

МЕТОДИКА РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ ГРАНИЦ СЛЫШИМОСТИ ВИНТОВЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Мошков П.А.^{1*}, Самохин В.Ф.^{2**}

¹ «Региональные самолеты» — филиал Корпорации «Иркут»,
ул. Ленинская Слобода, 26, стр. 5, Москва, 115280, Россия

² Центральный аэрогидродинамический институт
им. профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ),
ул. Жуковского, 1, Жуковский, Московская область, 140180, Россия

* e-mail: moshkov89@bk.ru, p_moshkov@ssj.irkut.com

** e-mail: samohin_vf@mail.ru

Статья поступила в редакцию 02.02.2021

Рассмотрена проблема шума на местности винтовых беспилотных воздушных судов специального и гражданского назначения. Предложен новый подход к оценке шума на местности винтовых беспилотных воздушных судов и разработана методика расчетной оценки границ их слышимости. Представлен пример расчетной оценки координат границ зоны акустической заметности для винтового беспилотного воздушного судна самолетного типа с поршневым двигателем. Рассмотрена классификация беспилотных воздушных судов взлетной массой до 600 кг.

Ключевые слова: беспилотное воздушное судно, шум на местности, слышимость, акустическая заметность.

Введение

В настоящее время все большее распространение получают беспилотные воздушные суда (БВС), предназначенные для решения широкого круга гражданских и военных задач. Одной из новых перспективных задач для гражданских БВС является нормирование шума по аналогии с нормированием шума на местности гражданских самолетов.

В то же время эффективность современной военной беспилотной авиационной системы (БАС) с БВС, выполняющими полеты в широком диапазоне скоростей и высот, в существенной мере зависит от степени заметности летательного аппарата, характеризующей в общем случае степень его живучести. Обнаружение аппарата может быть выполнено по его излучению в тепловом (инфракрасном) [1, 2], радиолокационном [3–5], акустическом [6–9] и оптическом (видимом) [10] диапазонах длин волн.

Для тяжелых БВС с реактивными двигателями, выполняющих полеты на высотах свыше 10 км со скоростями от 500 км/ч, проблема акустической заметности не является актуальной ввиду отсутствия звукового сигнала от аппарата,

регистрируемого на земле. В то же время для малоразмерных винтовых БВС, обладающих малой эффективной площадью рассеяния, выполняющих полеты на низких высотах с низкими скоростями, проблема акустической заметности становится актуальной ввиду низкой эффективности других средств обнаружения.

Целью настоящей работы является анализ проблемы акустики гражданских и военных БАС с винтовыми БВС. В работе решаются следующие задачи:

1. Рассмотрены современные подходы к локализации винтовых БВС по акустическому излучению.

2. Предложен новый подход к нормированию уровней шума на местности винтовых БВС гражданского назначения и степени слышимости БВС военного назначения.

3. Предложена методика расчетной оценки границ слышимости БВС, которая может быть использована на различных этапах проектирования аппарата, а также стать основой для разработки методики построения пространственно-временных траекторий полета БВС без возможности его

обнаружения как на слух, так и при помощи специальных устройств.

О проблеме акустической заметности БВС

Проблема акустической заметности БВС рассматривается с точки зрения выделения полезного сигнала на фоне акустических помех и локализации источника излучения двумя методами — аудиометрическим и приборным. Аудиометрический метод относится к восприятию шума наблюдателем (на слух), а приборный к вопросам обнаружения БВС при помощи специальных измерительных систем и алгоритмов постобработки регистрируемых сигналов. При этом необходимо: обеспечивать неслышимость и незаметность отечественных БВС по траектории полета; иметь возможность обнаружения, идентификации и определения местоположения БВС противника в пространстве и траектории его полета в режиме реального времени по его акустическому излучению.

Для решения задачи приборной локализации БВС применяются фазированные микро-

фонные измерительные системы (антенны) в рамках систем акустической локации БВС, которые могут быть установлены как на земле (рис. 1) [11], так и на специальных БВС, патрулирующих охраняемую территорию (рис. 2) [12]. В обоих случаях сигналы с антенн передаются по каналу связи на наземную станцию контроля, где происходит их обработка в режиме реального времени.

В общем случае измерительная система записывает сигнал, включающий все возможные работающие в данный момент времени источники шума как природного, так и техногенного происхождения. Поэтому вопросы определения фонового шума занимают отдельное место в проблеме акустической заметности БВС. В частности, в городской среде существенен шум автотранспорта, а в условиях открытой местности при высоких скоростях ветра будет преобладать собственный шум турбулентной атмосферы. При отсутствии ветрозащитных экранов может доминировать собственный шум турбулентной атмосферы и (или) шум используемой измерительной системы. А при локализации БВС при помощи других БВС из

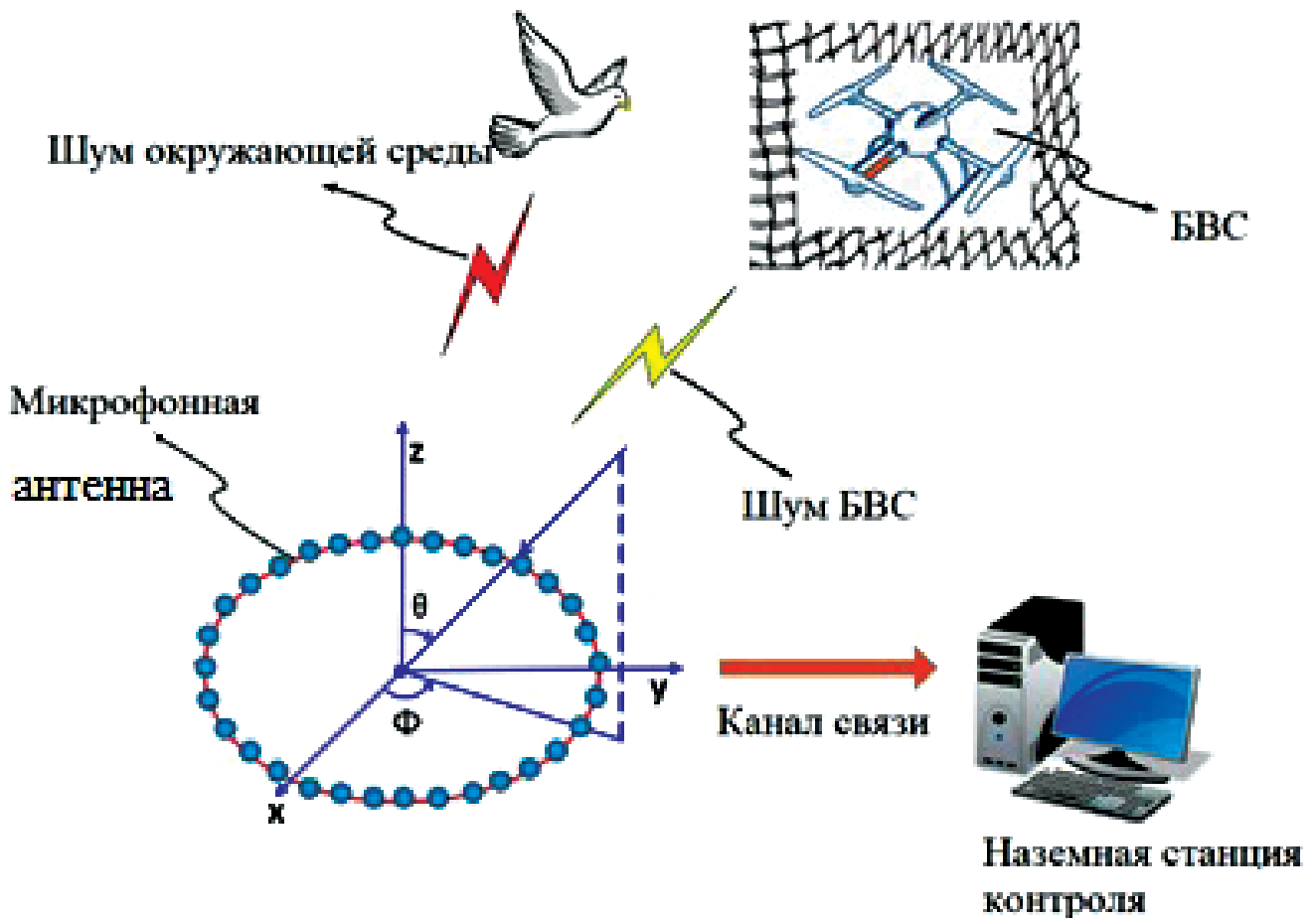


Рис. 1. Схема локализации БВС при помощи решетки, расположенной на земле



Рис. 2. Схема локализации БВС при помощи микрофонных антенн, устанавливаемых на БВС

регистрируемого сигнала необходимо исключить составляющие шума БВС, на котором расположена микрофонная антенна [13–16].

Методы приборной локализации БВС можно разделить на методы оценки времени и направления прибытия (DOA – direction of arrival) и методы бимформинга (beamforming).

