

УДК: 534.32
OECD: 1.03.AA

Исследование слышимости и маскировки шума винтового беспилотного воздушного судна фоном окружающей среды

Мошков П.А.

К.т.н, ведущий конструктор, Филиал ПАО «Корпорация «Иркут»
«Региональные самолеты», г. Москва, Россия

Аннотация

Рассмотрена проблема слышимости и маскировки шума винтовых беспилотных воздушных судов (БВС). Выполнен аналитический обзор доступных публикаций в области психофизиологической акустики в рамках слышимости приближающихся и удаляющихся источников звука. Рассмотрены спектральные характеристики шума винтовых БВС и фонового шума окружающей среды. Представлены результаты исследований, выполненных автором в области слышимости винтовых БВС. В частности, предложен критерий аудиозаметности и представлены данные о маскировке шума БВС фоновым шумом окружающей среды. В качестве критерия аудиозаметности БВС самолетного типа с поршневым двигателем предлагается использовать разность между суммарными взвешенными по шкале А стандартного шумомера уровнями звукового давления, соответствующими акустическому излучению БВС и фона окружающей среды. БВС становится слышимым при величине критерия 3 дБА. В рамках летного эксперимента было получено, что в среднем эффект маскировки шума БВС фоновым шумом окружающей среды составляет 3 с для участка приближения и 6 с для участка удаления БВС от контрольной точки. Наибольший маскирующий эффект наблюдается при высоких скоростях ветра 5-6 м/с, и как следствие высоких уровнях фонового шума, и составляет до 15 с.

Ключевые слова: беспилотное воздушное судно, слышимость, шум на местности, шум окружающей среды, маскировка шума.

Study of the audibility and masking of the propeller-driven unmanned aerial vehicle noise by ambient noise

Moshkov P.A.

PhD, leading designer, IRKUT Corporation Regional Aircraft, Moscow, Russia

Abstract

The problem of audibility and noise masking of propeller-driven unmanned aerial vehicles (UAVs) is considered. An analytical review of available publications in the field of psychophysiological acoustics in the framework of audibility of approaching and receding sound sources is performed. The spectral characteristics of propeller-driven UAVs noise and ambient noise are considered. The results of the research carried out by the author in the field of audibility of propeller-driven UAVs are presented. In particular, the criterion of audio visibility and data on the masking of UAV noise by the ambient noise are proposed. It is proposed to use the difference between the overall A-weighted sound pressure levels corresponding to UAV acoustic radiation and ambient noise as a criterion for the audio visibility of an aircraft-type UAV with a piston engine. The UAV becomes audible when the criterion value is 3 dBA. As part of the flight experiment, it was found that on

average, the effect of masking the UAV noise with ambient noise is 3 sec for the approach area and 6 sec for the distance of the UAV from the control point. The greatest masking effect is observed at high wind speeds of 5-6 m/s, and as a result, high levels of ambient noise, and is up to 15 sec.

Keywords: *unmanned aerial vehicle, audibility, community noise, ambient noise, noise masking.*

Введение

Широкое распространение беспилотных воздушных судов (БВС) гражданского и специального назначения ставит задачу обеспечения траекторий полета без возможности их обнаружения аудиометрическим методом (на слух). С одной стороны малозумность БВС гражданского назначения обеспечит комфорт жителей при широком развитии беспилотных технологий, в частности, доставки почты, покупок и т.д., а с другой стороны обеспечит незаметность БВС специального назначения [1, 2] в акустическом диапазоне длин волн, которая в общем случае характеризует живучесть аппаратов.

В проблеме шумности винтовых БВС отдельное место занимают вопросы слышимости и маскировки шума БВС фоном окружающей среды [3]. Для оценки границ слышимости БВС необходимы критерии аудиозаметности различных типов БВС [4] и программное обеспечение для оценки шума ЛА на местности [5]. Для более точной и корректной оценки границ слышимости БВС с одной стороны и построения пространственно-временных траекторий полета БВС [6] без возможности обнаружения на слух с другой стороны, необходимо учитывать эффект маскировки шума БВС фоновым шумом окружающей среды [7].

Вопросы слышимости и маскировки шума винтовых БВС в общем случае тесно связаны с акустическими характеристиками конкретного типа БВС (мультикоптер [8, 9], БВС вертолетного или самолетного типа [10–12] и т.д.), режимом его полета, фоновым шумом окружающей среды и индивидуальными особенностями восприятия шума наблюдателем.

Целью работы является формулирование критериев, характеризующих эффект маскировки шума БВС шумом окружающей среды при его восприятии наблюдателем.

