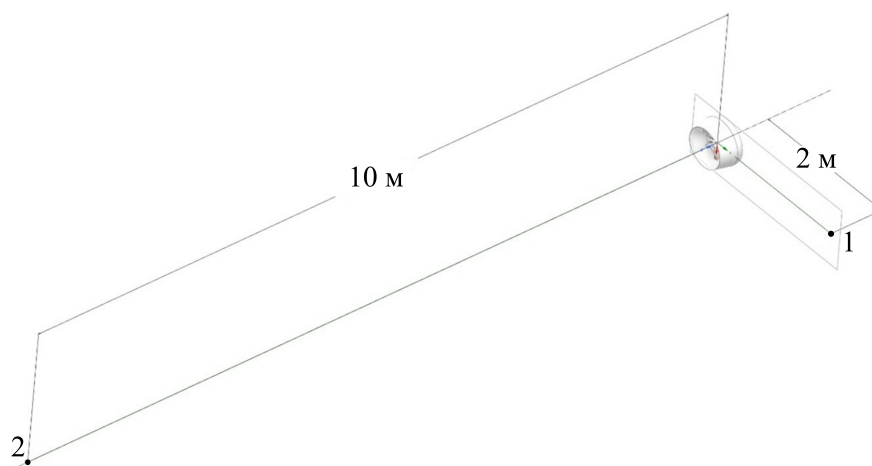


Рис. 2. Конфигурация экспериментальной установки (микрофоны расположены в точках 1 и 2)

В силу осевой симметрии движителя замеры УЗ проводились лишь в двух принципиальных точках, а именно в точке, находящейся на оси вращения воздушного винта ВКД на удалении 10 м (вдоль оси вращения по направлению потока) и в точке, находящейся в плоскости вращения на расстоянии 2 м от оси вращения (перпендикулярно потоку).

Экспериментальный стенд был расположен на открытом пространстве, вдали от отражающих поверхностей. Основной целью было обеспечение удалённости отражающих поверхностей от локальной области существования основных источников шума, то есть вблизи ВКД и вдали от индуцируемого им турбулентного потока. Экспериментальный стенд предполагает работу ВКД на высоте ~ 2 м. Поправки, связанные с переотражением, в результаты расчета не вносились.

Существенным аспектом экспериментальной конфигурации является тот факт, что оба микрофона были намеренно размещены вне ядра воздушного потока, генерируемого винто-кольцевым движителем. Данное решение позволяет минимизировать влияние турбулентных возмущений на результаты акустических измерений и обеспечивает регистрацию преимущественно акустического давления, а не давления конвективного потока струи.

Такая схема расположения измерительного оборудования обеспечивает комплексный анализ пространственного распределения звукового давления, создаваемого винто-кольцевым движителем, что является ключевым фактором для понимания акустических характеристик исследуемой системы в различных режимах её функционирования.

В рамках данного этапа исследования была реализована специализированная измерительная система для регистрации уровня звукового давления. Она представляет из себя совокупность приборов, необходимых для измерения (конденсаторные микрофоны, преобразователи сигналов, понижающий DC/DC преобразователь), микроконтроллера и программного обеспечения, которое посылает ему сигналы и принимает их.

Измерения уровня звука проводились шумомером на базе прецизионного конденсаторного микрофона AWA 14425 с интегрированным анализатором спектра и А-коррекцией в соответствии с ГОСТ 17187-2010. Для минимизации погрешности перед каждым сеансом измерений выполнялась калибровка акустическим калибратором AWA 6221 (класс 1, погрешность $\pm 0,3$ дБ). Условия окружающей среды контролировались:

температура $20 \pm 2^\circ\text{C}$, влажность $50 \pm 5\%$, фоновый шум < 30 дБ. Пространственное расположение микрофонов было выбрано с учетом необходимости получения данных о распространении звукового давления в различных направлениях относительно источника. Для устранения влияния фонового шума применялась частотная фильтрация. Разность УЗ вычислялась как среднее арифметическое для 10 серий измерений в каждом режиме.

Для сохранения и визуализации уровня звукового давления, измеряемого микрофонами, использовалась программа на языке Python. Данная программа представляет собой приложение с графическим интерфейсом пользователя для мониторинга уровня шума в реальном времени.