Например, алгоритм бимформинга (затухания и суммирования во временной области – Time-domain delay and sum beamforming (TDDSB)) состоит в сравнительной оценке фаз сигналов, одновременно приходящих на все микрофоны антенны. Каждый регистрируемый микрофоном сигнал задерживается или опережает другой на время в зависимости от направления фокусировки. Таким образом, сигналы, полученные суммированием, дают выходной отклик [17]

$$p(t, \Theta) = \frac{1}{M} \left(p_{ref}(t) + \sum_{n=1}^{N-1} p_n(t + \tilde{\tau}_n(\Theta)) \right), \quad (1)$$

где $p_{ref}(t)$ – звуковое давление, измеряемое на базовом микрофоне решетки; $p_n(t)$ – звуковое дав-

ление, измеряемое на n -м микрофоне решетки; N – общее число микрофонов в решетке.

Локализация источника шума фактически обеспечивается за счет того, что регистрируемые микрофонами антенны сигналы являются схожими, но опережают или запаздывают во времени относительно сигнала, регистрируемого базовым микрофоном решетки. Когда система обнаружения на основе алгоритмов бимформинга настроена на истинное положение источника звука, т.е. $\Theta = \Theta_s$, направленная мощность отклика (steered response power (SPR)) выходного сигнала $|p|^2$ является максимальной, а компоненты сигналов, приходящих с других направлений, менее мощные. $\tilde{\tau}_n(\Theta)$ представляет собой время распространения от направления фокусировки Θ до n -го микрофона и зависит от расстояния между микрофонами.

Направление на источник звука определяется азимутальным углом φ и углом места (углом элевации) θ (рис. 3) [18], так что $\Theta = (\varphi, \theta)$. Направление на источник звука соответствует максимуму выходного сигнала, заданного уравнением (1).

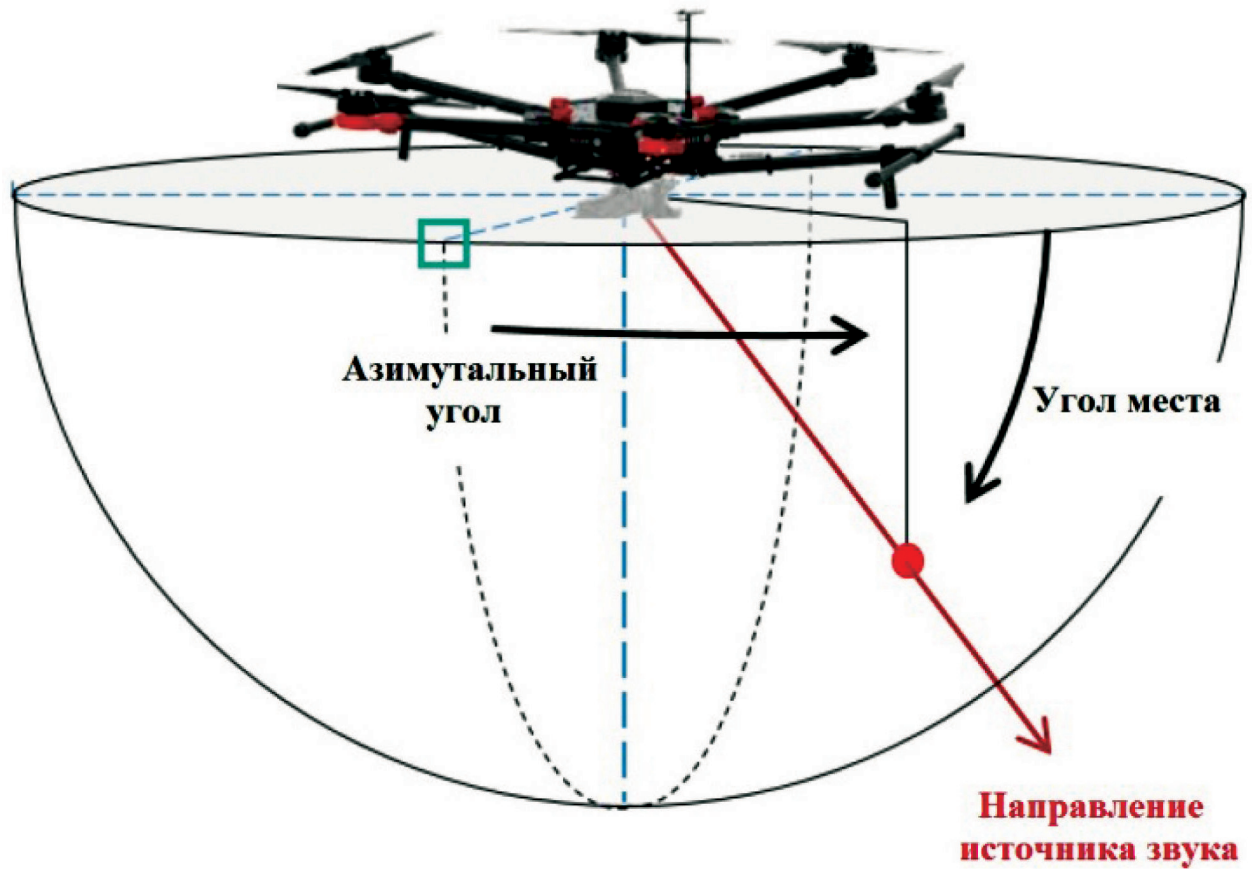


Рис. 3. Угол места и азимутальный угол, характеризующие направление источника звука

Для обнаружения и локализации БВС измерительная система должна включать минимум два микрофона (акустических датчика) [19]. Точность обнаружения БВС в общем случае зависит от числа микрофонов в антенне, расстояния между

ними и применяемого алгоритма постобработки сигналов.

Принципиальная схема обнаружения БВС с помощью микрофонных антенн приведена на рис. 4 [20]. Источники шума в реальных условиях ок-

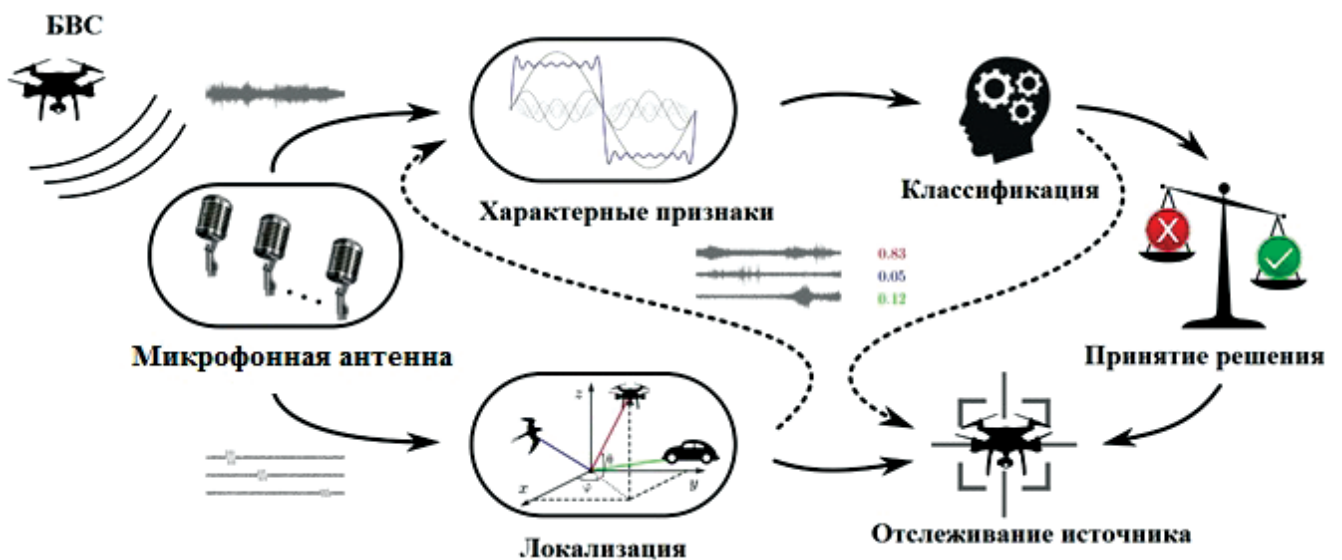


Рис. 4. Схема обнаружения и локализации БВС при помощи микрофонных антенн

ружающей среды могут быть как природного, так и техногенного происхождения. Как и БВС, они обладают характерными признаками, характеризующими их акустический портрет. Сигналы, регистрируемые антенной, обрабатываются в режиме реального времени. Источники шума классифицируются системой, и при необходимости система начинает отслеживать местоположение БВС в пространстве в режиме реального времени, также определяя траекторию его движения. В случае обнаружения источника фонового шума, не являющегося БВС, далее системой он не отслеживается.

Пример локализации методом DOA беспилотного воздушного судна DJI S900, выполняющего полет к микрофонной решетке с расстояния 400 м на высоте 15 м, представлен на рис. 5 [20]. Можно видеть, что в БВС успешно отслеживается с расстояния 200 м (через 22 с), через 70 с БВС пролетает над решеткой. Красные линии на графиках соответствуют методу DOA, синие линии соответствуют истинному положению БВС, определяемому на базе данных системы глобального позиционирования (GPS). Расстояние и скорость полета в эксперименте изменяются по закону, представленному на нижнем графике (рис. 5).

