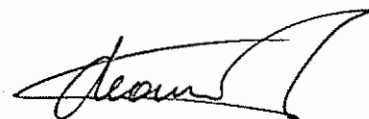


На правах рукописи



**Мошков Петр Александрович**

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И СНИЖЕНИЕ ШУМА НА МЕСТНОСТИ ЛЕГКИХ  
ВИНТОВЫХ САМОЛЕТОВ**

05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели  
и энергоустановки летательных аппаратов»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: доктор технических наук, старший научный сотрудник  
**Самохин Валерий Федорович**

Официальные оппоненты: **Кусюмов Александр Николаевич**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский  
технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ»,  
(КНИТУ-КАИ), профессор кафедры Аэрогидродинамики  
**Бакланов Вячеслав Сергеевич**,  
кандидат технических наук,  
ПАО «Туполев», главный специалист по виброакустике

Ведущая организация: ОАО «Экспериментальный машиностроительный завод им.  
В.М. Мясищева»

Защита состоится «14» декабря 2015 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»:  
[http://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=61574/](http://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=61574/)

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.08  
доктор технических наук, профессор



Ю.В. Зуев

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

Проблема прогнозирования и снижения шума на местности легких винтовых самолетов (ЛВС) возникла в связи с установлением национальных и международных стандартов на предельно-допустимые уровни шума таких самолетов на местности и вследствие широкого использования малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (ЛА) с винтомоторной силовой установкой для решения задач специального назначения.

В настоящее время роль беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в действиях военной авиации значительно расширяется. Наибольшее распространение БПЛА получили при решении задач военной разведки. Высокая эффективность таких аппаратов ставит вопрос об использовании беспилотных ЛА и в других областях применения военной авиации, в частности, ведения воздушного боя и проведении ударных операций.

Вместе с тем эффективность современного БПЛА с различными видами двигателей, выполняющего полеты в широком диапазоне скоростей и высот, в значительной мере зависит от степени его заметности: акустической, оптической, радиолокационной и тепловой. Комплекс методов, направленных на уменьшение заметности летательных аппаратов в различных областях спектра излучения, образует технологию «Стелс», которая постоянно развивается на протяжении уже нескольких десятилетий. Сегодня применение технологии «стелс» предусматривается во всех американских и европейских программах создания новых военных самолетов.

Другой аспект актуальности проблемы шума ЛВС заключается в необходимости снижения интенсивности шума авиационного происхождения, воздействующего на гражданское население. Уровень шума самолета на местности является одним из наиболее важных параметров, во многом определяющим конкурентоспособность современной гражданской авиационной техники. Наличие в российских, американских и европейских Авиационных правилах (АП-36, FAR 36, CS 36) нормативных ограничений на предельно-допустимые уровни шума самолетов легкой весовой категории на местности делает выполнение этих требований обязательным условием для получения Сертификата типа на самолет. В России предельно-допустимые уровни шума легких винтовых самолетов на местности регламентируются Авиационными Правилами РФ (Часть АП-36) и стандартом ИКАО (Приложение 16, Том 1).

### **Степень разработанности темы исследования**

Решение проблем снижения уровней шума на местности легких самолетов с винтомоторной силовой установкой и уменьшения степени акустической заметности БПЛА с винтовым двигателем предполагает наличие соответствующих методов прогнозирования

акустических характеристик ЛВС, критериев и методов оценки степени аудио заметности БПЛА.

В проблеме прогнозирования шума, генерируемого винтомоторными СУ, вопросам отдельно шума воздушного винта и двигателя внутреннего сгорания (ДВС) посвящено значительное количество исследований, выполненных в нашей стране и за рубежом, но, несмотря на давнюю историю изучения этих явлений, многие аспекты механизмов генерации шума являются неясными до сих пор. В настоящее время в литературе практически нет сведений об акустических характеристиках авиационных поршневых СУ в целом. Существует множество работ по акустике поршневых двигателей наземного применения и по акустике модельных и натурных изолированных винтов.

Широкое распространение в последние годы малоразмерных БПЛА привело к дальнейшему развитию аэродинамических компоновок СУ и, как следствие, к появлению дополнительных механизмов генерации шума, в частности, это винтокольцевые движители в толкающей компоновке, работающие в турбулентном следе от элементов планера.

В современной научной литературе, посвященной исследованиям шума ЛВС на местности, в качестве источника шума обычно рассматривается изолированный воздушный винт, работающий в невозмущенной среде. При этом не реализуется комплексный подход к шуму силовой установки самолета в целом как к суперпозиции акустических полей, формируемых излучениями воздушного винта и поршневого двигателя.

Проблема акустической заметности БПЛА и, как следствие, выбора критериев заметности и разработка метода прогнозирования координат границ зоны аудио заметности БПЛА при различных условиях эксплуатации является достаточно новой для отечественной авиационной науки.

Известно, что на проблему заметности ЛА, в том числе и акустической заметности, за рубежом стали обращать серьезное внимание еще в 70-х и 80-х годах прошлого века и позднее в связи с разработкой в авиации технологии «Стелс». В виду взаимосвязи проблемы аудио заметности с ЛА специального назначения результаты исследований по данному направлению практически не публикуются. Исследования в области аудио заметности БПЛА начали проводиться в ЦАГИ с 2003 года и в МАИ в рамках данной диссертационной работы с 2012 года.

**Объектом исследования** являются:

- энергетические, пространственные и спектральные характеристики акустических полей винтомоторных силовых установок ЛВС и БПЛА в полетных и в статических условиях. Воздушные винты рассматриваемых ЛА работают на режиме автотельности ( $Re > 10^6$ ), взлетная масса исследуемых ЛА составляет от 130 до 5500 кг;

- спектральные и интегральные характеристики природного акустического фона для заданной природно-климатической зоны;
- критерий аудио заметности ЛА с винтомоторной силовой установкой на режиме крейсерского полета.

### **Цели и задачи работы**

*Целями работы* являются: разработка методов прогнозирования и снижения шума на местности легких винтовых самолетов и метода прогнозирования координат границ зоны аудио заметности беспилотных летательных аппаратов с винтовыми двигателями.

*Основными задачами работы* являются:

- Экспериментальное исследование источников шума ЛВС: исследование энергетических, пространственных и спектральных характеристик суммарного акустического излучения винтомоторной силовой установки ЛВС и отдельных его составляющих; установление соотношения между мощностью акустического излучения поршневого двигателя ЛВС и суммарной мощностью акустического излучения силовой установки.
- Изучение влияния турбулентных следов за элементами конструкции планера самолета на интенсивность и спектральный состав акустического излучения винта в толкающей компоновке.
- Экспериментальное исследование природного акустического фона. Формирование базы данных о спектральных и интегральных характеристиках природного акустического фона в приземном слое атмосферы для заданной природно-климатической зоны.
- Экспериментальное исследование по определению критерия аудио заметности ЛА с винтомоторной силовой установкой.
- Разработка метода прогнозирования границ области неслышимости БПЛА.
- Разработка методов снижения шума и заметности ЛВС и БПЛА.