Основные задачи, решаемые в рамках настоящей работы:

- Анализ доступных публикаций в области психофизиологической акустики с целью получения данных для дальнейшего учета эффекта маскировки шума БВС шумом окружающей среды;

- Анализ типовых спектров шума винтовых БВС и фона окружающей среды;

- Специальная обработка результатов летных акустических испытаний БВС Птеро-G0, выполненных автором ранее, в контексте исследования слышимости и маскировки шума БВС фоном окружающей среды.

1. Аналитический обзор публикаций в области слышимости и маскировки шума движущихся источников

С целью определения основных закономерностей, полученных в рамках психофизиологической акустики, в области слышимости и маскировки движущихся источников звука был выполнен аналитический обзор публикаций [13–22]. Такие исследования проводятся в заглушенных камерах при наличии специального оборудования при значительном количестве испытуемых мужчин и женщин среднего возраста, участвующих в нескольких сериях экспериментов.

В работах [13, 14] было показано, что при локализации источников шума может наблюдаться эффект асимметрии приближения и удаления источников звука, который зависит от локализации адаптирующих и тестовых стимулов. При одинаковой локализации стимулов для двух расстояний в проведенном эксперименте наблюдалась значительная асимметрия эффектов последействия. Эффекты последействия имитируемого приближения и удаления источника звука отражают их пространственную специфичность и могут быть связаны со специализированными механизмами анализа движения на разном расстоянии от слушателя.

Особенности восприятия приближения и удаления источника звука и их влияние на слуховое последействие исследовали в условиях свободного поля в работах [15, 16]. При этом испытуемые определяли направление движения тестовых стимулов, предъявляемых без адаптации (контроль) и после адаптации к неподвижным, медленно движущимся (с изменением амплитуды 2 дБ) и быстро движущимся (с изменением амплитуды 12 дБ) стимулам. Наблюдали три феномена слухового восприятия.

1. В отсутствие адаптации проявлялся эффект нарастания громкости: испытуемые чаще оценивали тестовые стимулы как приближающиеся.

2. После адаптации к неподвижным и медленно движущимся стимулам наблюдалось последействие источника звука, связанное с его положением, – испытуемые чаще оценивали тестовые стимулы как удаляющиеся по сравнению с контролем. Эффект снижался с увеличением расстояния до источника адаптирующих стимулов и был связан с эффектом нарастания громкости.

3. После адаптации к стимулам, имитирующим быстрое приближение и удаление, было выявлено последействие движения. Оно заключалось в изменении оценок направления движения тестовых стимулов, противонаправленном движению адаптирующих стимулов.

При исследовании маскирующего влияния белого шума на временные параметры локализации радиально движущихся источников были получены следующие результаты [17].

1. Воздействие фонового белого шума проявляется в снижении вероятности распознавания направления движения источника звука, что отражается на величине порога по длительности.

2. Порог по длительности для определения направления движения источника звука увеличивается примерно вдвое на фоне белого шума, равного уровню полезного сигнала или превышающего его.

3. Минимальная длительность для определения направления в условиях одновременной маскировки сохраняется постоянной вплоть до уровней шума, близких к порогу полной маскировки.

4. Время реакции выбора при определении направления источника на фоне непрерывного широкополосного шума меняется незначительно и в среднем по группе испытуемых составляет 80 мс.

В работе [19] была установлена высокая помехоустойчивость слуховой локализации приближающихся и удаляющихся источников звука к фоновым шумам малого и среднего уровней интенсивности (20 и 40 дБ над порогом слышимости), что свидетельствует об адаптации процессов слуховой локализации к условиям реальной акустической среды.

При исследовании слышимости вертолета наблюдателем [22] была установлена существенная зависимость соотношения сигнал-шум от фонового шума окружающей среды. В условиях сельской местности порог обнаружения вертолета был на 5 дБ ниже значения, установленного для городских и пригородных условий.

В контексте проблемы шума на местности БВС представленные результаты других авторов, полученные в области психофизиологической акустики, могут быть интерпретированы следующим образом.

1. Эффекты приближения и удаления источника звука могут иметь эффекты асимметрии при одних и тех же заданных стимулах (сигналах). В рамках акустики БВС дополнительная асимметрия при восприятии движущихся источников шума может быть объяснена не только специфичностью слухового восприятия человека, но и сложностью диаграммы направленности источника и особенностями спектрального состава его излучения.

2. Точность и время определения направления движения источника звука зависят от скорости источника.

3. При наличии фонового шума по интенсивности равного или превосходящего шум БВС может увеличиваться время (порог по длительности) определения направления на источник звука.