Классификация БВС

Идентификация БВС по акустическому излучению для различных классов летательных аппара-

тов возможна благодаря особенностям акустического поля. Классификация различных типов винтовых БВС со взлетной массой до 600 кг основана на конструктивных особенностях аппарата, характеризующих частоту, интенсивность и направленность тональных составляющих в спектре его акустического излучения. Среди основных типов БВС отметим:

- мультикоптеры,
- БВС самолетного типа с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) или электродвигателем и воздушным винтом в толкающей или тянущей компоновках,
- БВС вертолетного типа (одновинтовой, соосной или двухвинтовой продольной схемы) и т.д.

В зависимости от типа БВС доминирующие источники шума будут различными [21], и при проектировании аппарата необходимо обеспечивать их минимальную звуковую мощность с учетом аэроакустических эффектов в реальных компоновках и применяя современные технологии снижения шума [22, 23].

В табл. 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

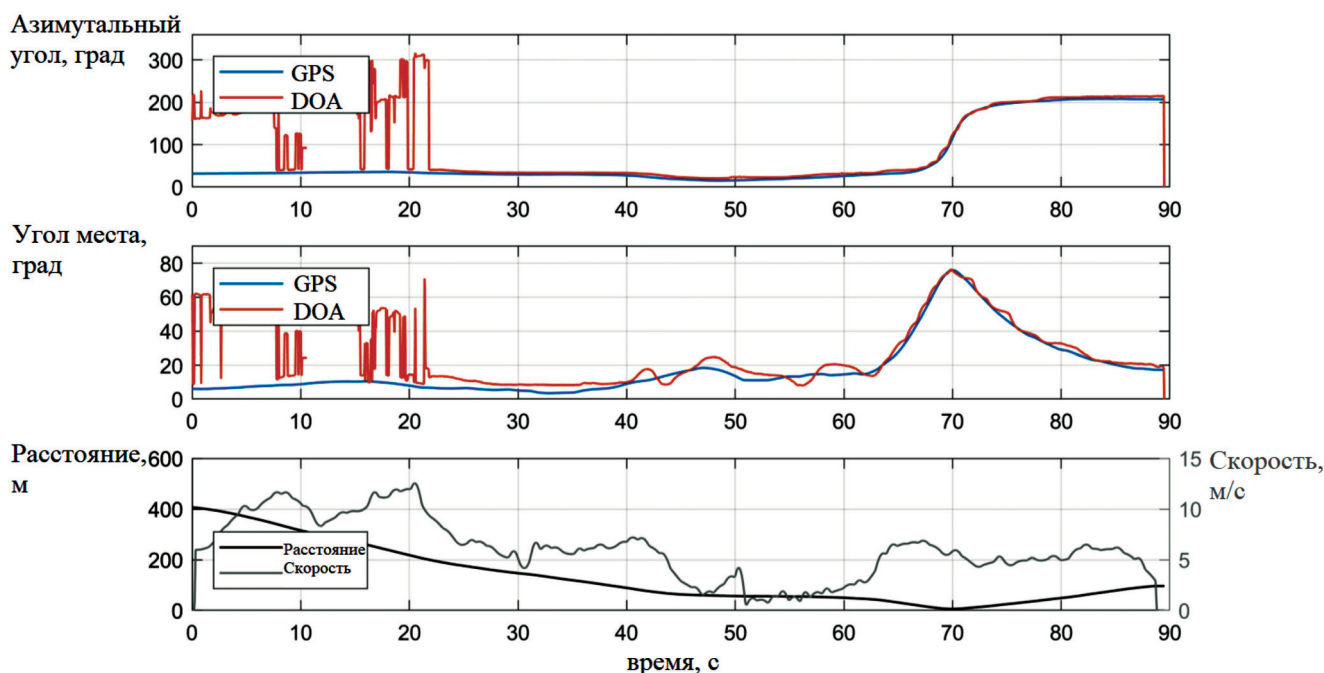


Рис. 5. Пример локализации методом DOA БВС DJI S900, выполняющего полет к микрофонной решетке с расстояния 400 м на высоте 15 м

Таблица 1

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

Тип гармоник 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 и число цилиндров в двигателе

состав силовой установки (СУ) 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 СУ входят электродвигатели, то в спектре шума БВС присутствуют высокочастотные тональные составляющие на частотах, кратных частоте вращения ротора и числу пар полюсов.

Отметим, что высокочастотные составляющие шума существенным образом затухают с расстоянием и на относительно больших расстояниях могут не регистрироваться в измеряемом звуковом сигнале. Низкочастотный шум хорошо маскируется собственным фоном турбулентной атмосферы при слабом и умеренном ветре, является менее громким для наблюдателя, но в то же время медленнее затухает с расстоянием.

Акустическим портретом БВС являются сигналы, записанные многомикрофонной антенной или даже одним микрофоном для известных локализованных источников. Эти сигналы могут быть отфильтрованы и использованы в качестве входных сигналов для системы обнаружения БВС. Испытания по определению акустического портрета БВС могут быть выполнены в условиях открытой местности или в заглушенных камерах [24–26].

Не имея данных об акустическом портрете БВС противника, аппарат может быть классифицирован в соответствии с табл. 1 и с учетом характерных особенностей спектра может быть идентифицирован, т.е. определен тип БВС – мультикоптер, БВС самолетного типа с поршневым двигателем, БВС вертолетного типа одновинтовой схемы с электродвигателем и т.д.

В международном стандарте ИКАО уровни шума легких винтовых самолетов на местности нормируются в зависимости от взлетной массы летательного аппарата.

Классификация БВС согласно данным работ [27, 28] представлена в табл. 2. Базовая информация о БВС включает в себя: взлетную массу, характерные размеры, скорость и высоту полета, а также эффективную площадь рассеяния (ЭПР).

Можно видеть, что для БВС класса I (a) (b) и (c) особенно актуальна проблема акустической заметности ввиду низкой эффективной площади рассеяния БВС на характерных расстояниях 100–1000 м. Для аппаратов из класса I (d) локализация аппаратов по акустическому излучению может быть реализована в дополнение к классическим методам с целью увеличения вероятности и точности обнаружения. Для класса II (тактические БВС) согласно представленной классификации проблема акустической заметности менее актуальна, ввиду высокой эффективности радиолокационных методов пеленгации, высокой скорости и высоты полета БВС.

Об одном подходе к оценке степени акустической заметности винтовых БВС

Как было отмечено, международных стандартов, регламентирующих предельно допустимые уровни шума на местности винтовых БВС, в настоящее время нет. Также не существует нормативных ограничений, характеризующих степень акустической заметности БВС специального назначения.

В Евросоюзе в 2020 году были разработаны требования к предельно допустимым уровням шума на местности БВС типа мультикоптер для

Таблица 2

Классификация БВС [27, 28]

Классификация	Базовая информация о БВС				
	Взлетная масса, кг	Базовые размеры, см ³	Скорость полета, км/ч	Высота полета, м	ЭПР, дБм ²
Класс I (a) и (b) микроБВС	менее 2	25x25x30	80	100	-20 (-30)*
Класс I (c) миниБВС	от 2 до 20	40x40x30	100	1000	-13 (-20)*
Класс I (d) малоразмерные БВС	от 20 до 150	200x150x50	150	1500	-10
Класс II тактические БВС	от 150 до 600	1000x700x100	300	3000	-3

* в скобках указаны целевые значения показателей в ближайшей перспективе

двух диапазонов взлетных масс – до 900 г и от 900 до 4000 г [29–31]. Нормы (табл. 3) сформулированы аналогично стандарту ИКАО. Для аппаратов с взлетной массой до 900 г уровни шума не зависят от взлетной массы. Для диапазона 900–4000 г уровни задаются в зависимости от взлетной массы. При этом предполагается ужесточение через 2 года после вступления в силу настоящего нормативного документа на 2 дБА, а через 4 года – на 4 дБА. Единицей оценки шума является суммарный взвешенный по шкале А стандартного шумомера уровень звуковой мощности.

При проведении испытаний на определение соответствия требованиям норм БВС должен «висеть» на высоте 0,5 м над отражающей поверхностью. Измерения должны быть выполнены в соответствии с п. 7.2.3 ГОСТ Р ИСО 3744-2013 [32]. Испытания выполняются для всех конфигураций устанавливаемого на БВС оборудования, так и без него.

Отметим, что в нормах ИКАО единицей оценки уровней шума на местности легких винтовых

самолетов является суммарный взвешенный по шкале А стандартного шумомера уровень звукового давления, определяемый при проведении сертификационных испытаний по заданной методике. А ранее авторами в 2015 году [33, 34] на основании многочисленных исследований был предложен критерий слышимости БВС с винтомоторной силовой установкой как разница между взвешенным суммарным уровнем звукового давления, соответствующим излучению БВС, и уровнем фонового шума в дБА.