### **Научная новизна**

Научная новизна состоит в реализации комплексного подхода к исследованию шума ЛВС на местности. На основании выполненных экспериментальных исследований определены основные закономерности генерации шума и роль различных источников излучения в суммарном шуме винтомоторных СУ. Получены обобщенные акустические характеристики СУ ЛВС и БПЛА. Показано влияние числа Рейнольдса на интенсивность широкополосного (вихревого) шума воздушного винта. Установлены методы снижения шума на местности ЛВС и БПЛА. Установлены энергетические и спектральные характеристики природного фона и их зависимость от параметров приземного пограничного слоя. Экспериментально установлен критерий акустической заметности ЛА (в единицах дБА). Разработана методика расчета границ акустической заметности ЛА с винтовыми двигателями.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

В диссертации акустическое поле самолета рассматривается как суперпозиция акустических полей, формируемых излучениями воздушного винта и поршневого двигателя. Установлена важная роль излучения от поршневого двигателя в общем шуме ЛВС с винтомоторной силовой установкой. На основании этого скорректирована традиционная структура методики прогнозирования уровней шума ЛВС на местности. Разработаны методы снижения шума ЛВС с винтомоторной силовой установкой.

Экспериментально установлена зависимость интенсивности акустического излучения вихревого шума дозвукового воздушного винта от числа Рейнольдса. На основании этого уточнена полуэмпирическая модель шума дозвукового винта в части зависимости мощности широкополосной составляющей шума воздушного винта от числа Маха потока в концевом сечении лопасти, которая является составной частью метода прогнозирования границ области слышимости летательного аппарата с винтомоторной СУ.

Экспериментально установлена для природного акустического фона в приземном слое атмосферы зависимость суммарного уровня звукового давления от характера подстилающей поверхности и от скорости ветра.

Экспериментально установлена связь между аудио заметностью ЛА с винтовыми движителями и величиной взвешенного по шкале «А» стандартного шумомера суммарного по спектру уровня звукового давления. Это позволило принять в качестве критерия аудио заметности ЛА с винтомоторной силовой установкой заданное соотношение между суммарными уровнями звукового давления в единицах дБА, соответствующими природному акустическому фону в приземном слое атмосферы и излучению от ЛА.

Предложен метод расчета координат границ области аудио заметности ЛА с винтовыми движителями.

Результаты работы позволяют создавать легкие ЛА с винтомоторной силовой установкой с требуемым уровнем акустических характеристик.

Установленные в результате экспериментальных исследований методы снижения шума ЛВС на местности нашли применение в Отраслевом специальном конструкторском бюро экспериментального самолетостроения (ОСКБЭС) МАИ при разработке современных малолетных легкомоторных самолетов.

### **Методология и методы исследования**

Измерения уровней шума ЛВС в статических и в полетных условиях выполнялись в соответствии с методиками проведения акустических испытаний авиационной техники, изложенными в Техническом руководстве ИКАО по окружающей среде, регламентирующем использование методик при сертификации воздушных судов по шуму. Все измерения и

регистрация акустических данных проводилась с использованием аттестованной электроакустической аппаратуры, использующей аналоговые и цифровые методы.

Спектральный анализ результатов измерений выполнялся в третьоктавных полосах частот в диапазоне центральных частот 10-20000 Гц и узкополосных с шириной полосы 1,56 Гц в диапазоне частот 0,1-10000 Гц.

**Достоверность результатов** диссертационной работы подтверждается тем, что полученные в результате исследования данные не противоречат опубликованным работам других авторов. В процессе расчетных исследований применялись верифицированные программные комплексы. Экспериментальные исследования проводились по стандартизированным методикам с помощью аттестованной электроакустической аппаратуры.

#### **Апробация работы и публикации**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях:

- Третья открытая всероссийская конференция по аэроакустике, г. Звенигород, 1-3 октября 2013 года,
- 12-я Международная конференция «Авиация и космонавтика - 2013», г. Москва, 12-15 ноября 2013 года,
- XXV Научно-техническая конференция по аэродинамике, п. Володарского, 27-28 февраля 2014 года,
- Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике - 2014», г. Москва, 22-24 апреля 2014 года,
- X Международная научная конференция по гидроавиации «Гидроавиасалон-2014», г. Геленджик, 5-6 сентября 2014 года,
- XXVI Научно-техническая конференция по аэродинамике, п. Володарского, 26-27 февраля 2015 года.
- Четвертая открытая всероссийская конференция по аэроакустике, г. Звенигород, 29 сентября - 1 октября 2015 года,

По результатам выполненных исследований опубликовано 9 научных статей в журналах, включенных в перечень ВАК.

#### **На защиту выносятся**

- Основные результаты акустических испытаний винтомоторных СУ. Пространственные, спектральные и энергетические характеристики акустического поля винтомоторных СУ. Роль различных источников в суммарном шуме.
- Результаты исследования автомодельности механизмов генерации широкополосного (вихревого) шума воздушного винта.

- Методы снижения шума ЛВС на местности: капотирование двигателя, компоновка винта на самолете.
- Результаты исследования в области аудио заметности ЛА: энергетические и спектральные характеристики природного фона и структура критерия аудио заметности ЛА.

### **Личный вклад автора**

Автор принимал непосредственное участие в выполнении экспериментальных исследований акустических характеристик винтомоторных СУ ЛВС и БПЛА, а также при разработке методики сбора и формирования базы данных о спектральных и интегральных характеристиках природного акустического фона в приземном слое атмосферы. Им обработаны, проанализированы и обобщены данные экспериментов.

Экспериментально установлен критерий оценки аудио заметности БПЛА с винтомоторной силовой установкой.

Разработаны: метод прогнозирования ожидаемых уровней шума ЛВС на местности, учитывающий все основные источники шума винтомоторной силовой установки; метод оценки координат на местности границ области аудио заметности БПЛА с винтомоторной силовой установкой и методы снижения шума ЛВС на местности.

### **Структура и объем работы**

Диссертация изложена на 143 листах и включает в себя 95 рисунков, 23 таблицы. Работа состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы из 120 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы. Поставлены цели и задачи диссертационного исследования. Показана теоретическая и практическая значимость работы. Представлены основные положения диссертации, выносимые на защиту, а также показан личный вклад автора в работе над диссертацией.

**В разделе 1** представлена классификация источников шума ЛВС на местности, дан краткий обзор механизмов генерации шума воздушным винтом и поршневым двигателем. Предложено соотношение акустического баланса винтомоторной СУ в целом. Проанализированы существующие методы расчета шума воздушного винта и поршневого двигателя. На основании доступных публикаций показано влияние различных параметров на шум винтомоторной СУ.

На сегодняшний день в литературе практически не представлено информации по основным вопросам, связанным с проблемой шума ЛВС и БПЛА на местности. Эти вопросы и определили перечень основных задач настоящей работы, решение которых требует



выполнения экспериментальных исследований акустических характеристик винтомоторных силовых установок, характеристик природного акустического фона и критериев аудио заметности БПЛА.

Конечной целью исследований является построение физических моделей процессов образования и снижения шума и на основании этих данных разработка надежных методик расчета и проектирования малошумной авиационной техники.

В тоже время при проведении модельных испытаний возникает вопрос о возможности переноса результатов на натурные объекты. В частности, для сохранения подобия аэроакустических полей воздушных винтов необходимо обеспечить: геометрическое подобие винтов, подобие распределения аэродинамической нагрузки на поверхности лопасти, а также сохранение неизменными соответствующих критериев подобия - чисел Струхала ( $St$ ), Маха ( $M$ ), Рейнольдса ( $Re$ ) и др.