4. Слуховая система человека обладает высокой помехоустойчивостью при локализации приближающихся и удаляющихся источников звука к фоновым шумам малого и среднего уровней интенсивности (20 и 40 дБ над порогом слышимости).

5. Время реакции выбора при определении направления источника полезного сигнала на фоне белого шума меняется незначительно и в среднем по группе людей, участвующих в эксперименте, составило 80 мс [17]. Данный результат свидетельствует о том, что при проведении натуральных летных экспериментов различных типов БВС совсем не обязательно задействовать значительное количество людей. Не стоит ожидать существенного разброса данных по величине критерия аудиозаметности при рассмотрении группы людей.

6. При выборе критериев слышимости БВС следует понимать, что величина критерия и метрика зависит не только от типа аппарата, но и от фонового шума окружающей местности, в рамках которой предполагается использование аппарата.

2. Спектральные характеристики шума винтовых БВС и фонового шума окружающей среды

Особенностью акустического поля винтовых БВС является наличие в спектре сигнала характерных частот тонального излучения. В таблице 1 представлены тональные составляющие в спектре шума БВС и основные параметры, влияющие на спектральный портрет аппарата. Тональные уровни шума мультикоптеров определяются излучением на частотах кратных частоте следования лопастей винтов (шум вытеснения и шум от нагрузки) и излучением на комбинационных гармониках (шум взаимодействия). Если в состав силовой установки БВС входит поршневой двигатель, то в спектре шума помимо гармоник шума винта, выделяются тональные составляющие на частотах кратных частоте следования вспышек в цилиндрах двигателя. Когда в состав силовой установки входят электродвигатели, то в спектре шума БВС присутствуют высокочастотные тональные составляющие на частотах кратных частоте вращения ротора и числу пар полюсов.

В качестве примера на рис. 1 представлен типовой узкополосный спектр уровней звукового давления, измеренный при работе силовой установки БВС Птеро-G0 в статических условиях при частоте вращения коленвала 5400 об/мин (двигатель – одноцилиндровый, четырёхтактный, без редуктора; воздушный винт – двухлопастной, неизменяемого шага). Гармоники шума воздушного винта обозначены цифрами с индексами «в», а гармоники шума двигателя цифрами с индексами «д». Можно видеть, что в данном случае с учетом числа лопастей винта, числа цилиндров двигателя и его тактности, а также при отсутствии редуктора первая гармоника шума вращения винта

совпадает с 4-й двигательной гармоникой, 2-я гармоника шума винта совпадает с 8-й двигательной гармоникой и т.д.

Отметим также, что помимо характерных тональных составляющих в спектре шума винтовых БВС присутствует широкополосная составляющая во всем слышимом диапазоне частот. Источниками широкополосного излучения в зависимости от типа БВС могут быть: вихревая составляющая шума воздушного винта, вихревая составляющая шума впуска и выхлопа поршневого двигателя, широкополосная составляющая структурного шума двигателя и широкополосная составляющая шума взаимодействия «лопасть-турбулентный след» и «лопасть-вихрь». Роль широкополосного шума в общем шуме БВС на местности зависит от множества факторов, таких как режим работы силовой установки, направление излучения и др.

Таблица 1

Тональные составляющие в спектре шума БВС с винтовыми двигателями и основные параметры, влияющие на спектральный портрет

Тип гармоники в спектре излучения БВС	Параметры, влияющие на характерные частоты в спектре
Тональные составляющие шума винта	Частота вращения винта, число лопастей
Комбинационные гармоники (мультироторные системы, соосные винты)	Число лопастей, число винтов и их компоновка на ЛА, разность частот вращения
Гармоники шума электродвигателя	Частота вращения ротора, число пар полюсов
Гармоники шума ДВС	Частота вращения коленвала, тактность число цилиндров в двигателе

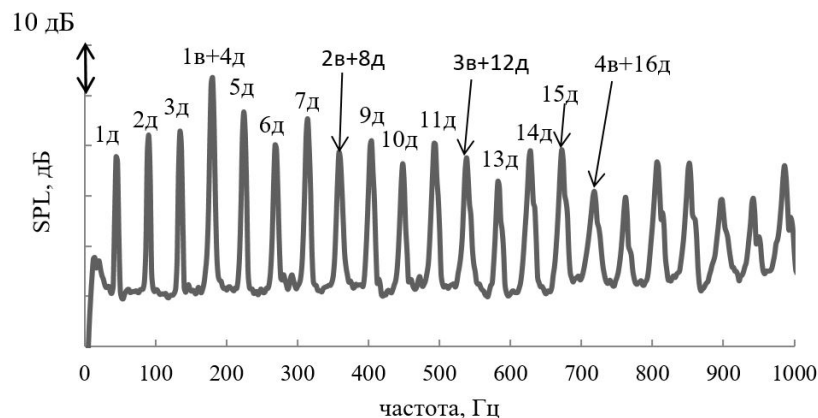


Рис. 1. Типовой спектр шума винтового БВС самолетного типа с поршневым двигателем, измеренный на расстоянии 2 м в направлении 120°

