# Наука и Образование МГТУ им. Н.Э. Баумана

Сетевое научное издание ISSN 1994-0408

#### УДК 534.83+629.735.33

Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 07. С. 146–170.

#### DOI: 10.7463/0715.0782827

Представлена в редакцию: 04.04.2015 Исправлена: 16.06.2015

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

# Природный фон при проведении акустических испытаний самолетов на аэродроме базирования малой авиации

Кажан В. Г.<sup>1</sup>, Мошков П. А.<sup>1,\*</sup>, Самохин В. Ф.<sup>1</sup>

\*<u>moshkov89@bk.ru</u>

<sup>1</sup>Центральный аэрогидродинамический институт имени проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Россия

В статье представлены результаты экспериментального исследования спектральных и интегральных характеристик природного акустического фона для заданной природноклиматической зоны. Разработана методика сбора данных о спектральном составе и процедура формирования банка статистических данных о спектральных и интегральных характеристиках природного акустического фона. Показано, на основе анализа модели Лайтхилла генерации звука низкоскоростным воздушным потоком и полученных экспериментальных данных, что в приземном слое атмосферы основным источником акустического излучения является турбулентности, «собственный» ШУМ возникающей при взаимодействии ветра конвективными потоками воздуха. Установлена зависимость интенсивности шума турбулентности от скорости ветра, от характера подстилающей поверхности и от разности дневной и минимальной ночной температур воздуха.

Ключевые слова: природный акустический фон, турбулентность атмосферы, фоновый шум

#### Введение

Широкое распространение в мире легкомоторной авиации, осуществляющей полеты на относительно малых высотах (200-2000 метров), и наличие международных и национальных норм, ограничивающих допустимые уровни шума на территории проживания или отдыха населения. Все эти факторы позволяют считать проблему шума на местности легких винтовых самолетов актуальной. Относительно низкие значения предельно-допустимых уровней шума (до 50-60 дБА в дневное время суток) на территории зон отдыха населения, установленные, в частности, российскими санитарными нормами [1], ставят задачу определения координат трассы полета самолета относительно населенного пункта, при которых уровни шума самолета не превысят предельно-допустимых значений.

Принимая во внимание, что уровни шума 50-60 дБА соответствуют уровням природного акустического фона при достаточно благоприятных метеоусловиях, является

важным определять положение трассы полета самолета относительно населенного пункта, при котором его уровни шума не будут выделяться из природного акустического фона.

В тоже время актуальной является проблема получения качественных экспериментальных данных об акустических характеристиках легких винтовых самолетов при проведении натурных испытаний на аэродроме базирования малой авиации. При проведении таких испытаний [2-4] очень важно, чтобы уровень полезного сигнала был существенно выше природного акустического фона.

В связи с вышеизложенным актуальным является формирование банка данных о спектральном составе акустического излучения атмосферы, соответствующего природному акустическому фону для различных климатических зон и природных рельефов местности, и об основных закономерностях формирования природного акустического фона в приземном слое атмосферы.

Целью настоящей работы является формирование экспериментального банка данных о спектральных и интегральных характеристиках природного акустического фона, характерного для равнинного рельефа поверхности земли в средних широтах Российской Федерации.

#### Общая характеристика приземного слоя турбулентной атмосферы

Приземный (пограничный) слой атмосферы - нижний, прилегающий к земной поверхности слой тропосферы толщиной 30-50 метров (иногда до 250 метров), свойства которого в значительной степени определяются близостью подстилающей поверхности. В приземном слое скорость ветра, температура и влажность воздуха особенно быстро меняются с высотой. Толщина пограничного слоя изменяется в достаточно широких пределах в зависимости от термической стратификации атмосферы, величины скорости ветра и шероховатости земной поверхности [5].

Пограничный слой характеризуется резким изменением метеорологических парамет-ров с высотой: вертикальные градиенты скорости ветра, температуры и влажности в по-граничном слое в десятки и сотни раз превышают соответствующие величины в вышеле-жащих слоях, но уменьшаются по абсолютной величине с увеличением высоты. Скорость ветра с высотой обычно возрастает, направление его практически не изменяется [6]. Верх-няя граница пограничного слоя нередко совпадает с верхней границей инверсии темпера-туры.