Программа обрабатывает полученные данные с микрофонов, преобразуя их в числовой формат и сопоставляя с текущей меткой времени. Полученные данные имеют формат "NOISE_DATA, значение1, значение2", где значения соответствуют уровням шума, зарегистрированным двумя микрофонами. Затем происходит визуализация данных в виде двух графиков, отображающих уровни шума с каждого микрофона в режиме реального времени. Графики автоматически масштабируются для отображения всего массива полученных данных.

Так как в качестве исследуемого объекта использовался ВКД с организацией управления за счёт изменения угла установки лопастей, а не изменением скорости вращения ротора, на контроллере также была организована возможность подачи управляющего сигнала изменения этого угла. Система управления за счёт изменения угла установки (применение ВИШ) имеет ряд преимуществ, главным из которых является пониженная инерционность в выполнении управляющего сигнала. Это крайне важно для задач, связанных с крупногабаритными БЛА, которые подвержены сваливанию и потере устойчивости.

3. Результаты экспериментальных исследований

Для анализа акустических характеристик ВКД была проведена серия экспериментов, направленных на измерение уровня звукового давления в зависимости от частоты вращения при различных углах установки лопастей воздушного ВИШ.

Методология эксперимента предусматривала систематическое варьирование двух ключевых параметров: угла установки лопастей и частоты вращения винта. Диапазон изменения угла установки лопастей был выбран от 0 до 40 градусов с шагом 10 градусов, что позволило исследовать пять различных конфигураций: 0° , 10° , 20° , 30° и 40° . Такой выбор диапазона обеспечил возможность оценки влияния угла атаки лопастей на акустические характеристики в широком спектре рабочих режимов.

Частота вращения винта варьировалась в диапазоне от 0 до 1800 об/мин. Этот диапазон охватывает режимы малых и средних оборотов, что позволяет получить представление об акустическом поведении винто-кольцевого движителя в диапазоне его режимов работы.

Важно заметить, что исследования проводились как на полной конструкции ВКД, так и на ВКД без использования кольцевого обтекателя в конструкции. Конструкция ВКД без использования кольцевого воздушного обтекателя, фактически, эквивалентна обычному воздушному винту, поэтому экспериментально есть возможность сравнивать две разные схемы движителя между собой.

В ходе каждого эксперимента производилась тщательная регистрация УЗ при фиксированном угле установки лопастей и последовательном изменении частоты вращения винта. Такой подход позволил получить детальные зависимости УЗ от частоты вращения для каждого исследуемого угла установки лопастей.

На рисунках 3-4 представлены графики с результатами измерения УЗ при вращении воздушного винта без использования кольцевого обтекателя, то есть обычного воздушного винта.