Как ранее было отмечено, данные о фоновом шуме окружающей среды являются неотъемлемой частью методики расчета границ акустической заметности БВС и необходимы для построения траекторий полета БВС без возможности обнаружения. Рассмотрим спектральные характеристики фонового шума окружающей среды в различных условиях. Измерения были выполнены автором в 2013–2015 гг. Для измерения уровней звукового давления использовался портативный шумомер «Экофизика-110А». Измерительный микрофон с установленной ветрозащитой располагался на высоте

1,2 м относительно поверхности земли. Результаты измерений представлены в виде третьоктавных спектров уровней звукового давления с шагом 5 с.

На рис. 2 представлены третьоктавные спектры уровней звукового давления, измеренные в горах при скорости ветра 3,5–4,5 м/с. Можно видеть спадание интенсивности фонового шума с частотой. При этом Уровни фона до частоты 100 Гц могут являться маскером акустического излучения БВС. Наибольший разброс измеряемых уровней фона наблюдается в диапазоне 10–100 Гц и вероятнее всего обусловлен непостоянством скорости ветра в течение измерения. Уровни фона на частотах свыше 1000 Гц соизмеримы с собственным шумом используемой измерительной системы.

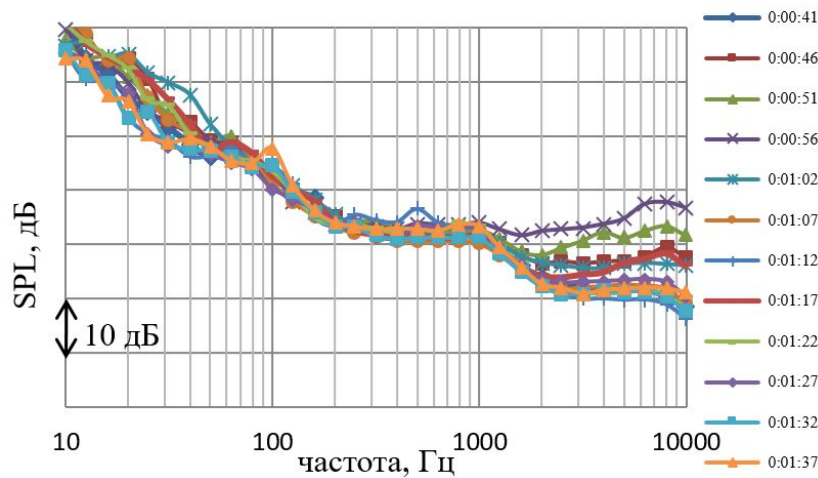


Рис. 2. Третьоктавные спектры уровней звукового давления, измеренные с шагом 5 с в горах при скорости ветра 3,5–4,5 м/с

Третьоктавные спектры уровней звукового давления, измеренные вблизи моря при низкой скорости ветра, представлены на рис. 3. Максимальные уровни наблюдаются в третьоктавных полосах с центральными частотами 50 и 400 Гц. Разбежка спектров (до 20 дБ) вероятнее всего обусловлена различной высотой и скоростью набегающих волн. Можно видеть, что в данной случае фоновый шум окружающей среды может являться эффективным маскером шума БВС в диапазоне 250–2000 Гц, а также тонального шума в полосе 50 Гц.

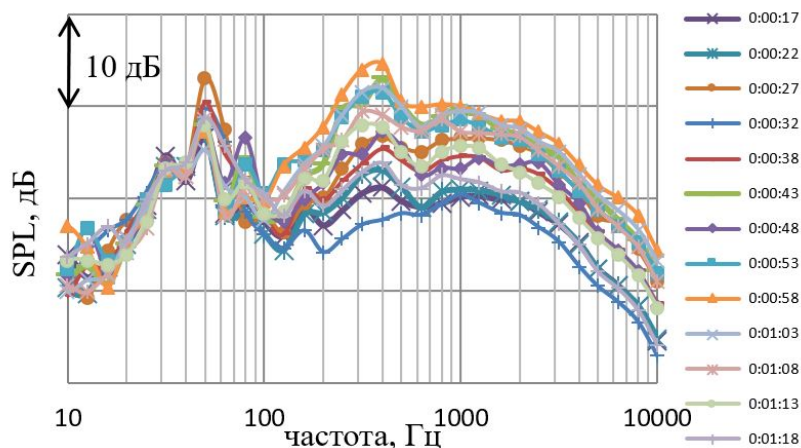


Рис. 3. Третьоктавные спектры уровней звукового давления, измеренные с шагом 5 с вблизи моря (шум прибоя) при скорости ветра 0,5 м/с