Вследствие неравномерности распределения давления в атмосфере ее воздушные мас-сы перемещаются в горизонтальном направлении, вызывая ветер. Скорость ветра и его направление непрерывно изменяются. Средние значения скорости ветра в приземном слое атмосферы (до 250 метров) составляют 5-10 м/с.

Перемещение воздуха в атмосфере носит турбулентный характер. Одним из источни-ков возникновения турбулентности является различие скоростей ветра в смежных слоях. Особенно велика турбулентность в нижних слоях тропосферы: в приземном слое высотой 50-100 м и в слое трения, простирающемся до высоты 1000-1500 м.

Кроме горизонтальных перемещений воздушных масс, в атмосфере присутствуют и вертикальные перемещения. Скорости вертикальных перемещений значительно ниже горизонтальных. В обычных условиях вертикальные перемещения измеряются в сантиметрах в секунду. Развитие этих перемещений связано с наличием архимедовой (или гидростатической) силы. Воздух, более теплый у земной поверхности и, следовательно, менее плотный, чем окружающая среда, перемещается вверх, а более холодный опускается на его место.

Вертикальные перемещения воздуха называются конвекцией. При слабом развитии конвекция носит беспорядочный турбулентный характер. При развитой конвекции над отдельными участками разогретой земной поверхности возникают мощные восходящие и нисходящие потоки воздуха, достигающие даже стратосферы. Нисходящие потоки обычно менее интенсивны, но охватывают намного большие площади.

#### Основные источники шума в приземном слое турбулентной атмосферы

Генерация акустических волн в турбулентной атмосфере обусловлена работой различных источников акустического излучения, которые условно можно разделить на две группы – источники природного и техногенного происхождения. В данной статье рассматриваются источники первого типа.

Основным источником стационарного аэродинамического шума, возникающего непосредственно в приземном слое атмосферы, является турбулентное движение воздушных масс, возникающее либо вследствие комплексного проявления циклонического и конвективного движения среды в условиях равнинного рельефа местности, либо при специфическом движении воздушных масс в горных районах и в предгорных долинах.

Циклоническое движение воздушных масс вдоль равнинной подстилающей поверхности обусловлено силой Кориолиса, возникающей вследствие вращения земли, и связанной с этим неравномерностью распределения давления в атмосфере, а вертикальное конвективное движением воздушных масс вызвано возникновением архимедовых сил вследствие неравномерного прогрева отдельных участков земной поверхности.

Основной источник нагревания нижних слоев атмосферы - тепло, получаемое ими от земной поверхности. Перенос тепла между поверхностью и атмосферой, а также в самой атмосфере осуществляется за счет молекулярной, турбулентной и радиационной теплопроводности, а также при конденсации (сублимации) водяного пара. Вследствие того, что коэффициент молекулярной теплопроводности неподвижного воздуха сравнительно мал, этот вид теплообмена незначителен.

Турбулентная теплопроводность возникает внутри атмосферы вследствие вихревого движения воздуха, т.е. турбулентности. Ее условно разделяют на динамическую и термическую составляющие. Динамическая турбулентность возникает в результате появления силы трения, как между отдельными слоями перемещающегося воздуха, так и между движущимся воздухом и подстилающей поверхностью. Термическая турбулентность, или тепловая конвекция - упорядоченный перенос отдельных объемов воздуха в вертикальном направлении, возникающий при неравномерном нагревании различных участков поверхности.

Радиационная теплопроводность представляет собой передачу тепла от почвы к атмосфере за счет излучения поверхностью длинноволновой радиации, поглощаемой нижними слоями воздуха. Радиационный поток тепла над сушей проявляется главным образом в ночные часы, когда турбулентность резко ослаблена, а тепловая конвекция отсутствует.

Конденсация (сублимация) водяного пара как источник повышения температуры воздуха проявляется, главным образом, в высоких слоях атмосферы, где образуются облака.

Таким образом, можно полагать, что основным источником акустического излучения, возникающего в приземном слое атмосферы, являются процессы турбулентного переноса среды в отсутствие жестких границ, соответствующие динамической и конвективной турбулентности.

В отношении стационарного природного акустического фона, обусловленного турбулентностью воздушной среды, сегодня еще нет достоверной информации о пространственной локализации областей концентрации турбулентной энергии в приземном слое атмосферы, ответственных за генерацию акустического излучения. В связи с этим являются неопределенными границы дальнего акустического поля подобных некомпактных источников. Однако, по аналогии с известными некомпактными аэродинамическими источниками (винты, вентиляторы, реактивные струи), можно полагать, что дальнее акустическое поле локальной области турбулентности начинается на удалении от центра области свыше 5-ти характерных размеров этой области.