Вероятнее всего для оценки степени акустической заметности, определяемой аудиометрическим и приборным методами, для винтовых БВС различных типов целесообразно использовать две единицы измерения – суммарный взвешенный по шкале А стандартного шумомера уровень звукового давления и суммарный уровень звуковой мощности в дБА. Нормы целесообразно разрабатывать по аналогии с нормами ИКАО для различных типов БВС и для различных диапазонов взлетных масс. Разработка подобного рода нор-

Таблица 3

Максимальные взвешенные по шкале А стандартного шумомера уровни звуковой мощности на режиме висения (включая переходный период времени)

Взлетная масса m , г	Максимальный уровень звуковой мощности, дБА		
	с момента вступления в силу	через два года после вступления в силу	через четыре года после вступления в силу
$m < 900$	85	83	81
$900 \leq m < 4000$	$85 + 18,5 \lg(m/900)$	$83 + 18,5 \lg(m/900)$	$81 + 18,5 \lg(m/900)$

мативных документов требует выполнения множества экспериментальных исследований шума эксплуатируемых БВС и оценки степени их акустического совершенства, т.е. возможности снижения шума за счет применения технологий различного уровня готовности.

Суммарный взвешенный по шкале А стандартного шумомера уровень звуковой мощности не зависит от расстояния и не может характеризовать акустическую заметность, которая зависит от удаления объекта от точки регистрации излучения и условий окружающей среды. В то же время от спектра уровней звуковой мощности источника звука, зная его диаграмму направленности или принимая ее в первом приближении сферической, можно перейти к оценке уровней шума ЛА в дальнем звуком поле при заданных атмосферных условиях и расстояниях. Суммарный взвешенный уровень звуковой мощности также может быть использован для сравнительной оценки степени акустической заметности различных БВС одного класса.

В качестве характерных режимов для нормирования шума, вероятнее всего, для БВС самолет-

ного типа должен быть выбран режим крейсерского полета с максимальной скоростью, а для мультикоптеров и вертолетов – режим висения. И в том и другом случае испытания необходимо выполнять при максимальной взлетной массе аппаратов.

Для БВС самолетного типа еще один из подходов к оценке степени акустической заметности может быть основан на результатах статических испытаний. То есть представляется возможным сформулировать требования к предельно допустимым уровням шума, генерируемого при работе воздушного винта на месте, при непревышении которых ЛА заведомо будет удовлетворять требованиям по обеспечению требуемой степени слышимости и заметности в реальных полетных условиях.

Структура предлагаемого расчетного метода оценки границ акустической заметности БВС

Структура предлагаемого метода оценки границ слышимости и заметности БВС показана на рис. 6. Данные о звуковом поле ЛА могут быть получены на базе расчетных методов как суперпо-

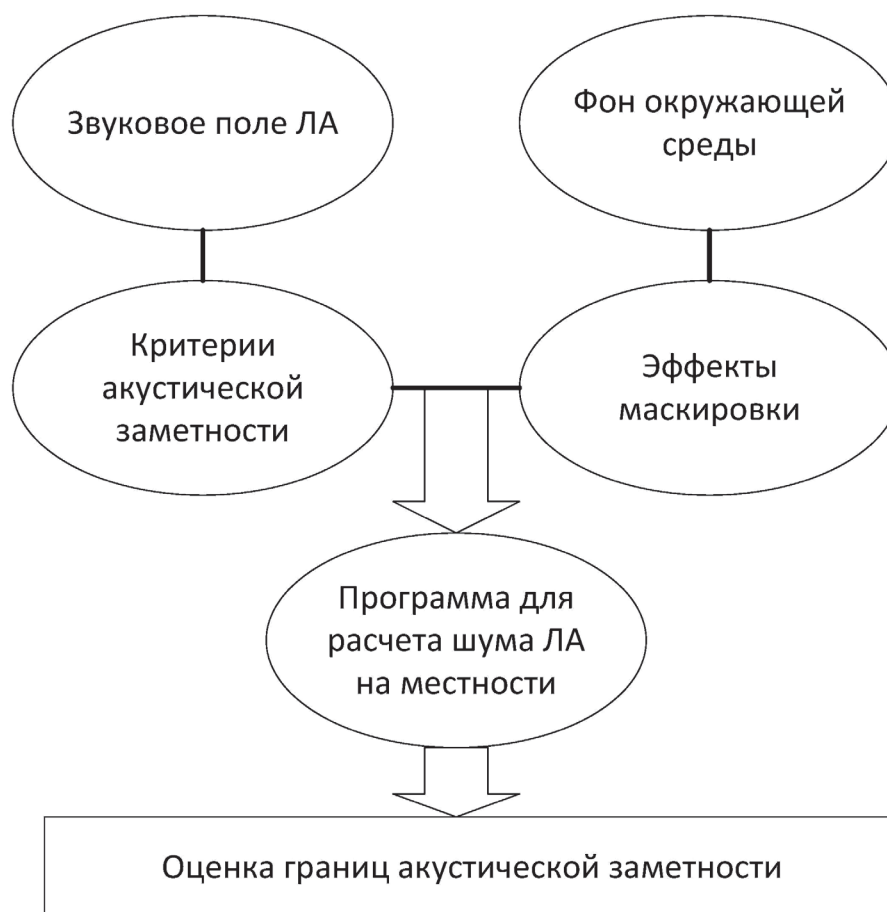


Рис. 6. Структура методики оценки границ акустической заметности винтовых БВС

зиции полей основных источников, а также экспериментально на базе летных, статических или лабораторных испытаний. Данные о фоне окружающей среды в различных ландшафтах местности при различных скоростях ветра могут быть получены экспериментально [35]. Для оценки границ акустической заметности БВС также необходимы численно определенные критерии акустической заметности и модели, описывающие эффекты маскировки шума БВС фоном окружающей среды при восприятии шума наблюдателем. Расчетные исследования целесообразно выполнять в специализированных программных комплексах для оценки шума ЛА на местности, таких как АЭРОШУМ (ЦАГИ) [36], ANOPP (НАСА), SOPRANO (Евросоюз) и др.

Под зоной акустической заметности понимается область пространства вокруг БВС, при нахождении вне которой наблюдателя летательный аппарат может быть обнаружен по его акустическому излучению при помощи аудиометрических или приборных методов. *Границей зоны акустической заметности, определяемой аудиометрически*, является окружающая эту область замкнутая поверхность, на которой выполняется основное условие аудиозаметности данного типа БВС. В свою очередь, *границей зоны акустической заметности, определяемой приборными методами*, является условие приборной заметности.

Отметим, что в целом переход от границ аудиозаметности к границам приборной заметности в расчетных исследованиях может быть выполнен на основании дополнительных корректирующих функций, связывающих эти границы. В частности, экспериментально можно определить временной интервал между моментом выделения тональных составляющих в регистрируемом на земле сигнале и моментом начала аудиозаметности ЛА наблюдателем.

Пример расчетной оценки границ слышимости и заметности БВС самолетного типа

В качестве примера было выполнено расчетное исследование по определению координат границ зон акустической заметности БВС самолетного типа, в состав силовой установки которого входит ДВС. Объектом исследования является перспективный БВС, взлетная масса которого составляет 1000 кг, крейсерская скорость горизонтального полета 140 км/ч, а высота — 3000 м. Силовая установка БВС включает в себя ДВС и толкающий 4-лопастный винт фиксированного шага.

Отметим, что при расположении винта в толкающей компоновке можно ожидать увеличения тонального шума по сравнению со случаем изолированного винта [37]. Эффект зависит от соотношения между характерными геометрическими параметрами воздушного винта и ЛА.

Оценка границ слышимости БВС выполнялась с помощью программного комплекса АЭРОШУМ (ЦАГИ) [36]. Для расчета шума СУ как суперпозиции звуковых полей воздушного винта и поршневого двигателя используется интегральная модель, разработанная авторами ранее [38]. Отметим, что программный комплекс позволяет учитывать:

- эффект рассеяния шума СУ на элементах планера ЛА [39, 40];
- влияние степени и масштаба турбулентности набегающего потока на шум воздушного винта [41];
- акустические эффекты, возникающие при формировании акустического поля летательного аппарата и при распространении звука до контрольной точки вблизи земной поверхности,
- шум обтекания планера [42, 43].

При выполнении расчетных оценок границ слышимости для БВС самолетного типа целесообразно определять влияние следующих параметров на их положение:

- высота полета ЛА;
- скорость и направление полета;
- скорость и направление ветра и др.

В расчетном исследовании полагалось, что земная поверхность представляет собой плотный грунт, покрытый травой умеренной высоты. Контрольная точка располагалась на высоте 1,2 м от земной поверхности. Рассчитывалась матрица из 50 спектров уровней звукового давления в треть-октавных полосах частот (50—10000 Гц) в контрольной точке на местности при полете БВС с шагом 2 с. Каждый спектр звукового давления соответствует определенному положению самолета на траектории полета и, соответственно, определенному направлению распространения акустического излучения от БВС.

Критерий аудиозаметности винтовых БВС самолетного типа с ДВС (ΔLa) был предложен авторами ранее [34] на основании многочисленных экспериментальных исследований легких винтовых самолетов и БВС. Критерий (условие) аудиозаметности БВС самолетного типа может быть задан выражением:

$$\Delta La = L_{\text{ЛА}} - L_{\text{фона}} \geq 3 \text{ дБА}, \quad (2)$$

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.

То есть когда суммарный уровень шума ЛА на 3 дБА становится выше уровня фонового шума, то ЛА становится слышимым. Поэтому в расчетном исследовании по спектру излучения в 50 положениях БВС по траектории полета определялся суммарный, взвешенный по шкале А стандартного шумомера, уровень звукового давления.