При соблюдении этих условий моделирования акустические поля модели и натурны будут подобны. Выполнение этой задачи является практически невозможным. В случае, если например, при испытании моделей винтов не обеспечить режим автомодельности ( $Re > 10^6$ ) следует ожидать изменение относительных аэродинамических характеристик винта (коэффициента тяги, КПД) и как следствие - акустических характеристик винта.

Для корректной оценки шума самолета на местности необходимы данные о реальных акустических характеристиках воздушного винта с учетом его аэродинамической интерференции с элементами планера в условиях конкретной компоновки, и данные о шуме от поршневого двигателя. Последнее обстоятельство затрудняет возможности использования результатов акустических испытаний винтов с приводом от винтового прибора в заглушенных камерах или в аэродинамических трубах для корректной оценки шума ЛВС на местности.

Известные публикации по акустическим характеристикам зарубежных натурных ЛВС (Scheibe, Pioneer, Eipper, Icarus, Robin различных серий и др.) как правило, ограничиваются рассмотрением общих данных по шуму самолетов и не содержат в необходимом объеме спектральных и пространственных характеристик акустического поля СУ самолетов, которые необходимы для решения задач настоящей работы.

Поэтому в рамках диссертации было выполнено исследование акустических характеристик следующих натурных легких винтовых самолетов: Як-18Т, Вильга-35А, Ан-2, МАИ-890, МАИ-890У, МАИ-223М, F30 как в полетных, так и в статических условиях. Основная часть этих исследований была выполнена на аэродроме Московского авиационного института (д. Алферьево, Волоколамский р-н, Московской обл.). Были проведены трубные акустические испытания малоразмерного БПЛА с винтокольцевым движителем в толкающей компоновке.

В разделе 2 представлены основные результаты экспериментальных исследований акустических характеристик винтомоторных СУ ЛВС и БПЛА, выполненных в статических условиях.

Спектр излучения винтомоторной СУ (рисунок 1) содержит: гармонические составляющие шума, к которым относятся гармоники шума винта на частотах, кратных частоте следования лопастей ( $f_{1в}, f_{2в}, f_{3в}, f_{4в}, f_{5в}, f_{6в}$ ) и гармоники шума двигателя на частотах, кратных частоте следования вспышек в цилиндрах ( $f_{1ц}, f_{2ц}, f_{3ц}, f_{1д}$ ), и широкополосные составляющие излучения, источниками которых являются воздушный винт (шум задней кромки, шум от неустановившейся нагрузки) и двигатель (вихревая составляющая шума впуска и выхлопа, структурный шум). Частоты дискретных составляющих в шуме поршневого двигателя равны:

- гармоники шума одиночного цилиндра -  $f_{ц} = \frac{kn_{кв}}{30\tau}$ ;
- гармоники шума двигателя (всех цилиндров) –  $f_{д} = k f_{ц} i$ ;

где  $k$  – номер гармоники,  $n_{кв}$  – частота вращения коленвала двигателя (об/мин),  $i$  – число цилиндров в двигателе,  $\tau$ - тактность двигателя.

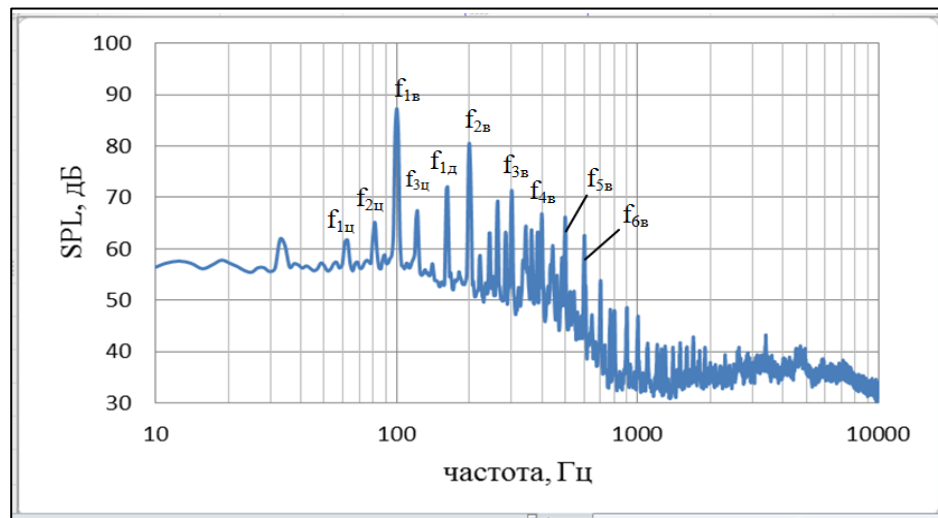


Рисунок 1 – Узкополосный спектр уровней звукового давления в диапазоне частот 10-10000Гц с шириной полосы 1,56 Гц при работе СУ самолета «МАИ-223М» в статических условиях ( $n_{кв}=4860$  об/мин,  $\varphi=105^\circ$ -задняя полусфера, на расстоянии 30 м.)

Установлена зависимость обобщенных акустических характеристик СУ ЛВС от конструктивных особенностей ДВС и особенностей организации рабочего цикла в двигателе, а также от режима работы СУ.

В частности, при испытаниях СУ самолетов «Ан-2», «МАИ-223М» определено, что основная доля энергии (до 75%) акустического излучения СУ легкого винтового самолета при

умеренных величинах числа Маха окружной скорости  $M_{окр} < 0,72$  сосредоточена в области низких частот (16-100 Гц) и важную роль здесь играют гармонические и низкочастотная широкополосная составляющие излучения винта и поршневого двигателя (рисунок 2). При высоких числах Маха окружной скорости  $M_{окр} \approx 0,8$  до ~94% акустической энергии СУ излучается винтом, в основном, на гармониках, кратных частоте следования лопастей воздушного винта.

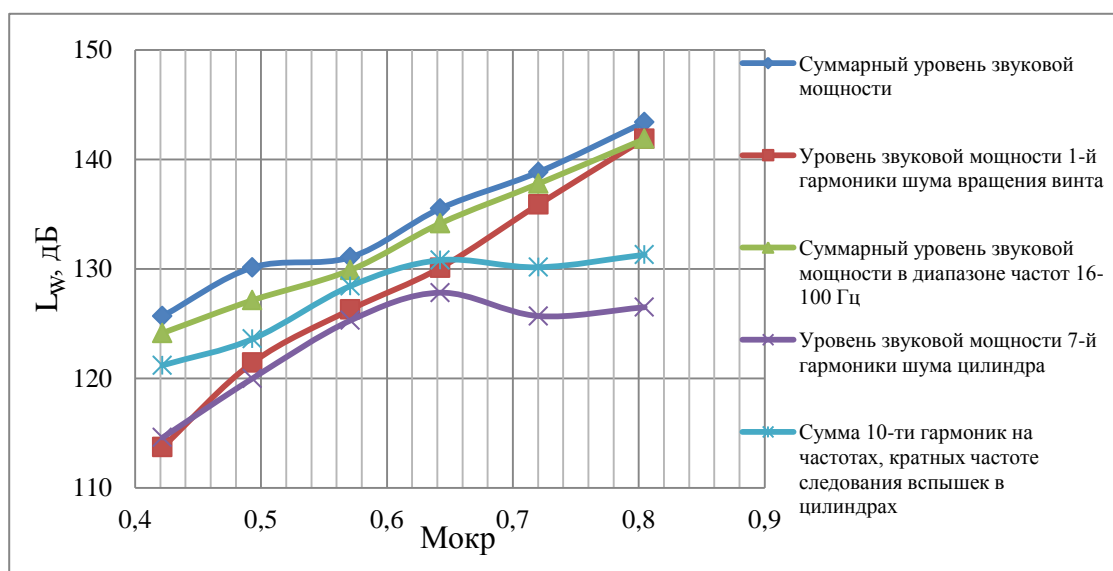


Рисунок 2 – Влияние режима работы СУ самолета «Ан-2» на суммарный уровень звуковой мощности (16-10000 Гц), а также на уровни звуковой мощности отдельных составляющих излучения