Моделирование акустического поля такого некомпактного источника в виде области повышенной турбулентности в приземном слое атмосферы в первом приближении предлагается проводить в рамках модели, аналогичной известной модели Лайтхилла [7,8] для генерации шума низкоскоростным турбулентным потоком.

Для случая приземного слоя атмосферы наблюдатель может находиться как внутри, так и вне генерирующего излучение низкоскоростного ветрового потока, но вдали от источника излучения.

В рамках теории генерации звука низкоскоростным турбулентным потоком воздуха (акустическая аналогия Лайтхилла) основное неоднородное волновое уравнение для плотности " $\rho$ " имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 \rho}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$$
(1)

Тензор напряжений в правой части волнового уравнения в случае изотермического потока определяется соотношением:

$$T_{ij} = \rho_0 u_i u_j + p_{ij} - c^2 \rho \delta_{ij} , \qquad (2)$$

где c – скорость звука,  $p_{ij}$  - тензор вязких напряжений от сил давления и вязкости для сжимаемой жидкости,

$$p_{ij} = p\delta_{ij} + \eta \left[ -\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right]$$
(3)

 $\delta_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{0} & -\text{ символ Кронекера, равный 1 - при } i=j, и равный 0 - при i \neq j, u_i - составляющие мгновенной скорости движения потока в трехмерной системе координат. <math>x_i$  - пространственные координаты, p - давление,  $\eta$  - вязкость,  $r=|\vec{x}|$  -расстояние от источника до наблюдателя. Общее решение неоднородного волнового уравнения Лайтхилла имеет вид:

$$\rho = \frac{1}{4\pi c_0^4} \frac{x_i x_j}{r^3} \int_V \frac{d^2 T_{ij}}{dt^2} dV , \qquad (4)$$

где *V* – объем излучающего элемента потока.

Если мгновенную скорость разложить на осредненную  $\overline{U}$  и пульсационную u' составляющие, то есть  $u = \overline{U} + u'$ , то получим решение уравнения в виде [9], позволяющее объяснить некоторые механизмы генерации шума низкоскоростным турбулентным потоком.

$$\rho = \frac{1}{4\pi c_0^2} \int_{V} \left| \frac{\partial^2 \left( u_i' u_j' \right)}{\partial x_i \partial x_j} + 2 \frac{\partial u_i' \partial u_j}{\partial x_i \partial x_j} \right| \frac{\partial V}{r} .$$
(5)

Первое слагаемое подынтегрального выражения (5) содержит пространственные производные пульсационных скоростей и отвечает за взаимодействия типа «турбулентность – турбулентность». Второе слагаемое представляет собой произведение градиента средней скорости и пространственной производной пульсационной составляющей скорости и соответствует взаимодействию типа «сдвиг средней скорости – турбулентность». В соответствие существующей терминологией первое слагаемое определяет «собственный» шум турбулентности, а второе – «сдвиговый» шум.

Можно ожидать, что для случая относительно низких скоростей потока воздуха (до 15 м/с) в приземном слое атмосферы, представляющем интерес для некоторых практических задач, основным источником акустического излучения, возникающего в приземном слое, является «собственный» шум турбулентности.

Последнее уравнение позволяет оценить величину плотности и, соответственно, интенсивности акустического излучения, обусловленного действием в среде рейнольдсовых напряжений, если известны данные о тензоре турбулентных напряжений  $T_{ii}$  в приземном слое.

Сегодня известны обширные экспериментальные и теоретические исследования турбулентности в приземном слое атмосферы. Основная часть публикаций, отражающих различные аспекты конвективных течений, посвящена вертикальной конвекции в

горизонтальном слое жидкости. В то же время мало работ, посвящены исследованию течений при наличии горизонтального градиента температуры.