Расчетная схема для оценки координат границ зоны слышимости БВС представлена на рис. 7. В данном примере расчета рассматривается высота полета БВС – 3000 м. Боковое удаление от трассы полета Y принималось равным 1000, 2000, 3000 и 5000 м. На графике также представлены направления ветра, которым соответствуют углы ψ относительно вектора скорости полета БВС, 0, 90, 180 и 270°.

$$L_A = f(X, Y, H, \psi), \quad (3)$$

где ψ – угол ветра; X – продольная координата до наблюдателя; Y – поперечная координата наблюдателя относительно контрольной точки; H – высота полета.

Расчет координат границ зоны слышимости сводится к определению положений ЛА (продольная координата – X , поперечная координата – Y) относительно наблюдателя при пролете БВС над контрольной точкой в момент времени, когда скорректированный по шкале А стандартного шумомера суммарный уровень звукового давления, соответствующий излучению от ЛА, превышает суммарный взвешенный уровень природного фона на 3 дБА.

На рис. 8 представлены графики зависимостей (3) для скорости ветра 3 м/с, высоты полета 3000 м, при положении наблюдателя перпендикулярно трассе полета БВС на расстоянии 1000 м от

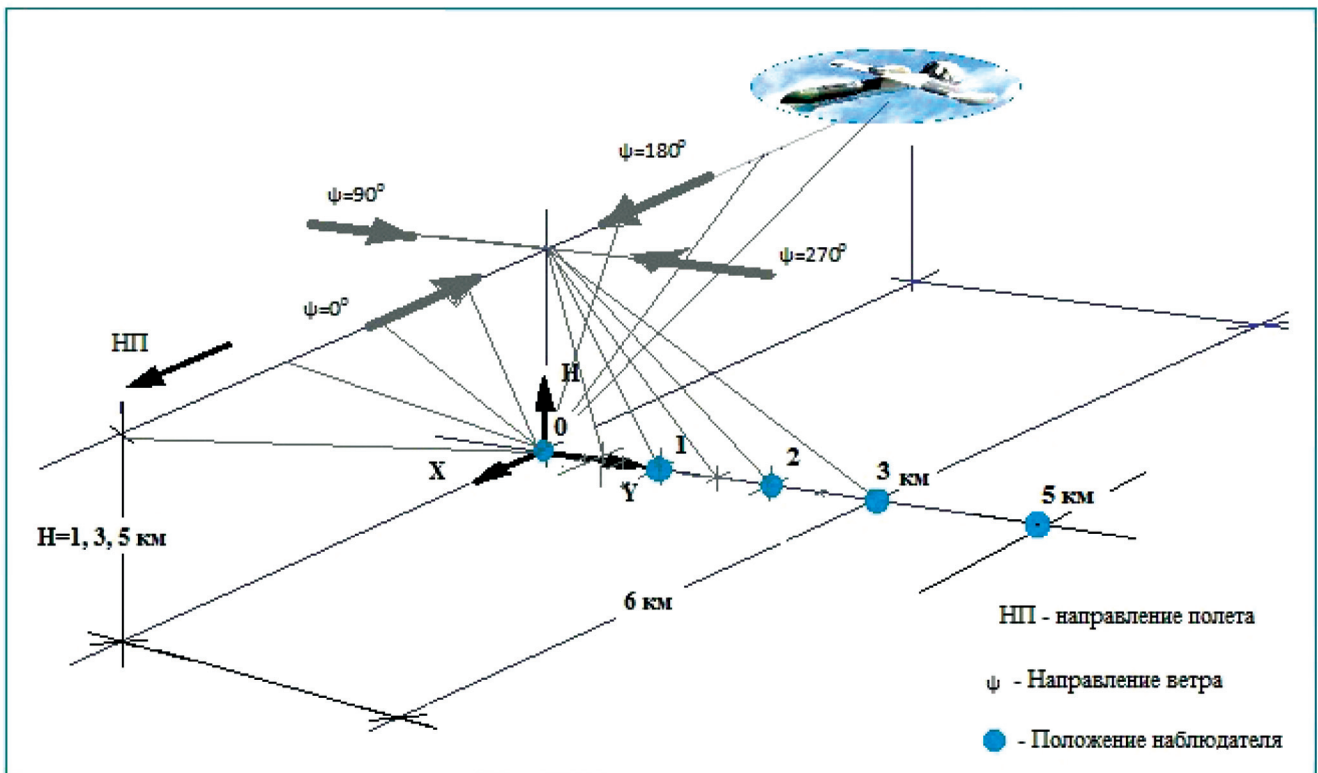


Рис. 7. Общая схема положения ЛА и наблюдателя при расчете границ зон акустической заметности

Представление о соотношении между взвешенными суммарными уровнями шума БВС на местности и уровнями звукового давления, соответствующими природному фону, дают графики зависимостей вида:

контрольной точки на местности и для различных направлений ветра. Штриховая линия на графике соответствует уровню фона в условиях открытой местности при скорости ветра 3 м/с в сумме с критерием аудиозаметности 3 дБА.

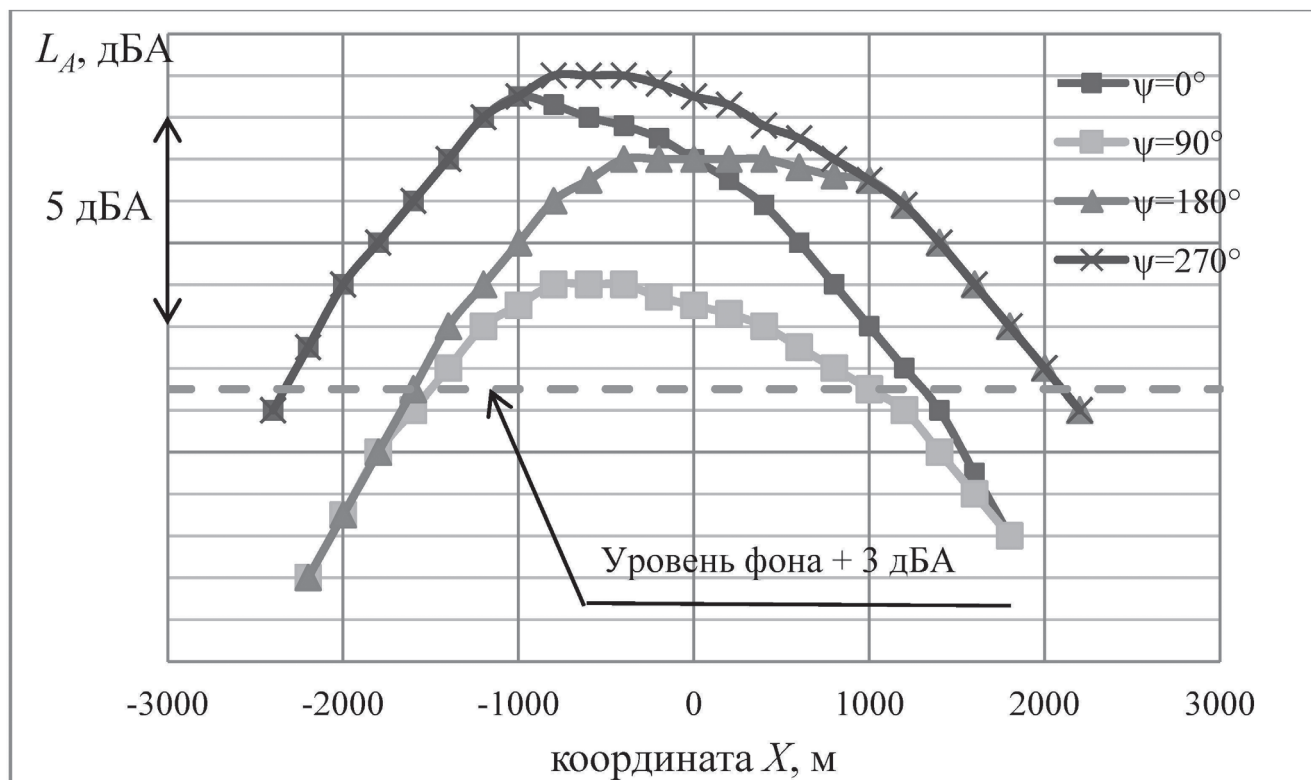


Рис. 8. Изменение уровня шума в точке на местности с поперечной координатой $Y = 1000$ м при полете самолета на $H = 3000$ м для различных направлений ветра и скорости 3 м/с

Из представленных на рис. 8 данных следует, что направление ветра оказывает заметное влияние на характер изменения уровня шума самолета в контрольной точке на местности. Наибольшие уровни шума отмечаются при направлении ветра $\psi = 270^\circ$ (ветер дует от наблюдателя в сторону трассы полета самолета), а наименьшие уровни шума — при направлении ветра $\psi = 90^\circ$ (ветер дует от ЛА в сторону наблюдателя).

Если ветер дует вдоль трассы полета самолета, то при встречном ветре ($\psi = 0^\circ$) наибольшие уровни шума на местности отмечаются в передней полусфере самолета (самолет приближается к наблюдателю), а наименьшие уровни шума — в задней полусфере (БВС удаляется от наблюдателя). При полете с попутным ветром ($\psi = 180^\circ$) картина противоположная — наибольшие уровни шума на местности отмечаются в задней полусфере, а наименьшие — в передней полусфере самолета.