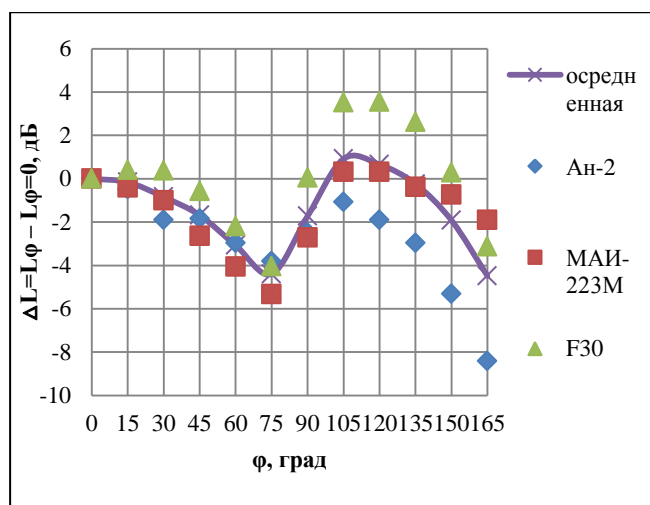
Получено, что акустический КПД СУ ( $\eta$ ) самолета зависит от числа лопастей винтового движителя и от наличия в выхлопном тракте двигателя системы шумоглушения. При отсутствии системы шумоглушения, например, у СУ самолета «Ан-2» с 4-х лопастным винтом на максимальном режиме работы  $\eta \approx 0,055\%$ , что в несколько раз ниже, чем у самолетов с 2-х лопастными винтами ( $\eta \approx 0,123\%$  у СУ самолета «Вильга-35А» и  $\eta \approx 0,15\%$  у СУ самолета «Як-18Т»). При наличии в выхлопном тракте двигателя глушителя шума выхлопа акустический КПД существенно снижается ( $\eta \approx 0,01\%$  у СУ самолета «МАИ-223М» (двигатель заключен в капот) и  $\eta \approx 0,012\%$  у СУ самолета «МАИ-890У» (двигатель без капота)).

У силовых установок с двухтактными поршневыми двигателями воздушного охлаждения при отсутствии системы шумоглушения (малоразмерный БПЛА) величина акустического КПД существенно возрастает и на режиме максимальной мощности СУ составляет ~1,1%. При это суммарный уровень шума СУ БПЛА определяется, в основном, первыми 10-ю гармониками шума двигателя и первыми 5-ю гармониками шума вращения

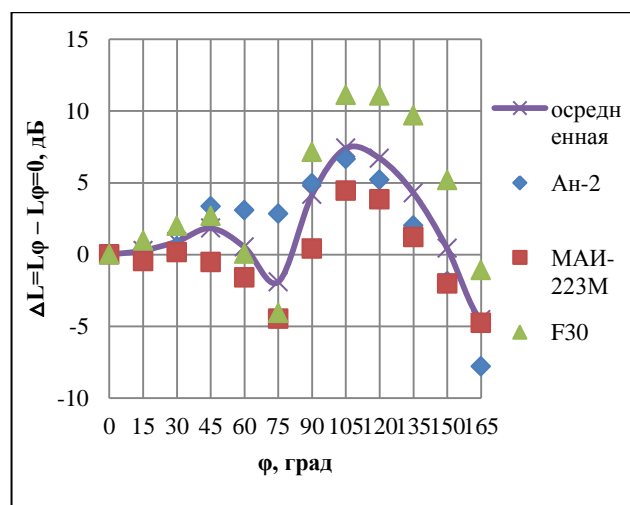
винта. Например, вклад первых пяти гармоник шума вращения винта в суммарную интенсивность акустического излучения СУ БПЛА составляет на режиме малого газа  $\sim 38\%$ , на крейсерском режиме  $\sim 23\%$ , на режиме полного газа только  $\sim 3\%$ , а остальная акустическая энергия излучается двигателем. В шуме силовой установки БПЛА, включающей двухтактный поршневой двигатель воздушного охлаждения и винтокольцевой движитель, при отсутствии в выхлопном тракте двигателя глушителя шума выхлопа, определяющим источником внешнего шума является поршневой двигатель.

Поскольку двухтактные двигатели, по сравнению с четырехтактными, характеризуются более высокими значениями литровой мощности и, соответственно, меньшими габаритами и массами, то двухтактные двигатели являются более предпочтительными для малоразмерных ЛА. Однако в этом случае при разработке современных малоразмерных БПЛА следует учитывать определяющую роль излучения от двухтактного поршневого двигателя в шуме силовой установки и принимать меры по снижению шума ЛА на местности с учетом компоновки СУ на ЛА.

На основании выполненных в диссертации экспериментальных исследований были получены *нормализованные обобщенные характеристики направленности* суммарного излучения винтомоторных СУ и отдельных его составляющих. Результаты обобщены для СУ с толкающими и тянущими воздушными винтами. Максимальные уровни суммарного излучения соответствуют направлению  $0^\circ$  в передней полусфере и  $105^\circ$ - $120^\circ$  в задней полусфере для обоих типов СУ (рисунок 3а). Максимумы характеристики направленности излучения на частоте первой гармоники шума вращения винта наблюдаются в направлении  $45^\circ$ - $60^\circ$  в передней полусфере и  $105^\circ$ - $120^\circ$  в задней полусфере (рисунок 3б).



а)



б)

Рисунок 3 – Нормализованные характеристики направленности суммарного излучения (а) и первой гармоники шума вращения винта (б) для винтомоторных СУ с тянущими винтами

Характеристики направленности суммарного излучения и излучения на частотах, кратных частоте следования лопастей винта являются характерными для источников дипольного типа, оси которых направлены по нормали к поверхности лопасти на относительном радиусе, соответствующем максимуму распределенной вдоль размаха лопасти аэродинамической нагрузки.

Получены обобщенные характеристики направленности акустического излучения авиационных поршневых двигателей, применяемых в малой авиации. Характерные максимумы акустического излучения авиационных поршневых двигателей соответствуют углам азимута  $0^\circ$  - в передней полусфере и  $135-150^\circ$  - в задней полусфере (рисунок 4). Полученные факторы направленности используются в предложенной автором методике расчета шума авиационных ДВС.