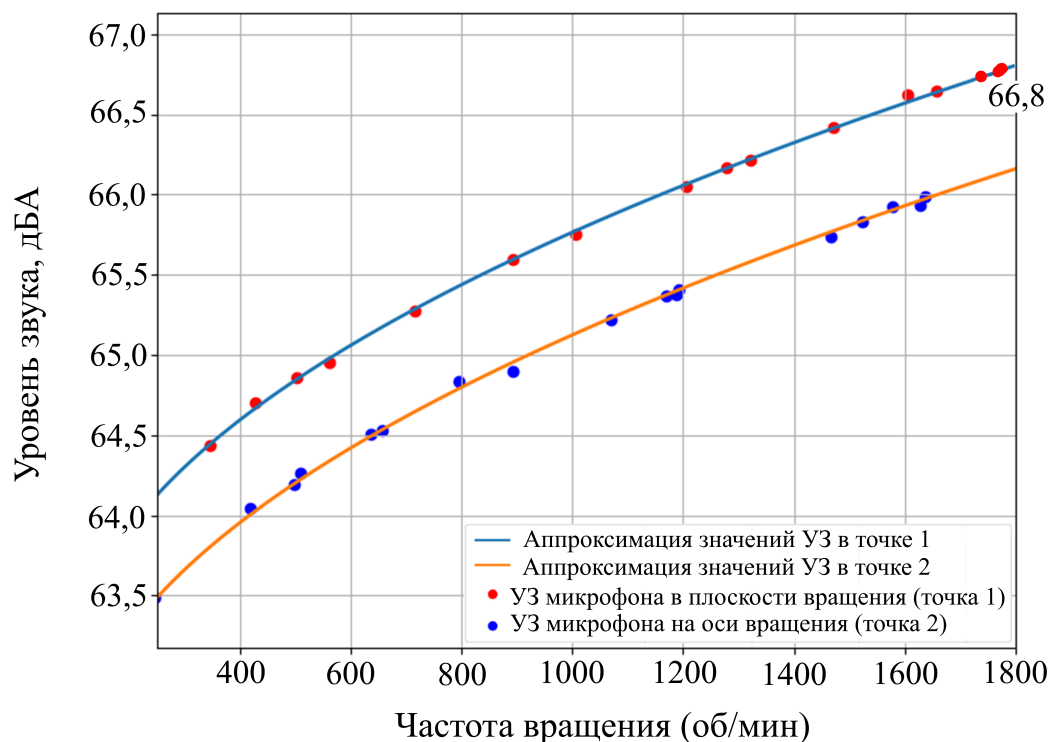


Рис. 3. Графики зависимости УЗ воздушного винта при установке лопастей на угол 10 градусов

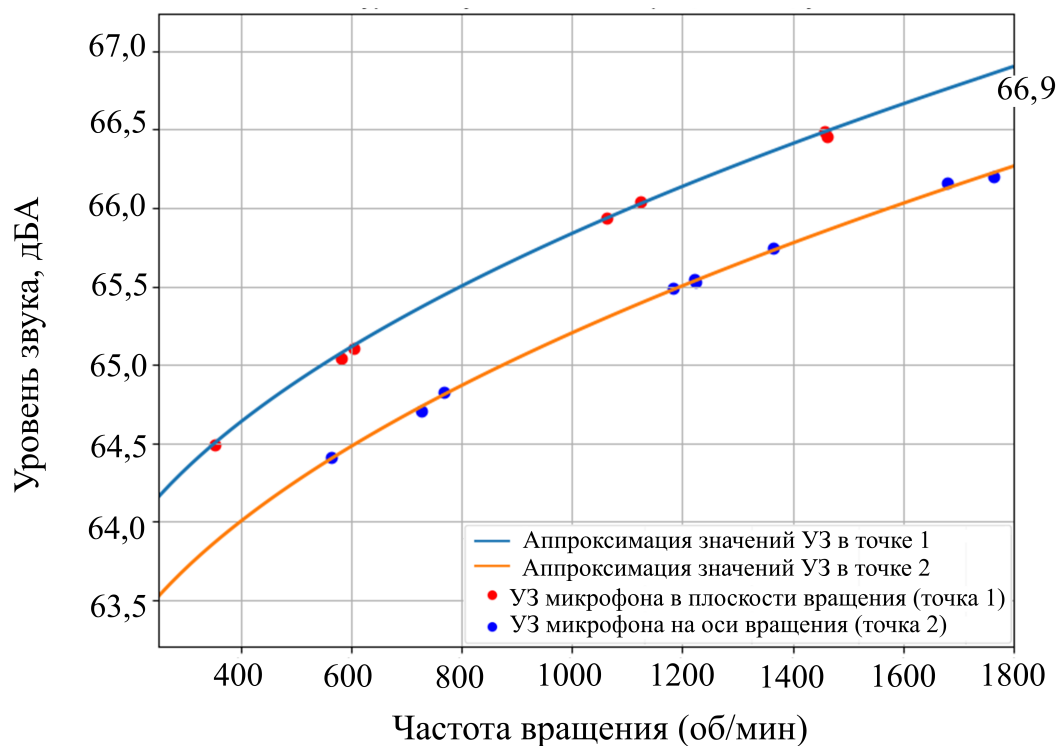


Рис. 4. Графики зависимости УЗ при установке лопастей воздушного винта на угол 30 градусов

Анализ полученных экспериментальных данных выявил интересную закономерность в акустическом поведении воздушного винта без воздушного кольца. В диапазоне частот вращения от 300 до 1800 оборотов в минуту наблюдается относительно стабильная разница в УЗ, измеренных двумя микрофонами при фиксированном угле установки лопастей. Эта особенность указывает на определенную стабильность акустической картины в широком диапазоне частот вращения воздушного винта. Более того, зависимости УЗ при изменении угла установки лопастей практически не меняются, на угле установки 10, 20 и 30 график УЗ от частоты вращения воздушного винта визуальным образом совпадают как по значениям, так и по характеру изменения (рисунки 3-4).