Третьоктавные спектры уровней звукового давления фонового шума, измеренные в лесу при низкой скорости ветра при слышимости шума автотранспорта со стороны дороги, представлены на рис. 4. Наибольший разброс в измеряемых уровнях наблюдается в диапазоне частот 2000–10000 Гц, что по всей видимости связано с разной мощностью двигателей автомобилей и их массой. В диапазоне частот 10–2000 Гц разбежка измеряемых уровней звукового давления не превышает 5 дБ. Причем в диапазоне частот 10–100 Гц уровни шума практически постоянны, а некоторое снижение уровней шума наблюдается на частоте 160 Гц. Можно видеть, что в данном случае шум автотранспорта может быть эффективным маскером шума БВС в диапазоне частот 10–1600 Гц. Отметим также, что в общем случае на шумность потока автотранспорта влияет множество факторов [23], таких как интенсивность движения, скорость, соотношение между грузовыми и легковыми автомобилями, дорожное покрытие (тип и состояние) и т.д.

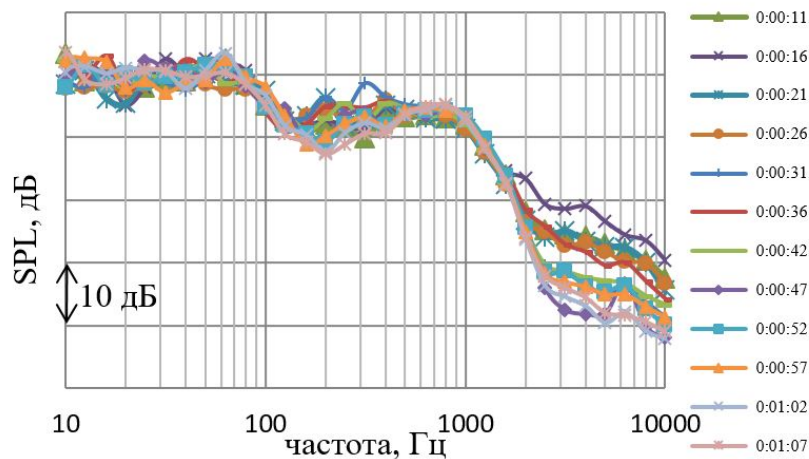


Рис. 4. Третьоктавные спектры уровней звукового давления, измеренные в лесу при слышимости шума автотранспорта со стороны дороги при скорости ветра менее 1 м/с

3. Критерий слышимости винтовых летательных аппаратов самолетного типа

Критерий аудиозаметности (слышимости) винтовых БВС самолетного типа с ДВС (ΔL_a) был предложен автором ранее [4] на основании многочисленных экспериментальных исследований легких винтовых самолетов и БВС. Суть эксперимента заключалась в следующем. БВС или легкий винтовой самолет совершали горизонтальный полет на заданной высоте 100 м по траектории обеспечивающей не слышимость аппарата на участках приближения и удаления. На шумомере во время испытаний устанавливалось три характерные отметки времени. Это момент начала слышимости аппарата, момент пролета над контрольной точкой и момент окончания слышимости аппарата. Обработка измеренного сигнала заключалась в сравнении уровней фонового шума с уровнями шума аппарата в моменты начала и окончания слышимости.

Было получено, что критерием (условием) аудиозаметности БВС самолетного типа может служить выражение:

$$\Delta L_a = L_{\text{ЛА}} - L_{\text{фона}} \geq 3 \text{дБА},$$

где $L_{\text{фона}}$ – суммарный уровень природного фона, скорректированный по шкале «А» стандартного шумомера, $L_{\text{ЛА}}$ – суммарный уровень шума ЛА на местности в единицах дБА.

Т.е. когда суммарный уровень шума ЛА на 3 дБА становится выше уровня фонового шума, то ЛА становится слышимым. Отметим, что эксперимент выполнялся в условиях аэродрома базирования малой авиации при субъективном отсутствии фоновых источников шума техногенного происхождения. При проведении испытаний при наличии фоновых шумов другого уровня величина критерия может существенно отличаться от установленного в рамках настоящего эксперимента значения.