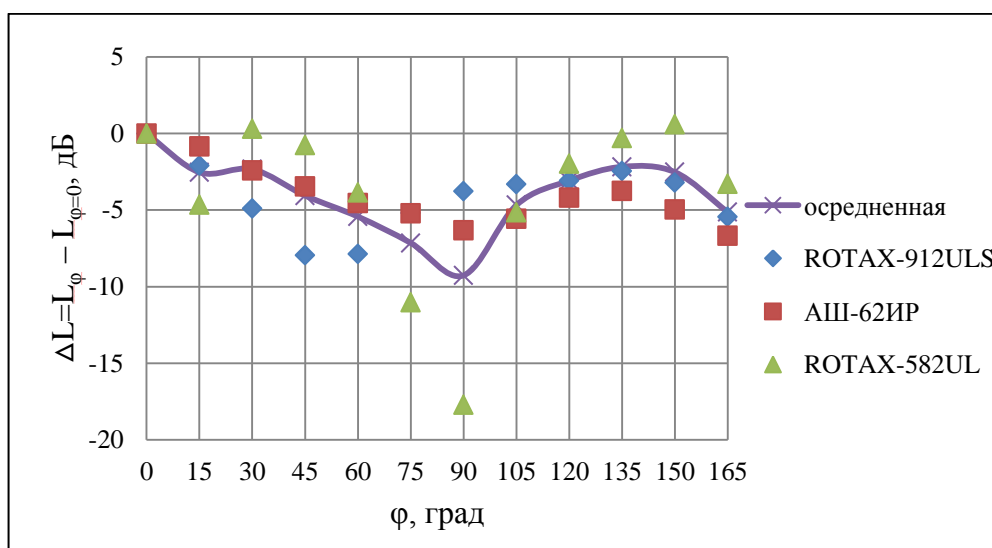


Рисунок 4 - Обобщенные характеристики направленности акустического поля авиационных бензиновых двигателей с внешним смесеобразованием

При исследовании автомодельности процессов генерации широкополосного шума дозвуковым воздушным винтом было установлено, что влияние числа Рейнольдса на интенсивность вихревого (широкополосного) шума воздушного винта проявляется в различии показателей степени зависимости интенсивности излучения от характерной скорости обтекания профиля лопасти при работе винта в различных диапазонах чисел Рейнольдса. В данной работе установлен интервал чисел Рейнольдса  $\lg Re = 6,36 \div 6,5$ , в котором работают малонагруженные винты ЛВС. Экспериментально получена зависимость интенсивности вихревого шума от характерной скорости обтекания профиля лопасти в степени  $\sim 5$ . Эта зависимость не противоречит результатам исследований других авторов и свидетельствует о том, что вихревая

пелена за лопастями винта является доминирующим источником вихревого шума СУ самолетов типа «Ан-2» и «Вильга-35А».

В результате экспериментального исследования влияния капотирования двигателя на акустические характеристики авиационной поршневого СУ получено, что заключение двигателя (ROTAX-912ULS) в капот приводит к существенному снижению (до ~7 дБ) уровня звуковой мощности основного тона двигателя на всех рассматриваемых режимах работы.

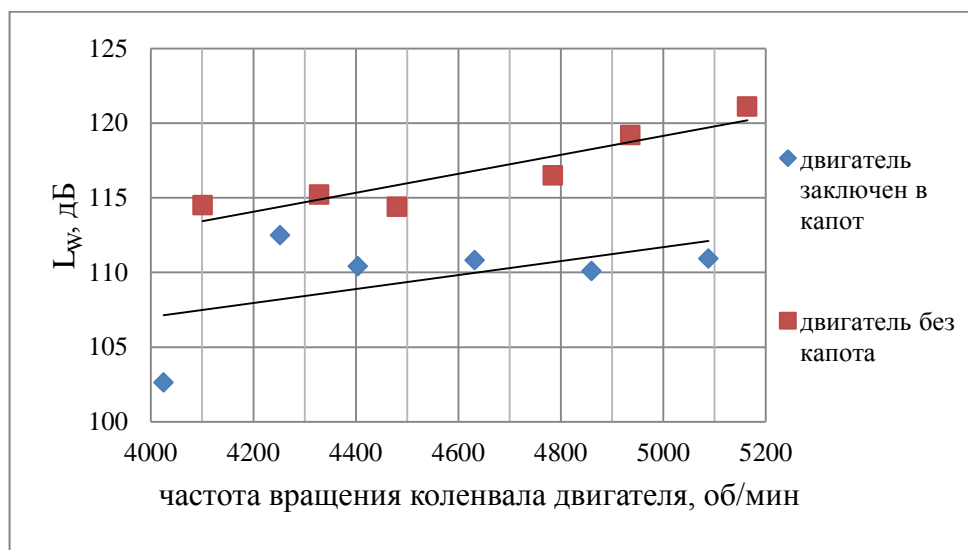


Рисунок 5 – Влияние капотирования двигателя на уровень звуковой мощности основного тона двигателя при различных режимах работы СУ

Выполненная количественная оценка вклада основного тона двигателя в суммарную звуковую мощность СУ сверхлегких самолетов типа «МАИ-223М» (двигатель заключен в капот) и «МАИ-890У» (двигатель без капота) показала существенное снижение роли основного тона в суммарном шуме СУ за счет капотирования.

Капотирование двигателя может быть рассмотрено как один из конструктивных методов снижения шума на местности легкомоторных самолетов.

Экспериментально установлено, что уменьшение диаметра винта может являться одним из средств снижения шума ЛВС на местности. На примере самолетов F-30 и «МАИ-223М» экспериментально показано, что при сохранении неизменными тяги и частоты вращения, снижение шума винта можно получить, если уменьшить скорость потока в концевом сечении лопасти за счет некоторого уменьшения диаметра (на  $\approx 3,3\%$ ) и, соответственно, компенсирующего увеличения шага винта. Снижение суммарного уровня звуковой мощности силовой установки самолета составляет при этом до ~1,5 дБ (рисунок 6) в широком диапазоне частот вращения.

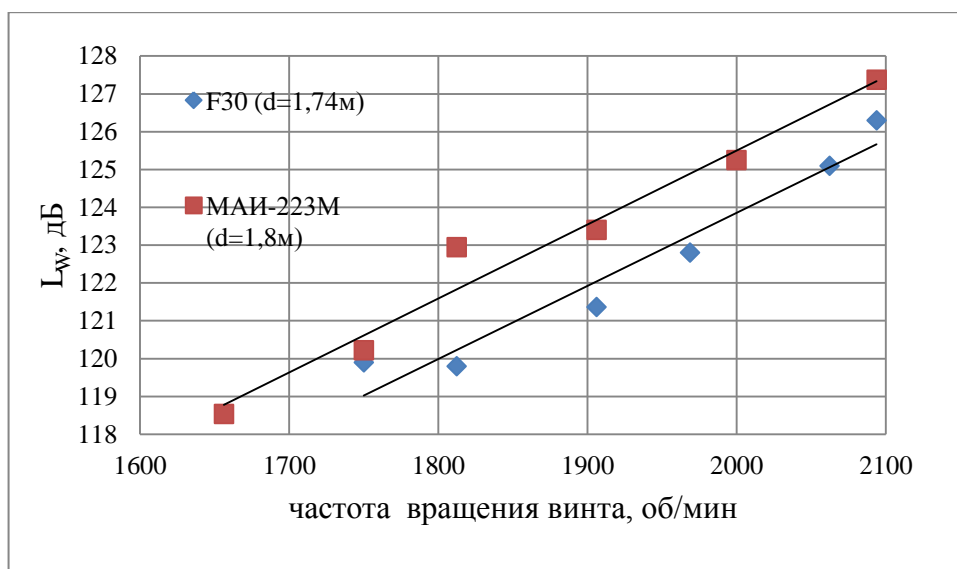


Рисунок 6 – Влияние окружной скорости винтов различного диаметра на суммарный уровень звуковой мощности (16-10000 Гц) при различных режимах работы СУ

Снижение шума СУ обусловлено снижением шума воздушного винта от аэродинамической нагрузки при незначительном снижении шума от «вытеснения».