Пример определения координат границ зон акустической заметности БВС рассмотрен для случая скорости ветра 3 м/с при высоте полета БВС 3000 м для направления ветра 0° (рис. 9).

Представленные расчетные данные показывают, что в рассматриваемом примере расчета для высоты полета 3000 м БВС не слышен на земле при удалении наблюдателя от трассы полета на 3000 м в задней полусфере. При расположении наблюдателя под траекторией полета продольная координата (X) границы зоны слышимости составляет 3000 м в передней полусфере и 1500 м в задней полусфере БВС.

В работе [34] авторами на основе анализа временных реализаций звукового давления установлено, что БВС с поршневым двигателем, совершающий горизонтальный полет на высоте около 100 метров со скоростью 80—120 км/ч, можно обнаружить с помощью измерительной аппаратуры в среднем на 6 секунд раньше наблюдателя. Для данного примера расчета с учетом крейсерской скорости полета БВС 140 км/ч границы зоны приборной заметности будут дальше от наблюдателя по сравнению с границами зоны аудиозаметности (рис. 9) на $X \approx 233,3$ м как на участке приближения, так и на участке удаления от контрольной точки.

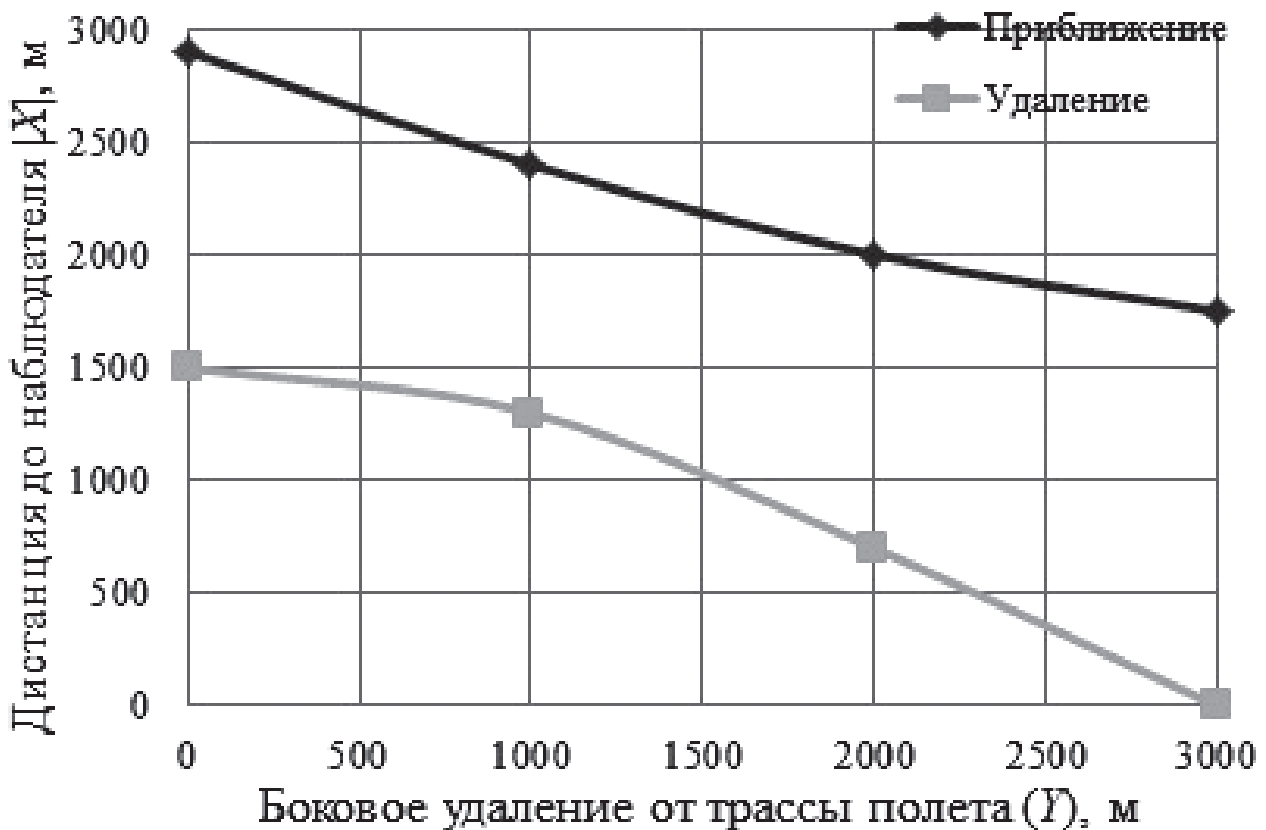


Рис. 9. Координаты границ зоны слышимости БВС при высоте полета 3000 м и скорости ветра 3 м/с ($\psi = 0^\circ$)

Выводы

Рассмотрена проблема шума на местности винтовых БВС гражданского и специального назначения. Представлена классификация БВС взлетной массой до 600 кг и предложен новый подход к оценке шумности винтовых БВС. Для оценки степени акустической заметности и при нормировании шума винтовых БВС целесообразно использовать две единицы – суммарный взвешенный по шкале А стандартного шумомера уровень звукового давления и суммарный уровень звуковой мощности в дБА.

Предложена методика расчетной оценки границ акустической заметности БВС. Составными элементами методики стали: модели шума основных источников или экспериментальные данные о шуме БВС, данные о фоновом шуме, критерии акустической заметности различных типов БВС, а также программное обеспечение для расчета шума ЛА на местности.

Пример расчетного определения координат границ акустической заметности БВС самолетного типа показал, что разработанный метод позволяет оценивать влияние уровня фона окружающей среды, а также направления и скорости ветра на степень акустической заметности БВС. Предложенная методика оценки границ акустической заметности может быть использована для решения обратной задачи – построения пространственно-временных траекторий полета БВС без возможности обнаружения как аудиометрическим, так и приборным методами [44].

Библиографический список

1. Евдокимов И.Е., Филиппов Г.С., Яковлев А.А. Проблемы снижения тепловой заметности двигателей ЛА // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С. 223–227.
2. Николаенко В.С., Филиппов Г.С., Яценко Б.Ю. Проблемы снижения тепловой заметности двигателя летательного аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 4. С. 109–114.
3. Зайцев А.В., Амосов Е.В., Митрофанов Д.Г. и др. Радиолокационное устройство обнаружения беспилотных летательных аппаратов. Патент RU 136192 U1. Бюл. № 36, 27.12.2013.
4. Разиньков С.Н., Баранов С.О., Разинькова О.Э. Анализ диаграмм направленности и бистатического рассеяния линейных антенных решеток беспилотного летательного аппарата со сниженной радиолокационной заметностью // Радиотехника. 2020. Т. 84. № 5(10). С. 43–52. DOI: 10.18127/j00338486-202005(10)-05
5. Сапронов Д.И., Каменский И.В. Метод одновременного оценивания дальностей и скоростей целей в РЛС ближнего действия // Электросвязь. 2019. № 8. С. 34–42.
6. Мошков П.А., Остриков Н.Н., Самохин В.Ф. О проблеме шума на местности винтовых беспилотных летательных аппаратов // Труды Всероссийской акустической конференции: Сборник трудов III Всероссийской акустической конференции (21–25 сентября 2020; Санкт-Петербург). – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. С. 582–588.
7. Руденко О.В., Гусев В.А. Движущийся объект: спектры сигналов пассивной, активной локации и переходное излучение // Акустический журнал. 2020. Т. 66. № 6. С. 599–609. DOI: 10.31857/S032079192006009X
8. Kartashov V.M., Oleynikov V.N., Sheyko S.A., Babkin S.I., Korytsev I.V., Zubkov O.V. Peculiarities of small unmanned aerial vehicles detection and recognition // Telecommunications and Radio Engineering. 2019. Vol. 78. No. 9, pp. 771–781. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i9.30
9. Афанасьева Е.М., Понькин В.А., Семенякин А.Ю. Устройство снижения оптической заметности летательных аппаратов. Патент RU 2327099 С1. Бюл. №17, 20.06.2008.
10. Карташов В.М., Олейников В.Н., Шейко С.А. и др. Особенности обнаружения и распознавания малых беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. 2018. № 195. С. 235–243.
11. Guo J., Ahmad I., Chang K. Classification, positioning, and tracking of drones by HMM using acoustic circular microphone array beamforming // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2020. No. 9, 19 p. DOI: 10.1186/s13638-019-1632-9
12. Yamada T., Itoyama K., Nishida K., Nakadai K. 3D Sound Source Tracking for Drones Using Direction Likelihood Integration // QUIET DRONES: International e-Symposium on UAV/UAS Noise (19–21 October 2020; FNTP, Paris, France), 7 p.
13. Insausti X., Hogstad B.O., Pätzold M. Modelling and Simulation of Ego-Noise of Unmanned Aerial Vehicles // 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference – VTC2020-Spring (25–28 May 2020; Antwerp, Belgium, Belgium). DOI: 10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9128572
14. Qayyum, A., Hassan, K., Anika A. et al. DOANet: a deep dilated convolutional neural network approach for search and rescue with drone-embedded sound source localization // Eurasip Journal on audio, speech and music processing. 2020. No. 16. DOI: 10.1186/s13636-020-00184-2
15. Cabrera-Poncè A.A., Martinez-Carranzà J., Rascon C. Detection of nearby UAVs using a multi-microphone array on board a UAV // International Journal of Micro Air Vehicles. 2020. Vol. 12. DOI: 10.1177/1756829320925748
16. Furukawa K., Okutani K., Nagira K., Otsuka T., Itoyama K., Nakadai K., Okuno H.G. Noise correlation matrix estimation for improving sound source localization by multirotor UAV // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. (3–7 November 2013; Tokyo, Japan), pp. 3943–3948. DOI: 10.1109/IROS.2013.6696920
17. Blanchard T., Thomas J.H. UAV's localization from a microphone array by exploiting the harmonic structure of the sound produced // QUIET DRONES: International e-Symposium on UAV/UAS Noise (19–21 October 2020; FNTP, Paris, France), 10 p.
18. Go Y., Choi J.S. Signal-to-Noise Ratio Enhancement Method for Improving Sound Source Detection of Drone-mounted Phased Microphone Array // QUIET DRONES: International e-Symposium on UAV/UAS Noise (19–21 October 2020; FNTP, Paris, France), 8 p.
19. Борзов А.Б., Лихоеденко К.П., Павлов Г.Л. и др. Нейросетевая адаптивная система распознавания объектов по их акустическим излучениям // Патент RU 2513719 С1. Бюл. № 11, 20.04.2014.
20. Blass M., Graf F. A Real-Time System for Joint Acoustic Detection and Localization of UAVs // QUIET DRONES: International e-Symposium on UAV/UAS Noise (19–21 October 2020; FNTP, Paris, France), 18 p.
21. Мошков П.А., Самохин В.Ф. Экспериментальное определение роли поршневого двигателя в суммарном шуме силовой установки легкого винтового самолета // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 2. С. 50–61.
22. Мошков П.А., Самохин В.Ф. Методы снижения шума и заметности беспилотных летательных аппаратов с винтомоторной силовой установкой // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 1. С. 38–48.
23. Мошков П.А., Самохин В.Ф. Проблемы проектирования легких винтовых самолетов с учетом требований по шуму на местности // Вестник Москов-