4. Исследование влияния эффекта маскировки на слышимость малоразмерного БВС с поршневым двигателем

При выполнении горизонтального полета БВС Птеро-G0 наблюдатель на шумомере делал три характерные отсечки времени – это момент начала слышимости БВС, момент полета над контрольной точкой (микрофоном) и момент окончания слышимости. Моменты начала и окончания слышимости сравнивались с теми же моментами, но на основе прослушивания записанного звукового сигнала (рис. 5). Маскирующий эффект оценивался как разница по времени между моментом начала слышимости, отмеченным наблюдателем во время летных испытаний, и моментом начала слышимости при прослушивании аудиозаписей. Для участка удаления БВС от контрольной точки, эффект маскировки оценивался как разность по времени между моментом окончания слышимости БВС при прослушивании аудиозаписей и моментом окончания слышимости БВС при испытаниях.

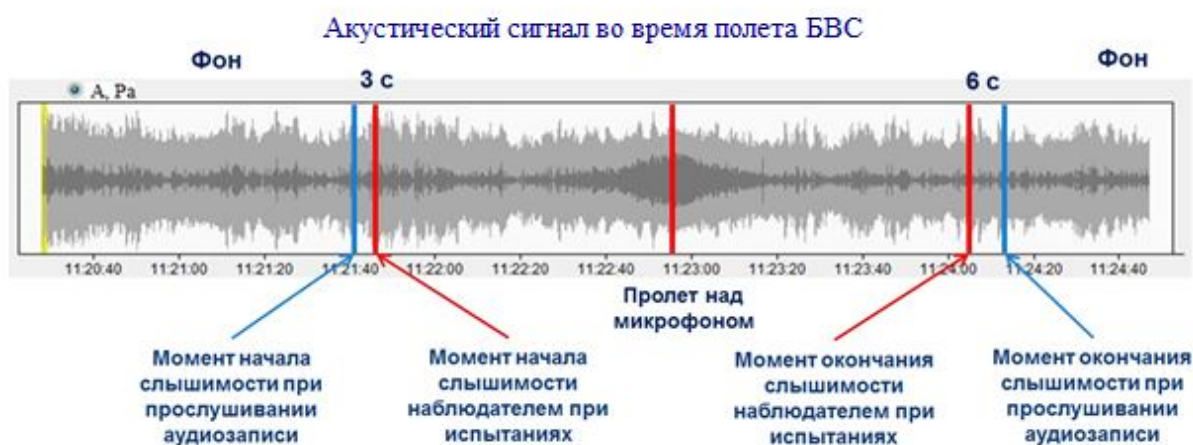


Рис. 5. Пример обработки сигнала при исследовании эффекта маскировки

На основе выполненного анализа получены следующие результаты:

1. Для участков приближения и удаления БВС наблюдается значительная маскировка шума БВС окружающим шумом для наблюдателя.

2. В среднем для всех горизонтальных полетов эффект составляет 3 секунды для участка приближения и 6 секунд для участка удаления БВС от контрольной точки. Существенное различие объясняется диаграммой направленности шума БВС, максимум которого соответствует излучению в заднюю полусферу.

3. Наибольший маскирующий эффект наблюдается при высоких скоростях ветра 5-6 м/с, и как следствие высоких уровнях фонового шума, и составляет до 15 секунд.

Представленные результаты могут быть использованы в рамках методики оценки границ слышимости аналогичных БВС самолетного типа с поршневыми двигателями.

Заключение

Рассмотрена проблема маскировки шума винтовых беспилотных воздушных судов фоновым шумом окружающей среды. Выполнен аналитический обзор работ выполняемых в рамках психофизиологической акустики по тематике маскировки шума движущихся источников для наблюдателей. Рассмотрены спектральные характеристики шума винтовых БВС, а также фонового шума окружающей среды.

Представлены результаты авторских исследований, направленных на определение критерия аудиозаметности винтовых летательных аппаратов самолетного типа. Изучено влияние эффекта маскировки шума БВС фоновым шумом окружающей среды.