Для более детального изучения влияния угла установки лопастей на акустические характеристики была построена зависимость разницы УЗ от угла установки лопастей. Процесс обработки данных для построения этой зависимости включал несколько ключевых этапов.

Для более детального изучения влияния угла установки лопастей на акустические характеристики была построена зависимость разницы УЗ от угла установки лопастей. Процесс обработки данных для построения этой зависимости включал несколько ключевых этапов.

Прежде всего, был ограничен диапазон анализируемых данных, соответствующий частоте вращения винта от 300 до 500 оборотов в минуту, так как на нём наблюдается наибольшее изменение функции УЗ от скорости вращения. Далее была проведена фильтрация данных для уменьшения влияния случайных флуктуаций и повышения достоверности результатов. Для фильтрации был применен метод скользящего среднего. Этот метод эффективно сглаживает кратковременные колебания в данных, сохраняя при этом общий тренд зависимости. Выбор метода скользящего среднего обусловлен его простотой реализации и эффективностью для обработки временных рядов акустических измерений.

Использование среднего арифметического значения позволяет получить обобщенную характеристику акустического поведения для каждого угла установки, нивелируя влияние отдельных выбросов или нехарактерных значений. На рисунке 5 представлена зависимость разницы УЗ от угла установки лопастей.

Дальнейшие замеры шума происходили уже на движителе с кольцевым воздушным обтекателем, то есть на ВКД. На рисунке 6 представлен график зависимости уровня звука от частоты вращения винто-кольцевого движителя.

Анализ полученных зависимостей выявил интересную особенность: значения УЗ, регистрируемые первым микрофоном (расположенным в точке 1), устойчиво ниже показаний второго микрофона, как и в случае с вращением обычного воздушного винта. При частоте вращения 1000 об/мин разница составляет около 1,6 дБ, а при достижении 1800 об/мин увеличивается до 2,2 дБ. Этот результат примечателен тем, что он прямо противоположен картине, наблюдавшейся на предыдущем этапе эксперимента при использовании винтов без кольцевого обтекателя. Данный эффект может быть объяснен тем, что кольцевой обтекатель не только перенаправляет воздушный поток, смещая области повышенных турбулентных пульсаций, но и существенно влияет на характер распространения акустических волн, причем это влияние усиливается с ростом частоты вращения винта. Таким образом, акустическое поле искажается применением кольцевого обтекателя, отчего возникает ярко выраженная область, где направленность шума минимальна. Это полезно для проектирования БЛА, использующего ВКД в качестве движителей.

Иллюстрацией к этому выводу являются зависимости на рисунке 7.