- ского авиационного института. 2021. Т. 28. № 1. С. 19-34. DOI: 10.34759/vst-2021-1-19-34
24. *Беляев И.В., Валиев А.В., Мошков П.А., Остриков Н.Н.* Исследование акустических характеристик беспилотного летательного аппарата «Птеро-G0» в заглушенной камере АК-2 // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 4. С. 52–62.
25. *Moshkov P., Ostrikov N., Samokhin V., Valiev A.* Study of Ptero-G0 UAV Noise with Level Flight Conditions // 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (20-23 May 2019; Delft, The Netherlands). AIAA 2019-2514. DOI: 10.2514/6.2019-2514
26. *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. № 70. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=44459>
27. *Pinel Lamotte L., Baron V., Bouley S.* UAV detection from acoustic signature: requirements and state of the art // QUIET DRONES: International e-Symposium on UAV/UAS Noise (19-21 October 2020; FNTP, Paris, France), 13 p.
28. EDIDP-CUAS-2020 (European Defence Industrial Development Programme), <https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/topicdetails/edidp-cuas-2020>
29. *Wieland M., Liebsch R., Vyshnevskyy M.* Noise requirements of Unmanned Aircraft due to European Regulation 2019/945 // QUIET DRONES: International e-Symposium on UAV/UAS Noise (19-21 October 2020; FNTP, Paris, France), 8 p.
30. Commission delegated regulation (EU) 2019/945 of 12 March 2019 on unmanned aircraft systems and on third-country operators of unmanned aircraft systems (OJ L 152, p.1); amended by Commission delegated regulation (EU) 2020/1058 of 27 April 2020.
31. Commission implementing regulation (EU) 2019/947 of 24 May 2019 on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft (OJ L 152, p.45); amended by Commission implementing regulation (EU) 2020/639 of 12 May 2020 and Commission implementing regulation (EU) 2020/746 of 4 June 2020.
32. ГОСТ Р ИСО 3744-2013 Акустика. Определение уровней звуковой мощности и звуковой энергии источников шума по звуковому давлению. Технический метод в существенно свободном звуковом поле над звукоотражающей плоскостью. — М.: Стандартинформ, 2014. — 109 с.
33. *Мошков П.А.* Прогнозирование и снижение шума на местности легких винтовых самолетов: Дис. канд. техн. наук. — М.: МАИ, 2015. — 143 с.
34. *Мошков П.А., Самохин В.Ф., Яковлев А.А.* Выбор критерия слышимости беспилотных летательных аппаратов с винтомоторной силовой установкой // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2018. № 2. С. 3–9.
35. *Кажан В.Г., Мошков П.А., Самохин В.Ф.* Природный фон при проведении акустических испытаний самолетов на аэродроме базирования малой авиации // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 7. С. 146-170. DOI: 10.7463/0715.0782827
36. *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.
37. *Мошков П.А., Самохин В.Ф.* Исследование влияния зазора между толкающим воздушным винтом и крылом на уровень шума легкого самолета на местности // Ученые записки ЦАГИ. 2016. Т. 47. № 6. С. 55–60.
38. *Мошков П.А., Самохин В.Ф.* Интегральная модель шума силовой установки легкого винтового самолета // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т.23. № 4. С. 36–44.
39. *Дмитриев В.Г., Самохин В.Ф., Маслова Н.П.* Влияние компоновки силовой установки на уровни шума на местности дозвукового самолета // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2019. № 8. С. 3–21.
40. *Ostrikov N.N., Denisov S.L.* Mean flow effect on shielding of noncompact aviation noise sources // 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (30 May — 1 June 2016; Lyon, France). AIAA 2016-3014. DOI: 10.2514/6.2016-3014
41. *Мошков П.А.* Исследование вихревого шума вращающихся лопастей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2020. № 2(89). С. 85–98. DOI: 10.18698/1812-3368-2020-2-85-98
42. *Власов Е.В., Самохин В.Ф.* Исследование аэродинамического шума планеров // Акустический журнал. 1977. Т. 23. № 4. С. 550–556.
43. *Molin N.* Airframe noise modeling and prediction // CEAS Aeronautical Journal. 2019. Vol. 10. No. 1. pp. 11-29. DOI: 10.1007/s13272-019-00375-4
44. *Афанасьев В.А., Дегтярев Г.Л., Мещанов А.С.* Формирование программных пространственных траекторий полета беспилотных летательных аппаратов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2017. № 3. С. 29–37.

CALCULATED ESTIMATION TECHNIQUE FOR AUDIBILITY BOUNDARIES OF PROPELLER UNMANNED AERIAL VEHICLES

Moshkov P.A.^{1*}, Samokhin V.F.^{2**}

¹ IRKUT Corporation Regional Aircraft,

26, bld. 5, Leninskaya Sloboda, Moscow, 115280, Russia

² Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky (TsAGI),

1, Zhukovsky str., Zhukovsky, Moscow Region, 140180, Russia

* e-mail: moshkov89@bk.ru, p_moshkov@ssj.irkut.com

** e-mail: samokhin_vf@mail.ru

Abstract

The problem of community noise of propeller-driven unmanned aerial vehicles (UAVs) should be considered separately for civil and special-purpose vehicles.

Currently, there are no international standards regulating maximum permissible community noise levels of civil propeller-driven unmanned aerial vehicles (UAV), and low-noise levels are primarily a competitive advantage. The UAVs noise levels normalizing by the analogy with light propeller aircraft is possible in the future.

For the special-purpose propeller UAVs, the problem of acoustic signature is important. It is necessary to ensure the domestic aircraft invisibility when flying along a given trajectory, and to be able to acoustically localize the enemy's UAVs identifying herewith the UAV type and determining the trajectory of its movement in real time.

In the framework of the propeller UAVs acoustic visibility estimation and while developing standards on the community noise the article suggests employing two units of measure, namely the A-weighted overall sound power level and the overall sound pressure level in dBA. The A-weighted overall total sound power level does not depend on the distance and cannot characterize the acoustic signature, which depends on the distance of the object from the radiation detection point and environmental conditions. At the same time, one may proceed from the spectrum of the acoustic power of the sound source, knowing its direction diagram or assuming it spherical, to the UAV noise level evaluation in the far acoustic field at the given atmospheric conditions and distance. Besides, the total level of acoustic power in dBA can be implemented for the comparative assessment of the degree of acoustic signature of various UAVs of the same class.

A technique for assessing the acoustic signature boundaries of the UAV is proposed. The following items became components of the technique: the noise models of the main sources or experimental data on

the UAVs noise, data on the ambient noise, criteria for acoustic signature of various types of UAVs, as well as the software for assessing the aircraft community noise.

Keywords: unmanned aerial vehicle, community noise, audibility, acoustic signature.