Список литературы

1. Мошков П.А., Остриков Н.Н., Самохин В.Ф. О проблеме шума на местности винтовых беспилотных летательных аппаратов // Труды всероссийской акустической конференции. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. – 2020. – С. 582-588.
2. Мошков П.А. Прогнозирование и снижение шума на местности легких винтовых самолетов: Дис. канд. техн. наук. – М.: МАИ. – 2015. – 143 с.
3. Кажан В.Г., Мошков П.А., Самохин В.Ф. Природный фон при проведении акустических испытаний самолетов на аэродроме базирования малой авиации // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – № 7. – С. 146-170.
4. Мошков П.А., Самохин В.Ф., Яковлев А.А. Выбор критерия слышимости беспилотных летательных аппаратов с винтомоторной силовой установкой // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2018. – № 2. – С 3-9.
5. Дмитриев В.Г., Самохин В.Ф. Комплекс алгоритмов и программ для расчета шума самолетов на местности // Ученые записки ЦАГИ. – 2014. – Т. 45. – № 2. – С. 137-157.
6. Афанасьев В.А., Дегтярев Г.Л., Мещанов А.С. Формирование программных пространственных траекторий полета беспилотных летательных аппаратов // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2017. – № 3. – С. 29-37.
7. Moshkov P., Ostrikov N., Samokhin V., Valiev A. Study of Ptero-G0 UAV Noise with Level Flight Conditions // 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. – 2019. – AIAA Paper. – №. 2019-2514.
8. Гончаренко Б.И., Кузьменков В.Ю., Котов А.Н. Экспериментальное исследование особенностей формирования спектра шумов беспилотного летательного аппарата // Noise Theory and Practice. – 2020. – Т. 6. – № 4 (22). – С. 49-59.
9. Заславский Ю.М., Заславский В.Ю. Акустический шум низколетящего квадрокоптера // Noise Theory and Practice. – 2019. – Т. 5. – № 3 (17). – С. 21-27.
10. Самохин В.Ф., Остроухов С.П., Мошков П.А. Экспериментальное исследование источников шумности беспилотного летательного аппарата с винтокольцевым движителем в толкающей компоновке // Труды МАИ. 2013. выпуск № 70. [электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=44459> (дата обращения 25.11.2013).
11. Moshkov P., Samokhin V., Yakovlev A. About the community noise problem of the light propeller aircraft // Akustika. – 2019. – Vol. 34. – P. 68-73.
12. Мошков П.А. Исследование вихревого шума вращающихся лопастей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Ест. науки. – 2020. – № 2 (89). – С. 85-98.
13. Малинина Е.С. Влияние предварительной стимуляции широкополосным шумом на восприятие приближения и удаления источника звука. Эффект пространственной

области // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. – 2014. – Т. 50. – № 1. – С. 59-68.

14. Малинина Е.С. Асимметрия и пространственная специфичность слухового последействия после адаптации к сигналам, имитирующим приближение и удаление источника звука // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. – 2014. – Т. 50. – № 5. – С. 369-380.

15. Малинина Е.С., Андреева И.Г. Слуховое последействие приближения и удаления источника звука: зависимость от траектории и области предъявления адаптирующих стимулов // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. – 2013. – Т. 49. – № 3. – С. 211-223.

16. Андреева И.Г., Малинина Е.С. Последействие приближающихся и удаляющихся источников звука // Физиология человека. – 2010. – Т. 36. – № 3. – С. 48-54.

17. Андреева И.Г., Вартамян И.А. Маскирующее влияние белого шума на временные параметры слуховой локализации радиально движущихся источников // Физиология человека. – 2004. – Т. 30. – № 2. – С. 38-44.

18. Андреева И.Г., Альтман Я.А. Пороговая длительность звуковых сигналов при восприятии человеком радиального движения звукового образа различного азимутального направления // Сенсорные системы. – 2000. – Т. 14. – № 1. – С. 11-17.

19. Андреева И.Г., Вартамян И.А. Иллюзии приближения и удаления источника звука в условиях интернализованного шума // Сенсорные системы. – 2009. – Т. 23. – № 3. – С. 219-228.

20. Альтман Я.А. Локализация движущегося источника звука. – Л.: Наука. – 1983. – 176 с.

21. Martinez-Carranza J., Rascon C. A Review on Auditory Perception for Unmanned Aerial Vehicles // Sensors. – 2020. – Vol. 20. P. 7276.

22. Hoglund E. et al. Auditory Acuity for Aircraft in Real-World Ambient Environments // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2010. – Vol. 128. – №. 1. – P. 164-171.

23. Буторина М.В., Тюрина Н.В., Иванов Н.И., Санников В.А. Классификация автомобильных дорог по уровням шума // Noise Theory and Practice. – 2020. – Т. 6. – № 4 (22). – С. 22-32.

References

1. Moshkov P.A., Ostrikov N.N., Samokhin V.F. On the community noise problem of the propeller-driven unmanned aerial vehicles // Trudy konferentsii. – Saint Petersburg. Politekhpress. – 2020. – P. 582-588.

2. Moshkov P.A. Prediction and reduction community noise of light propeller aircrafts // PhD thesis. Moscow. MAI. – 2015. – 143 p.