Таким образом, применение на ЛВС воздушного винта меньшего диаметра по сравнению со штатным можно рассматривать как один из методов снижения шума на местности ЛВС, у которых винт является доминирующим источником шума.

На основании полуэмпирической модели шума винта получено соотношение для определения влияния диаметра винта на уровень звуковой мощности СУ при условии сохранения геометрического и аэродинамического подобия винтов.

*В результате экспериментального исследования влияния зазора между толкающим винтом и крылом на уровень шума ЛВС на местности установлено, что увеличение зазора между плоскостью вращения винта в толкающей компоновке и задней кромкой крыла приводит к снижению уровней гармонических составляющих шума винта. Увеличение рассматриваемого зазора можно использовать как метод снижения шума ЛВС с толкающими воздушными винтами. Полученное снижение суммарного гармонического шума винта на 6,3 дБ при увеличении нормализованного расстояния ( $x/c$ , где  $x$  – расстояние между плоскостью вращения винта и задней кромкой крыла,  $c$  – хорда крыла) между винтом и крылом от  $x/c=0,13$  до  $x/c=0,22$  хорошо согласуется с данными зарубежных работ (рисунок 7).*

Этот эффект следует учитывать при разработке новейших ЛВС и БПЛА с различными винтовыми двигателями в толкающей компоновке.

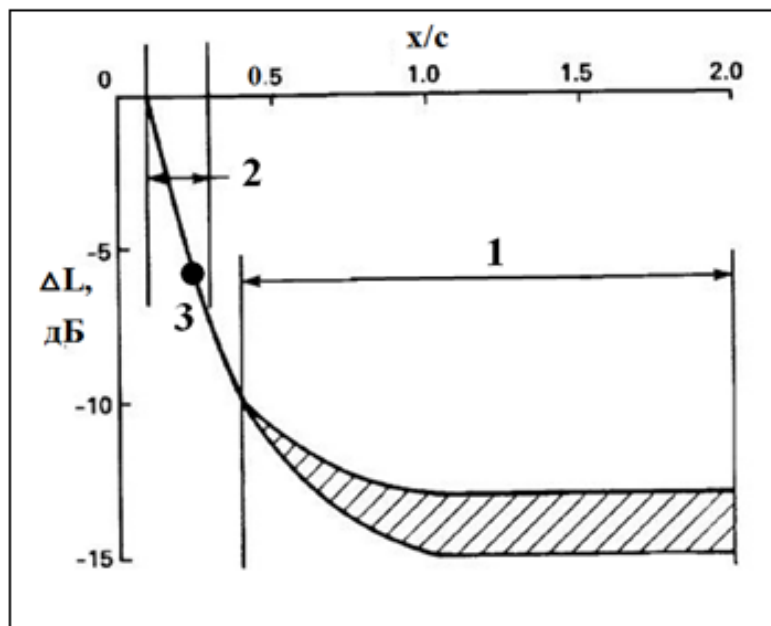


Рисунок 7 - График затухания гармонических составляющих шума винта с увеличением зазора между винтом и крылом: 1,2 – данные работ зарубежных авторов. Точка 3 на графике - результаты данного исследования

**В разделе 3** предложен метод расчета общего акустического поля винтомоторных СУ, как суперпозиции полей поршневого двигателя и воздушного винта. Метод расчета шума винта базируется на полуэмпирической модели шума. Алгоритм реализуется в программном комплексе «АЭРОШУМ» ЦАГИ. При этом исходная модель скорректирована с учетом полученных в диссертации данных о зависимости интенсивности широкополосного (вихревого) шума от скорости потока. А также в алгоритм добавлена корректирующая функция учитывающая влияние осевого зазора между толкающим винтом и расположенными перед ним элементами планера на шум толкающего винта.

Расчет шума двигателя осуществляется по предложенной автором методике оценки шума авиационных поршневых двигателей, характерных для легкомоторной авиации.

В частности, на рисунке 8 показаны рассчитанные и измеренные характеристики направленности суммарного уровня шума поршневого двигателя «ROTAX-912ULS» на частотах, кратных частоте следования вспышек в цилиндрах. Получено хорошее согласование рассчитанных и измеренных уровней шума. Коэффициент детерминации ( $R^2$ ), который является показателем качества предложенной расчетной модели  $R^2 > 0,87$ , что свидетельствует о хорошем качестве предложенной модели при решении задачи прогнозирования шума типовых авиационных двигателей.



Предложенный в работе метод расчета общего акустического поля винтомоторных СУ дает хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных в диапазоне частот, определяющем суммарный уровень шума СУ.

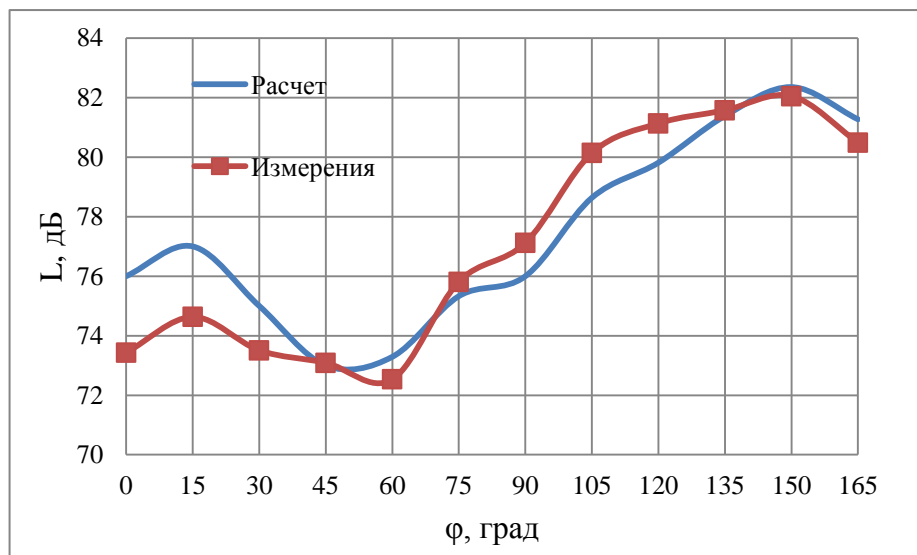


Рисунок 8– Характеристика направленности шума поршневого двигателя ROTAX-912ULS без капота ( $n_{кв}=4101$  об/мин, на расстоянии 30 м)

**Раздел 4** посвящен проблеме акустической заметности ЛА с винтовыми движителями. Проведено исследование субъективной возможности обнаружения ЛА наблюдателем (на слух). В соответствии с поставленными задачами было выполнено экспериментальное исследование интегральных и спектральных характеристик природного фона, исследование критериев аудио заметности, а также разработана и использована на практике методика расчета координат границ неслышимости БПЛА с винтомоторной силовой установкой.

*В результате выполненных измерений спектральных характеристик природного акустического фона в условиях аэродрома базирования малой авиации получены нормализованные графические матрицы третьоктавных спектров уровней звукового давления природного акустического фона в приземном слое (рисунок 9) для локальной природно-климатической зоны. Установлены значения доверительных интервалов для оценок математического ожидания спектральных уровней звукового давления фона для 90%-й надежности для различных значений метеорологических параметров, характеризующих состояние атмосферы.*

Акустическое излучение, соответствующее природному акустическому фону, является широкополосным в диапазоне частот 16-10000 Гц. Форма спектров природного акустического фона – спадание интенсивности спектральных составляющих по частоте - согласуются с

известной моделью распада вихрей в турбулентном приземном слое атмосферы. В спектрах фона можно выделить, по крайней мере, четыре диапазона частот, в которых отмечается характерное изменение уровней спектральных составляющих по частоте. Возможно, что эти диапазоны частот соответствуют различным источникам (или механизмам генерации звука) природного происхождения.