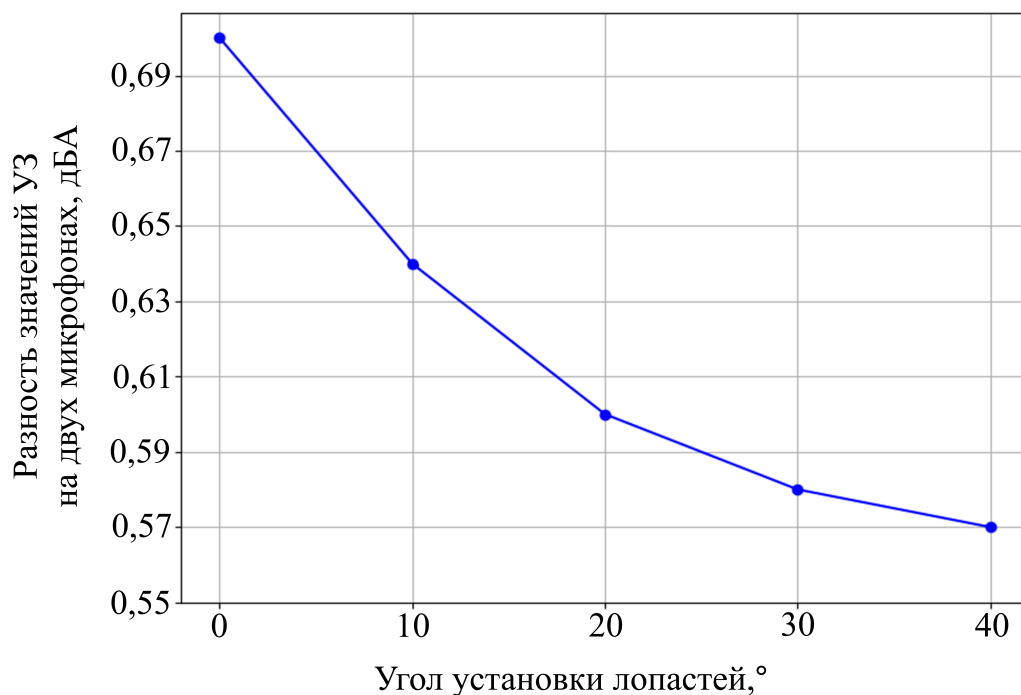


Рис. 5. Графики зависимости разницы УЗ между точками измерения от угла установки лопастей

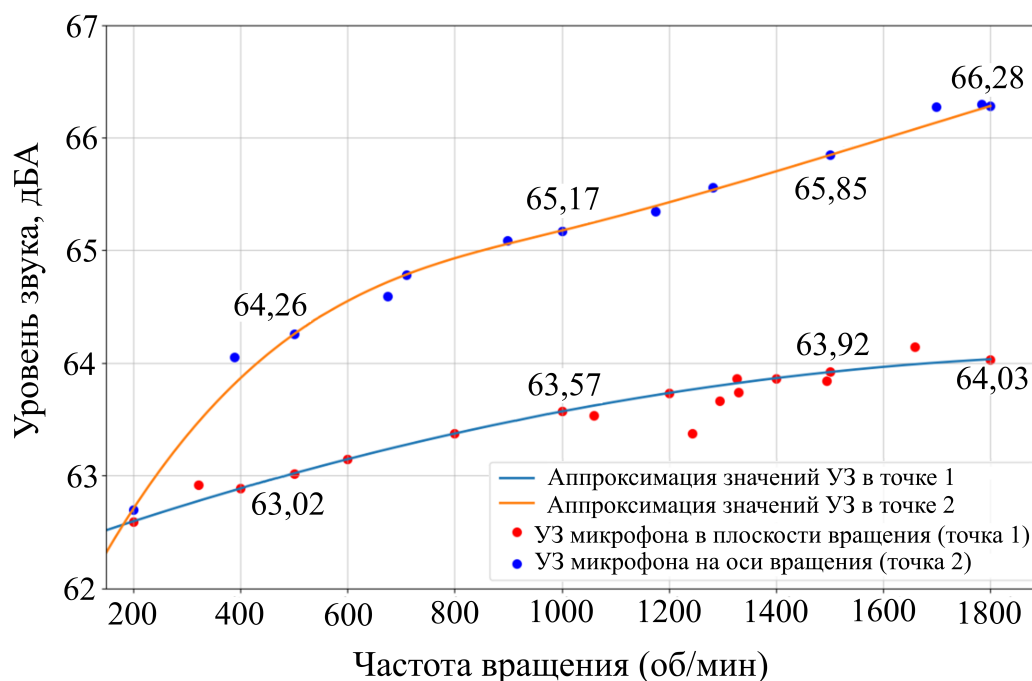


Рис. 6. Графики зависимости УЗ винто-кольцевого движителя при установке лопастей на угол 10-20 градусов

При работе ВКД наблюдается существенное увеличение разницы УЗ между замерах на микрофонах 1 и 2. С повышением частоты вращения ВКД значение данной разницы УЗ между микрофонами заметно растет. Так, при частоте вращения 500 об/мин разность УЗ между 1-м и 2-м микрофоном составила 1,2 дБ, а при частоте вращения 1800 об/мин – увеличилась почти вдвое до 2,2 дБ.