3. Kazhan V.G., Moshkov P.A., Samokhin V.F. Ambient Background Noise under Acoustic Tests of Aircrafts at the Local Aerodrome // Science and Education of the Bauman MSTU. – 2015. – № 7. – P. 146-170.

4. Moshkov P.A., Samokhin V.F., Yakovlev A.A. Selection of an audibility criterion for propeller driven unmanned aerial vehicle // Russian Aeronautics. – 2018. – Vol. 61. – № 2. – P. 149-155.

5. Dmitriev V.G., Samokhin V.F. Complex of algorithms and programs for calculation of aircraft noise // TsAGI Science Journal. – 2014. – Vol. 45. – №. 3-4. – P. 367-388.

6. Afanas'ev V.A., Degtyarev G.L., Meshchanov A.S. Formation of programmed spatial flight trajectories of unmanned aerial vehicles // Russian Aeronautics. – 2017. – Vol. 60. – № 3. P. 29-37.

7. Moshkov P., Ostrikov N., Samokhin V., Valiev A. Study of Ptero-G0 UAV Noise with Level Flight Conditions // 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. – 2019. – AIAA Paper. – №. 2019-2514.
8. Goncharenko B.I., Kuzmenkov V.Yu., Kotov A.N. Experimental study of the peculiarities of the formation of the noise spectrum of the unmanned aircraft // Noise Theory and Practice. – 2020. – Vol. 6. – № 4 (22). – P. 49-59.
9. Zaslavsky Yu.M., Zaslavsky V.Yu. Acoustic noise of a low flying quadrocopter // Noise Theory and Practice. – 2019. – Vol. 5. – № 3 (17). – P. 21-27.
10. Samokhin V.F., Ostroukhov S.P., Moshkov P.A. Experimental study of noise sources of an unmanned aerial vehicle with ducted propeller in a pushing configuration // Trudy MAI. – 2013. – №. 70. [electronic resource] – Available at – URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=44459> (date of the application 25.11.2013).
11. Moshkov P., Samokhin V., Yakovlev A. About the community noise problem of the light propeller aircraft // Akustika. – 2019. – Vol. 34. – P. 68-73.
12. Moshkov P.A. Study of vortex noise of rotating blades // Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Science. – 2020. – № 2 (89). – P. 85-98.
13. Malinina E.S. Perception of approaching and withdrawing sound sources after exposure to broadband noise: The importance of spatial domain // Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology. – 2014. – Vol. 50. – № 1. – P. 66-76.
14. Malinina E.S. Asymmetry and spatial specificity of auditory aftereffects following adaptation to signals simulating approach and withdrawal of sound sources // Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology. – 2014. – Vol. 50. – № 5. – P. 421-434.
15. Malinina E.S., Andreeva I.G. Auditory aftereffects of approaching and withdrawing sound sources: dependence on the trajectory and location of adapting stimuli // Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology. – 2013. – Vol. 49. – № 3. – P. 316-329.
16. Andreeva I.G., Malinina E.S. Auditory motion aftereffects of approaching and withdrawing sound sources // Human Physiology. – 2010. – Vol. 36. – № 3. – P. 290-294.
17. Andreeva I.G., Vartanyan I.A. White Noise Masks Some Temporal Parameters of the Auditory Localization of Radially Moving Targets // Human Physiology. – 2004. – Vol. 30. – №. 2. P. 159-165.
18. Andreeva I.G., Al'tman Ya.A. Porogovaya dlitel'nost' zvukovykh signalov pri vospriyatii chelovekom radial'nogo dvizheniya zvukovogo obraza razlichnogo azimutal'nogo napravleniya // Sensornye sistemy. – 2000. – Vol. 14. – № 1. – P. 11-17.
19. Andreeva I.G., Vartanyan I.A. Illyuzii priblizheniya i udaleniya istochnika zvuka v usloviyakh internalizovannogo shuma // Sensornye sistemy. – 2009. – Vol. 23. – № 3. – P. 219-228.
20. Al'tman Ya.A. Lokalizatsiya dvizhushchegosya istochnika zvuka. – Leningrad. Nauka. – 1983. – 176 p.
21. Martinez-Carranza J., Rascon C. A Review on Auditory Perception for Unmanned Aerial Vehicles // Sensors. – 2020. – Vol. 20. P. 7276.
22. Hoglund E. et al. Auditory Acuity for Aircraft in Real-World Ambient Environments // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2010. – Vol. 128. – №. 1. – P. 164-171.
23. Butorina M.V., Tyurina N.V., Ivanov N.I., Sannikov V.A. Classification of roads by noise levels // Noise Theory and Practice. – 2020. – Vol. 6. – № 4 (22). – P. 22-32.