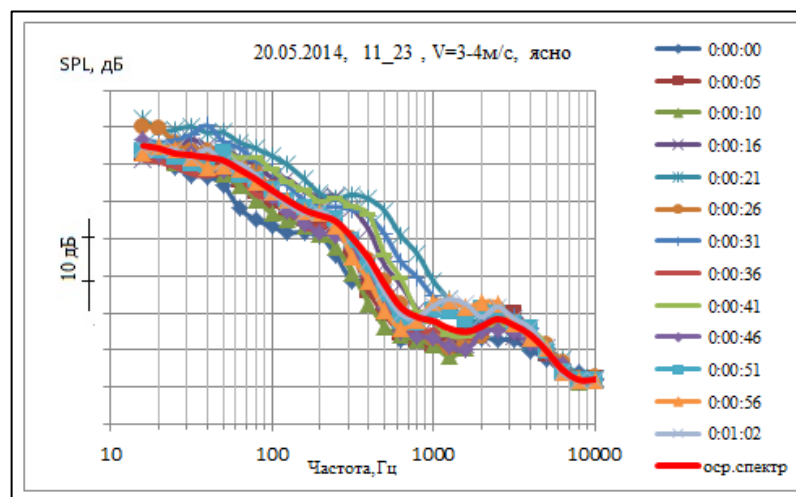


Рисунок 9 - Спектры природного акустического фона при измерениях в течение 1 мин с шагом 5с. 20.05.2014 (W=3-4м/с)

Показано, что даже в условиях равнинной местности спектральные уровни природного акустического фона могут быть весьма нестабильны даже в пределах интервала времени, равном одной минуте, при отсутствии или низкой (до 2 м/с) скорости ветра. И, наоборот, спектральные уровни звукового давления могут слабо изменяться во времени даже при повышенной (до 6 м/с) скорости ветра. Спектральные уровни природного акустического фона зависят от скорости ветра, характера подстилающей поверхности на пути распространения ветра и от интенсивности вертикальных конвективных потоков.

Полученные в работе спектральные и интегральные характеристики природного акустического фона не противоречат результатам исследований других авторов.

Один из аспектов проблемы акустической заметности, заключается в необходимости определения критерия аудио заметности для расчетного определения координат границ зоны заметности ЛА.

*Критерий аудио заметности* – это некий показатель, который является критерием слышимости ЛА. Использование данного критерия в прогностических моделях позволяет оценить предельное расстояние между наблюдателем и источником шума, при уменьшении которого ЛА будет обнаружен наблюдателем.

Критерием акустической заметности ЛА в контрольной точке на местности может служить, например, выполнение условия:

$$\Delta L = L_c - L_p \geq 0, \quad (1)$$

где  $L_p$  – "пороговое" значение уровня помех, с которым сопоставляется уровень полезного сигнала  $L_c$ . Естественным порогом слышимости ЛА является природный акустический фон. В определенных условиях природный фон может выступать в роли маскира полезного сигнала.

В качестве уровня звукового давления в соотношении (1) могут использоваться как спектральные уровни звукового давления сигнала и фона, так и суммарные по спектру уровни звукового давления с линейной или нелинейными амплитудно-частотными характеристиками.

Была выполнена экспериментальная проверка условия (1). На режимах горизонтального полета ЛВС «Ан-2» определялись характерные моменты времени, соответствующие началу ( $t_1$ ) и окончанию ( $t_3$ ) слышимости самолета. Сравнение для данных моментов времени измеренных значений суммарного уровня шума самолета, скорректированного по шкале «А» стандартного шумомера ( $L_a$ ), и среднего значения  $L_a$  для природного фона позволило установить адекватность критерия заметности и субъективной возможности выделения шума из природного фона. Экспериментально получено на основании выполненной серии горизонтальных пролетов, что самолет становится слышимым для наблюдателя уже при величине критерия заметности  $\Delta L_a \approx 2$  дБА.

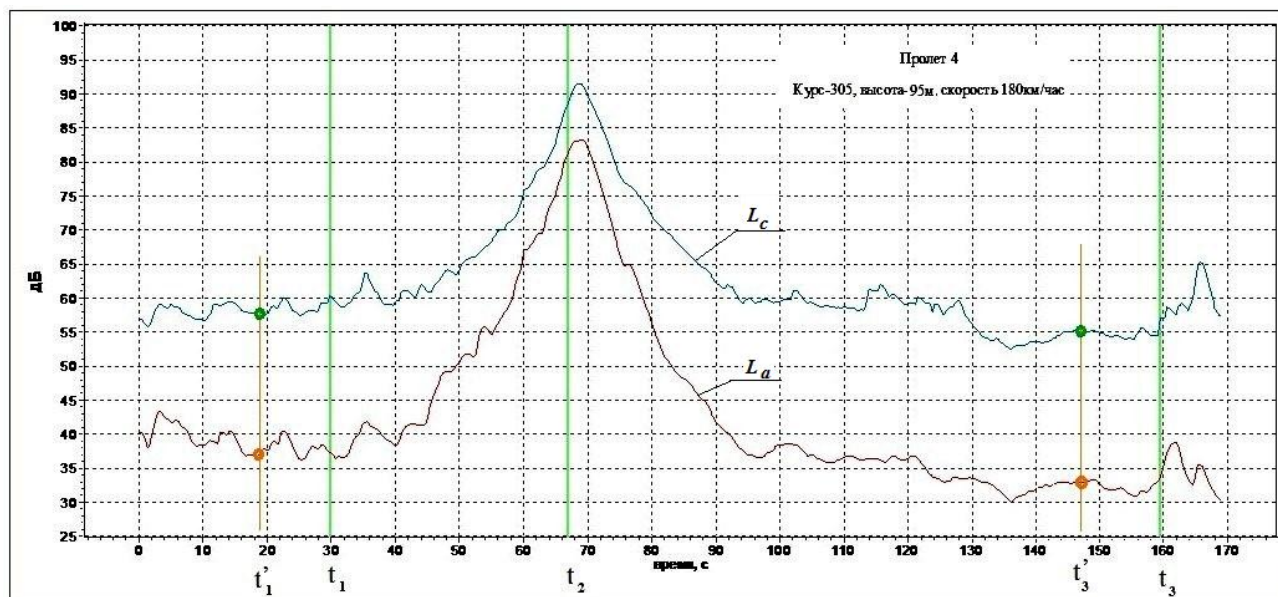


Рисунок 10 – Изменение в процессе пролета самолета суммарных уровней звукового давления с линейной ( $L_c$ ) и нелинейной амплитудно-частотной характеристикой ( $L_a$ )

На основании полученных данных скорректированное выражение (1) имеет вид:

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

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.