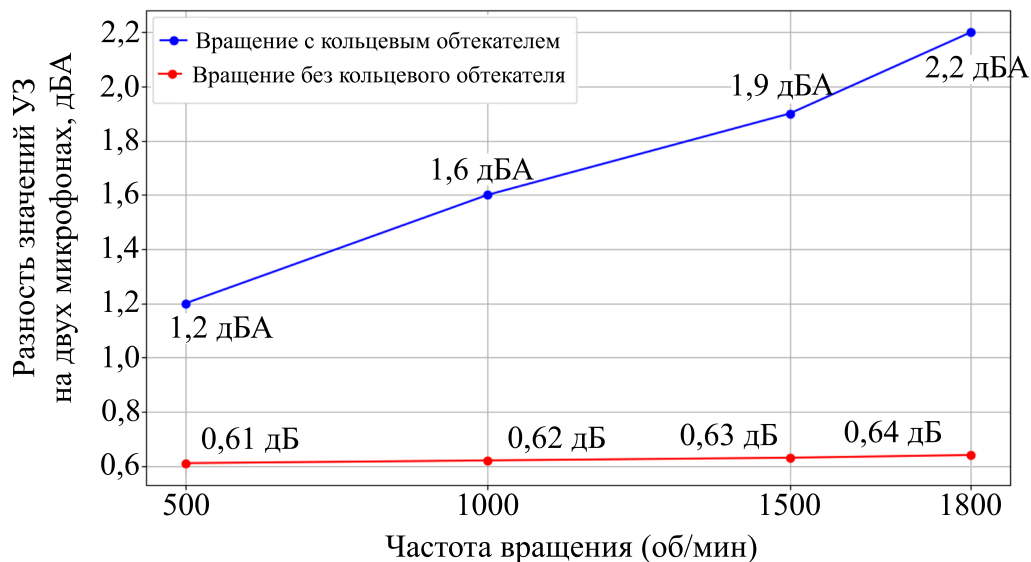


Рис. 7. Графики зависимости разницы УЗ между 1-м и 2-м микрофоном для воздушного винта и ВКД в зависимости от частоты их вращения

Закключение

По результатам исследования сделаны следующие выводы. Винто-кольцевой движитель эффективно изменяет направленность распространения звуковых волн, создаваемых вращающимся винтом. Эффективность применения воздушного кольца при росте нагрузки на лопасть возрастает не только в плане улучшения газодинамических характеристик, но и в плане подавления шума. Для сравнения, без использования винто-кольцевого движителя разница УЗ при 500 оборотах составила лишь 0,61 дБ, а при увеличении частоты вращения до 1800 об/мин она практически не изменилась, достигнув значения 0,64 дБ. При работе ВКД значения разницы УЗ в двух пространственных точках гораздо больше, и оно заметно увеличивается при увеличении скорости вращения ротора ВКД.

Применение кольца несколько снижает общий уровень шума. На рассмотренных в рамках эксперимента скоростях вращения с максимальным значением 1800 об/мин, общий уровень шума при использовании воздушного винта составляет 65 дБ, что соответствует шуму, генерируемому громким разговором. Применение для этого винта воздушного кольца (применение винто-кольцевого движителя) позволяет снизить общий уровень шума на осевом микрофоне на 3,5 дБ.

В реальном рабочем режиме скорость вращения ротора достигает 4000 об/мин, что, соответственно, является более интенсивным источником шума. Судя по характеру изменения разницы УЗ, при повышении нагрузки на лопасть за счёт увеличения скорости вращения, эффективность воздушного кольца на рабочем режиме будет только увеличиваться. В дополнение к базовому снижению УЗ в пространстве в целом (3,5-4 дБ на экспериментальном режиме, ~6% от общего уровня шума воздушного винта), ВКД, как видно из результатов, также экранирует часть пространства от повышенного шума. На рабочем режиме разница в уровне звука в разных точках может достигать 4 дБА. Таким образом, совокупное снижение шума в области, где наблюдается наименьшее излучение шума, может достигать от 8 до 10 дБА. Исходя из численного эксперимента, рассмотренного в работе [13], в области смешения при этом может наблюдаться повышенная генерация шума за счёт повышенной турбулентности в области схода вихрей.

Полученные экспериментальные результаты подтверждают, что конструкция ВКД обеспечивает снижение УЗ, что соответствует критериям акустической безопасности по ICAO Annex 16 (для БЛА) и FAA AC 36-1H (для винтовых систем). Таким образом, применение конструкции ВКД в качестве альтернативы обычным воздушным винтам является достаточно эффективным методом снижения шума БЛА.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в ходе реализации проекта «Фундаментальные основы аэродинамики, динамики полета и управления транспортных беспилотных авиационных систем нового поколения с распределенной силовой установкой», № FEFM-2024-0012.

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation during the implementation of the project «Fundamentals of aerodynamics, flight dynamics and control of transport unmanned aerial systems of a new generation with a distributed propulsion system», № FEFM-2024-0012.