References

1. Evdokimov I.E., Filippov G.S., Yakovlev A.A. *Nauchno-tehnicheskii vestnik Povolzh'ya*, 2012, no. 6, pp. 223–227.
2. Nikolaenko V.S., Filippov G.S., Jashenko B.Yu. The problem of reducing the thermal signature of an aircraft engine. *Aerospace MAI Journal*, 2014, vol. 21, no. 4, pp. 109–114.
3. Zaitsev A.V., Amozov E.V., Mitrofanov D.G. et al. *Patent RU 136192 U1*, 27.12.2013.
4. Razin'kov S.N., Baranov S.O., Razin'kova O.E. *Radiotekhnika*, 2020, vol. 84, no. 5(10), pp. 43–52. DOI: 10.18127/j00338486-202005(10)-05
5. Saprionov D.I., Kamenskii I.V. *Elektrosvyaz'*, 2019, no. 8, pp. 34–42.
6. Moshkov P.A., Ostrikov N.N., Samokhin V.F. *Materialy III Vserossiiskoi akusticheskoi konferentsii (21–25 September 2020; Saint Petersburg) "Trudy Vserossiiskoi akusticheskoi konferentsii"*, St. Petersburg, Polytech-Press, 2020, pp. 582–588.
7. Rudenko O.V., Gusev V.A. *Akusticheskii zhurnal*, 2020, vol. 66, no. 6, pp. 599–609. DOI: 10.31857/S032079192006009X
8. Kartashov V.M., Oleynikov V.N., Sheyko S.A., Babkin S.I., Korytsev I.V., Zubkov O.V. Peculiarities of small unmanned aerial vehicles detection and recognition. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2019, vol. 78, no. 9, pp. 771–781. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i9.30
9. Afanas'eva E.M., Pon'kin V.A., Semenyakin A.Yu. *Patent RU 2327099 CI*, 20.06.2008.
10. Kartashov V.M., Oleinikov V.N., Sheiko S.A. et al. *Radiotekhnika*, 2018, no. 195, pp. 235–243.
11. Guo J., Ahmad I., Chang K. Classification, positioning, and tracking of drones by HMM using acoustic circular microphone array beamforming. *EURASIP Journal on*

- Wireless Communications and Networking*, 2020, no. 9, 19 p. DOI: 10.1186/s13638-019-1632-9
12. Yamada T., Itoyama K., Nishida K., Nakadai K. 3D Sound Source Tracking for Drones Using Direction Likelihood Integration. *QUIET DRONES: International e-Symposium on UAV/UAS Noise (19-21 October 2020; FNTP, Paris, France)*, 7 p.
 13. Insausti X., Hogstad B.O., Pätzold M. Modelling and Simulation of Ego-Noise of Unmanned Aerial Vehicles. *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference - VTC2020-Spring (25-28 May 2020; Antwerp, Belgium, Belgium)*. DOI: 10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9128572
 14. Qayyum, A., Hassan, K., Anika A. et al. DOANet: a deep dilated convolutional neural network approach for search and rescue with drone-embedded sound source localization. *Eurasip Journal on audio, speech and music processing*, 2020, no. 16. DOI: 10.1186/s13636-020-00184-2
 15. Cabrera-Poncè A.A., Martinez-Carranzà J., Rascon C. Detection of nearby UAVs using a multi-microphone array on board a UAV. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 2020, vol.12. DOI: 10.1177/1756829320925748
 16. Furukawa K., Okutani K., Nagira K., Otsuka T., Itoyama K., Nakadai K., Okuno H.G. Noise correlation matrix estimation for improving sound source localization by multirotor UAV. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. (3-7 November 2013; Tokyo, Japan)*, pp. 3943–3948. DOI: 10.1109/IROS.2013.6696920
 17. Blanchard T., Thomas J.H. UAV's localization from a microphone array by exploiting the harmonic structure of the sound produced. *QUIET DRONES: International e-Symposium on UAV/UAS Noise (19-21 October 2020; FNTP, Paris, France)*, 10 p.
 18. Go Y., Choi J.S. Signal-to-Noise Ratio Enhancement Method for Improving Sound Source Detection of Drone-mounted Phased Microphone Array. *QUIET DRONES: International e-Symposium on UAV/UAS Noise (19-21 October 2020; FNTP, Paris, France)*, 8 p.
 19. Borzov A.B., Likhoedenko K.P., Pavlov G.L. et al. *Patent RU 2513719 C1*, 20.04.2014.
 20. Blass M., Graf F. A Real-Time System for Joint Acoustic Detection and Localization of UAVs. *QUIET DRONES: International e-Symposium on UAV/UAS Noise (19-21 October 2020; FNTP, Paris, France)*, 18 p.
 21. Moshkov P.A., Samokhin V.F. Experimental determination of piston engine share in the light propeller aircraft power plant total noise. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 2, pp. 50–61.
 22. Moshkov P.A., Samokhin V.F. Noise and acoustic signature reduction methods for unmanned aerial vehicles with engine-propeller power plant. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 1, pp. 38–48.
 23. Moshkov P.A., Samokhin V.F. Problems of light propeller-driven airplane design with regard to community noise requirements. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 1, pp. 19–34. DOI: 10.34759/vst-2021-1-19-34
 24. Belyaev I.V., Valiev A.V., Moshkov P.A., Ostrikov N.N. Studying the PTERO-G0 unmanned flying vehicles acoustic characteristics in AK-2 anechoic chamber. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 4, pp. 52–62.
 25. Moshkov P., Ostrikov N., Samokhin V., Valiev A. Study of Ptero-G0 UAV Noise with Level Flight Conditions. *25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (20-23 May 2019; Delft, The Netherlands)*. AIAA 2019-2514. DOI: 10.2514/6.2019-2514
 26. Samokhin V.F., Ostroukhov S.P., Moshkov P.A. *Trudy MAI*, 2013, no. 70. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=44459>
 27. Pinel Lamotte L., Baron V., Bouley S. UAV detection from acoustic signature: requirements and state of the art. *QUIET DRONES: International e-Symposium on UAV/UAS Noise (19-21 October 2020; FNTP, Paris, France)*, 13 p.
 28. *EDIDP-CUAS-2020 (European Defence Industrial Development Programme)*, <https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/topicdetails/edidp-cuas-2020>
 29. Wieland M., Liebsch R., Vyshnevskyy M. Noise requirements of Unmanned Aircraft due to European Regulation 2019/945. *QUIET DRONES: International e-Symposium on UAV/UAS Noise (19-21 October 2020; FNTP, Paris, France)*, 8 p.
 30. *Commission delegated regulation (EU) 2019/945* of 12 March 2019 on unmanned aircraft systems and on third-country operators of unmanned aircraft systems (OJ L 152, p.1); amended by Commission delegated regulation (EU) 2020/1058 of 27 April 2020.
 31. *Commission implementing regulation (EU) 2019/947* of 24 May 2019 on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft (OJ L 152, p.45); amended by Commission implementing regulation (EU) 2020/639 of 12 May 2020 and Commission implementing regulation (EU) 2020/746 of 4 June 2020.
 32. *Akustika. Opredelenie urovnei zvukovoi moshchnosti i zvukovoi energii istochnikov shuma po zvukovomu davleniyu. Tekhnicheskii metod v sushchestvenno svobodnom zvukovom pole nad zvukootrazhayushchei ploskost'yu. GOST R ISO 3744-2013* (Acoustics. Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure. Engineering method for an essentially free field over a reflecting plane, State Standard R ISO 3744-2013), Moscow, Standartinform, 2014, 109 p.
 33. Moshkov P.A. *Prognozirovaniye i snizheniye shuma na mestnosti legkikh vintovykh samoletov* (Prediction and reduction of light propeller aircraft community noise), Doctor's thesis, Moscow, MAI, 2015, 143 p.
 34. Moshkov P.A., Samokhin V.F., Yakovlev A.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatcionnaya tekhnika*, 2018, no. 2, pp. 3–9.

35. Kazhan V.G., Moshkov P.A., Samokhin V.F. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana*, 2015, no. 7, pp. 146-170. DOI: 10.7463/0715.0782827
36. Dmitriev V.G., Samokhin V.F. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2014, vol. 45, no. 2, pp. 137–157.
37. Moshkov P.A., Samokhin V.F. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2016, vol. 47, no. 6, pp. 55–60.
38. Moshkov P.A., Samokhin V.F. Propeller-driven light aircraft power plant noise Integral model. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 36-44.
39. Dmitriev V.G., Samokhin V.F., Maslova N.P. *Polet. Obshcherossiiskii nauchno-tehnicheskii zhurnal*, 2019, no. 8, pp. 3–21.
40. Ostrikov N.N., Denisov S.L. Mean flow effect on shielding of noncompact aviation noise sources. *22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (30 May - 1 June 2016; Lyon, France)*. AIAA 2016-3014. DOI: 10.2514/6.2016-3014
41. Moshkov P.A. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Estestvennye nauki*, 2020, no. 2(89), pp. 85–98. DOI: 10.18698/1812-3368-2020-2-85-98
42. Vlasov E.V., Samokhin V.F. *Akusticheskii zhurnal*, 1977, vol. 23, no. 4, pp. 550–556.
43. Molin N. Airframe noise modeling and prediction. *CEAS Aeronautical Journal*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 11-29. DOI: 10.1007/s13272-019-00375-4
44. Afanas'ev V.A., Degtyarev G.L., Meshchanov A.S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*, 2017, no. 3, pp. 29–37.