*В рамках диссертации была разработана и применена на практике методика расчетной оценки координат границ зоны аудио заметности БПЛА с винтомоторной силовой установкой с величиной взлетной массы  $\approx 1000$  кг. Расчетные исследования выполнялись с использованием программного комплекса «АЭРОШУМ» ЦАГИ. Критерием слышимости ЛА было выполнение условия (2). Результаты исследования переданы Заказчику.*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация посвящена проблеме шума на местности ЛВС и проблеме акустической заметности ЛА с винтовыми двигателями. Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Получены обобщенные акустические характеристики СУ ЛВС. Установлены методы снижения шума ЛВС на местности и даны рекомендации по созданию современных малошумных СУ для ЛВС и БПЛА.
2. Определена роль различных источников в суммарном шуме винтомоторных СУ.
3. Установлено влияние числа Рейнольдса на интенсивность широкополосного (вихревого) шума воздушного винта.
4. Предложена модель для прогнозирования общего акустического поля винтомоторных силовых установок, включающих в себя различные поршневые двигатели и одиночные воздушные винты.
5. Выполнено экспериментальное определение энергетических и спектральных характеристик природного акустического фона для заданной природно-климатической зоны. Установлено влияние скорости ветра, типа подстилающей поверхности и конвективных потоков вблизи поверхности земли на спектр и уровень звукового давления природного фона.
6. В результате летного эксперимента установлен критерий аудио заметности ЛА с винтомоторной силовой установкой, который может использоваться в расчетных моделях для оценки координат границ зоны аудио заметности БПЛА.
7. Разработана и использована на практике методика расчета координат границ зоны аудио заметности БПЛА с винтовым двигателем.

### *Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:*

- Разработка аналитических моделей для расчета шума на местности мини- и микро-БПЛА с винтовыми двигателями. Воздушные винты таких ЛА работают при малых числах

Рейнольдса ( $Re < 10^6$ ), что приводит к существенному изменению аэродинамических и, как следствие, акустических характеристик, по сравнению со случаем работы воздушных винтов на режиме автомодельности ( $Re > 10^6$ ).

- Исследования по формированию банка данных по природному акустическому фону в различных природно-климатических зонах.
- Разработка аналитической модели для оценки спектральных характеристик природного акустического фона.
- Исследования возможности распознавания акустических сигналов от различных ЛА и их идентификация с помощью специальных алгоритмов и программ.
- Расчетно-экспериментальные исследования эффекта экранирования шума от винтомоторной СУ БПЛА.

Автор диссертационной работы выражает благодарность начальнику отделения «Аэроакустики и экологии ЛА» Центрального аэрогидродинамического института имени проф. Н.Е. Жуковского Копьеву Виктору Феликсовичу и сотрудникам отделения, а также сотрудникам Летного комплекса Отраслевого специального конструкторского бюро экспериментального самолетостроения МАИ за помощь в организации и проведении акустических испытаний легких винтовых самолетов. Также автор выражает признательность проректору по научной работе Шевцову Вячеславу Алексеевичу и начальнику авиабазы МАИ Кожевникову Евгению Владимировичу за поддержку проводимых на аэродроме института исследований.

#### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

1. Самохин В.Ф., Мошков П.А. Акустические характеристики легкого винтового самолета с двигателем внутреннего сгорания// Труды МАИ, 2012, выпуск № 57, Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=30715> (дата публикации 30.06.2012).
2. Самохин В.Ф., Остроухов С.П., Мошков П.А. Экспериментальное исследование источников шумности беспилотного летательного аппарата с винто-кольцевым движителем в толкающей компоновке// Труды МАИ, 2013, выпуск № 70, Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=44459> (дата публикации 25.11.2013).
3. Самохин В.Ф., Мошков П.А. Исследование акустических характеристик легкого винтового самолета «Вильга-35А» на режимах горизонтального полета// Вестник Московского авиационного института, 2014, Т.21, №2, С. 55-65.

4. Мошков П.А. Некоторые результаты экспериментального исследования акустических характеристик силовой установки сверхлегкого самолета в статических условиях// Научно-технический вестник Поволжья, 2014, №6, С. 265-270.
5. Мошков П.А., Яковлев А.А. Экспериментальное исследование влияния капотирования двигателя на акустические характеристики авиационной поршневой силовой установки// Научно-технический вестник Поволжья, 2014, №6, С. 271-274.
6. Мошков П.А., Яковлев А.А. К вопросу численного моделирования шума воздушного винта// Научно-технический вестник Поволжья, 2014, №6, С. 275-277.
7. Самохин В.Ф., Мошков П.А. Экспериментальное исследование акустических характеристик силовой установки самолета «Ан-2» в статических условиях// Труды МАИ, 2015, выпуск №82, Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=58711> (дата публикации 26.06.2015).
8. 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. Электрон. журн. 2015. №7. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/782827.html> (дата обращения 25.07.2015).
9. Мошков П.А. Классификация источников шума легких винтовых самолетов на местности// Научно-технический вестник Поволжья, 2015, №4, С. 101-106.
10. Мошков П.А., Остроухов С.П., Самохин В.Ф. Экспериментальные исследования источников шумности малоразмерного ЛА с винто-кольцевым движителем в толкающей компоновке // Третья открытая всероссийская конференция по аэроакустике, г. Звенигород, 1-3 октября 2013 г, Тезисы докладов. – М.: Издательский отдел ЦАГИ, 2013, С. 75.
11. Мошков П.А. Особенности механизмов генерации шума силовых установок с воздушными винтами в толкающей конфигурации// 12-я Международная конференция «Авиация и космонавтика - 2013», г. Москва, 12-15 ноября 2013 г., Тезисы докладов. - СПб.: Мастерская печати, 2013, С. 354-355.
12. Мошков П.А. Исследование акустических характеристик легкого винтового самолета Вильга-35А на режимах горизонтального полета// XXV Научно-техническая конференция по аэродинамике, п. Володарского, 27-28 февраля 2014 г, Материалы конференции, ЦАГИ, 2014, С. 188-189.
13. Мошков П.А., Самохин В.Ф. Экологические проблемы при создании современных легких винтовых самолетов и БПЛА// Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике - 2014», г. Москва, 22-24 апреля 2014 г. Сборник тезисов докладов. – М.:ООО «Принт-салон», 2014, С. 117-118.

14. Самохин В.Ф., Мошков П.А. Исследование источников шума малоразмерного ЛА с винтомоторной силовой установкой// X Международная научная конференция по гидроавиации «Гидроавиасалон-2014», г. Геленджик, 5-6 сентября 2014, Тезисы докладов. – М.: Издательский отдел ЦАГИ, 2014, С. 49.
15. Мошков П.А., Самохин В.Ф. Экспериментальное исследование влияния интервала между толкающим воздушным винтом и крылом на уровень шума на местности сверхлегкого самолета// XXVI Научно-техническая конференция по аэродинамике, п. Володарского, 26-27 февраля 2015 г, Материалы конференции, ЦАГИ, 2015, С. 171.
16. Мошков П.А., Самохин В.Ф. О роли поршневого двигателя в суммарном шуме силовой установки легкого винтового самолета// Четвертая открытая всероссийская конференция по аэроакустике, г. Звенигород, 29 сентября - 1 октября 2015 г. Тезисы докладов. – М.: Издательский отдел ЦАГИ, 2015, С. 104.
17. Самохин В.Ф., Мошков П.А. Экспериментальное исследование спектральных характеристик природного акустического фона// Четвертая открытая всероссийская конференция по аэроакустике, г. Звенигород, 29 сентября - 1 октября 2015 г, Тезисы докладов. – М.: Издательский отдел ЦАГИ, 2015, С. 116.