Список литературы

1. Остроухов С.П. Аэродинамика воздушных винтов и винтокольцевых движителей // М.: Физматлит. - 2014. - С. 328.
2. Шайдаков В.И. Влияние близости земли на аэродинамические характеристики летательного аппарата с несущей системой «винт в кольце» // Электронный журнал «Труды МАИ» - 2011. - N. 49. - С. 1–14.
3. Chen Jie et al. Numerical Investigations of Ducted Fan Aerodynamic Performance with Tip-Jet // Aerospace Science and Technology. - 2018. - Vol. 78. - P. 510-521.
4. Канатников А.Н., Акопян К.Р. Управление плоским движением квадрокоптера // Математика и математическое моделирование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. - 2015 - N 2. - С. 23–36.
5. Денисенко П.В., Чернышов П.С., Волков К.Н., Вокин Л.О. Численное моделирование обтекания винтокольцевого движителя квадрокоптера и определение его тяговых характеристик на различных режимах полета // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. - 2021. - N 2. - С. 49-56.
6. Булат М.П., Вокин Л.О., Волобуев И.А. Исследование винтокольцевых движителей. Сравнение винтокольцевых движителей с обычными однорядными и Х-образными двухрядными винтами // Изв. вузов. Авиационная техника. - 2023. - N 2. - С. 44–48.
7. Рыбаков Д.В., Дудников С.Ю., Булат П.В., Чернышов П.С., Вокин Л.О. Исследование численных подходов к моделированию крупномасштабных турбулентных вихревых течений на режиме вертикального взлета и посадки летательного аппарата // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2021. - Т. 21. - N 3 - С. 410-417.
8. Рыбаков Д.В., Чернышов П.С., Вокин Л.О., Продан Н.В. Численное моделирование вертикальной посадки беспилотного летательного аппарата с винтокольцевыми движителями вихреразрешающими методами // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. - 2020 - N 4 - С. 197-200.
9. Гарипова Л.И., Батраков А.С., Кусюмов А.Н., Михайлов С.А., Баракос Д. Определение аэродинамических характеристик модели несущего винта на режиме осевого обтекания // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. - 2014. - N 3. - С. 7–13.

10. Диизи Ф., Баракос Дж., Кусюмов А. Н., Кусюмов С. А., Михайлов С. А. DES-моделирование обтекания несущего винта вертолета // Известия вузов. Авиационная техника. - 2018. - N 1. - С. 40–46.
11. Шайдаков В.И. Влияние близости земли на аэродинамические характеристики летательного аппарата с несущей системой «винт в кольце» // Электронный журнал «Труды МАИ». - 2011. - N. 49. - С. 1–14.
12. Денисенко П.В., Булат П.В., Чернышов П.С., Волков К.Н. Аэроакустические характеристики винтокольцевого движителя квадрокоптера на режиме вертикального взлета и посадки // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. - 2021. - N 4. - С. 66–73.
13. Bulat P., Chernyshov P., Kurnukhin A., Volkov K. Aeroacoustics of the impeller in hovering mode // Akustika. - 2021. - Vol. 39. - P. 18–23.
14. Rumsey C.L., Biedron R., Farassat F., Spence P. Ducted-fan engine acoustic predictions using a Navier-Stokes code // Journal of Sound and Vibration. - 1998. - Vol. 213, N 4. - P. 643–664.
15. Reboul G., Polacsek C., Lewy S., Heib S. Aeroacoustic computation of ducted-fan broadband noise using LES data // Journal of Acoustic Society of America. - 2008. - Vol. 123, N 5 - P. 3539–3539.
16. Hawkings D.L., Williams J.E., Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and physical sciences, 1969. - 264 p.
17. Weckmueller C., Guerin S., Wellner J., Michel U. Ffowcs Williams & Hawkings Formulation for the Convective Wave Equation and Permeable Data Surface. 16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (31st AIAA Aeroacoustics Conference), 2010.
18. Гутин Л. Я. О звуке вращения воздушного винта // ЖТФ. - 1942. - Т. 12, N 2–3.
19. Юдин Е.Я., Борисов Л. А., Горенштейн И. В. Борьба с шумом на производстве: Справочник // М. : Машиностроение, 1985. - 399 с.

References

1. Ostroukhov S.P. Aerodynamics of air propellers and propeller-ring propulsors // М.: Fizmatlit. - 2014. - P. 328.
2. Shaidakov, V.I. Influence of the ground proximity on the aerodynamic characteristics of an aircraft with the carrier system ‘propeller in a ring’ // Electronic Journal ‘Proceedings of MAI’ - 2011. - Учтены не все зам. 49. - P. 1–14.
3. Chen Jie et al. Numerical Investigations of Ducted Fan Aerodynamic Performance with Tip-Jet // Aerospace Science and Technology. – 2018. - Vol. 78. – P. 510–521.
4. Kanatnikov A.N.; Akopyan K.R. Control of flat motion of a quadcopter (in Russian) // Mathematics and Mathematical Modeling. Bauman Moscow State Technical University. - 2015 - N 2. - P. 23–36.
5. Denisenko P.V.; Chernyshov P.S.; Volkov K.N.; Vokin L.O. Numerical simulation of the flow around the ducted fan of a quadcopter and determination of its thrust characteristics in various flight modes // Russian Aeronautics. - 2021. – Vol.64, N 2. - P. 224–232.
6. Bulat M.P., Vokin L.O., Volobuev I.A. Research of ducted propellers. Comparison of ducted propellers with conventional single-row and x-shaped double-row propellers // Izv. of higher educational institutions. Aviation Engineering. - 2023. - N 2. – P. 44–48.
7. Rybakov, D.V.; Dudnikov, S.Yu.; Bulat, P.V.; Chernyshov, P.S.; Vokin, L.O. Investigation of numerical approaches to modeling of large-scale turbulent eddy currents in

the vertical takeoff and landing mode of an aircraft // Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics. - 2021. - Vol. 21, N 3 – P. 410-417.

8. Rybakov D.V., Chernyshov P.S., Vokin L.O., Prodan N.V. Numerical simulation of the vertical landing of unmanned aerial vehicle with ducted fan propulsors by eddy-resolving methods // Russian Aeronautics. - 2020. - Vol. 63, N 4. - P. 776-780.

9. Garipova L.I., Batrakov A.S., Kусyumov A.N., Mikhailov S.A., Barakos G.N. Estimates of hover aerodynamics performance of rotor model // Russian Aeronautics. - 2014. - Vol. 57, N 3. - P. 223-231.

10. Diisi F., Barakos J., Kусyumov A. N., Kусyumov S. A., Mikhailov S. A. DES-modeling of a helicopter main rotor streamline // Izvestiya Vuzov. Aviation Engineering. - 2018. - N 1. - P. 40-46.

11. Shaidakov, V.I. Influence of the ground proximity on the aerodynamic characteristics of the aircraft with the carrier system 'propeller in the ring' // Electronic Journal 'Proceedings of MAI'. - 2011. - N. 49. - P. 1-14.

12. Denisenko P.V., Bulat P.V., Chernyshov P.S., Volkov K.N. Aeroacoustic characteristics of a quadcopter impeller in vertical take-off and landing mode // Russian Aeronautics. - 2021. - Vol. 64, N 4. - P. 661-669.

13. Bulat P., Chernyshov P., Kurnukhin A., Volkov K. Aeroacoustics of the impeller in hovering mode // Akustika. - 2021. - Vol. 39. - P. 18-23.

14. Rumsey C.L., Biedron R., Farassat F., Spence P. Ducted-fan engine acoustic predictions using a Navier-Stokes code // Journal of Sound and Vibration. - 1998. - Vol. 213, N 4. - P. 643-664.

15. Reboul G., Polacsek C., Lewy S., Heib S. Aeroacoustic computation of ducted-fan broadband noise using LES data // Journal of Acoustic Society of America. - 2008. - Vol. 123, N 5 - P. 3539-3539.

16. Hawkings D.L., Williams J.E., Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and physical sciences, 1969. - 264 p.

17. Weckmueller C., Guerin S., Wellner J., Michel U. Ffowcs Williams & Hawkings Formulation for the Convective Wave Equation and Permeable Data Surface. 16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (31st AIAA Aeroacoustics Conference), 2010.

18. Gutin L. Ya. About the sound of the air propeller rotation // ZhTF. - 1942. - Vol. 12, N 2-3.

19. Yudin E.Y., Borisov L.A., Gorenstein I. V. Noise control in production: Reference book // M. : Mashinostroenie, 1985. - 399 p.