При этом в работах значительное внимание уделяется описанию структур и динамики течений, возникающих при тепловой конвекции в плоском горизонтальном слое жидкости, подогреваемом снизу, так называемой конвекции Рэлея-Бенара [10], двумерной конвекции Рэлея-Хэдли [11]. В данных работах рассматривается эволюция конвективных признаки, присущие не только потоков. установлены различным явлениям гидродинамической неустойчивости, но и нелинейным структурообразующим процессам различной природы. Описаны характерные типы двух- и трехмерных течений, дефектов вихревых структур, сценариев смены конвективных режимов. Особое внимание уделяется вопросу о том, как различные факторы (в основном сводимые к начальным и граничным условиям) определяют формы и размеры формирующихся вихревых структур. Все теоретические исследования базируются на представлениях о детерминированных процессах.

Вместе с тем в литературе практически не представлены исследования, касающиеся спектральных, корреляционных и пространственных характеристик турбулентности, возникающей в приземном слое при взаимодействии вертикальных конвективных потоков с горизонтальным переносом воздушной массы при различных начальных условиях. Это не позволяет сегодня провести расчетную оценку интенсивности акустического излучения, генерируемого турбулентностью в приземном слое атмосферы.

# Район проведения акустических измерений и используемое оборудование

В настоящей работе акустические измерения производились на аэродроме Московского авиационного института, расположенного в относительной близости от поселка «Алферьево» (Волоколамский район, Московская область). Аэродром представляет собой окруженное лесом ровное поле с размерами ≈ 1500х2500м (рис. 1). С севера и с востока территория аэродрома ограничена автодорогами P-107 и P-108. Кратчайшее расстояние от места измерения шума до автодорог составляет 2,5-3 км. Поверхность земли на аэродроме – заросший травой суглинок. Трава периодически выкашивается.

Наземная измерительная система включала в себя систему измерения и регистрации звукового давления, и систему измерения параметров атмосферы в месте проведения акустических испытаний.

Для измерения уровней звукового давления природного акустического фона использовался портативный многофункциональный шумомер типа «Экофизика – 110А». Прибор выполняет функции шумомера 1 класса точности, виброметра, анализатора спектров, узкополосного анализатора (БПФ). Для измерения параметров атмосферы использовался электронный метеометр типа «МЭС-200А».

Акустические измерения выполнялись микрофоном, расположенным на высоте 1,2 м относительно поверхности земли. При этом на микрофоне устанавливалась ветрозащита.



**Рис. 1.** Положение точки измерения шума и метеопараметров атмосферы на карте аэродрома с указанием взлетно-посадочной полосы (ВПП) и румба направлений ветра

# Процедура формирования банка данных по спектральным характеристикам природного акустического фона

Облик банка данных по интенсивности и спектральным характеристикам шума приземного слоя атмосферы определяется теми задачами, при решении которых будет использоваться данная информация. Одна из основных задач – это расчетно-экспериментальное определение границ области, в пределах которой шум самолета может быть выделен наблюдателем.

В авиационной акустике и, в частности, в проблеме шума летательных аппаратов (ЛА) на местности основной формой представления данных [12,13] является спектр звукового давления в третьоктавных полосах частот. Спектр звукового давления является основой для определения интегральных характеристик шума на местности ЛА различных классов и назначения. Массив спектров уровней звукового давления, полученных для локального интервала времени с постоянными или слабо изменяющимися во времени параметрами атмосферы, служит основой для статистической оценки амплитудных и частотных характеристик природного акустического фона для локальной комбинации параметров атмосферы.

Спектр акустического фона зависит от большого числа параметров, характеризующих состояние атмосферы в приземном слое в момент проведения

акустических измерений. Но даже в условиях совершенно спокойного состояния атмосферы в локальной области приземного слоя, где проводится регистрация уровня звукового давления, природное звуковое давление является случайной величиной. Величина уровня звукового давления зависит от большого числа параметров, характеризующих состояние приземного слоя в области генерации акустического излучения и на пути распространения этого излучения до точки приема, из которых многие также являются случайными.

Методика сбора данных о спектральном составе природного акустического фона для заданной природно-климатической зоны может быть следующей. В течение конечного, например, дневного интервала времени суток может иметь место несколько локальных интервалов времени, внутри которых значения параметров состояния приземного слоя сохраняются неизменными. Для диапазона времени, в течение которого параметры состояния приземного слоя атмосферы практически сохраняют постоянные значения (температура, давление, влажность, скорость и направление ветра, характер облачности и направление движения облаков), спектры звукового давления регистрируются с шагом 1, 2 или 5 секунд на временном промежутке 60-90 с. В течение локального интервала времени протяженностью 2-3 часа измерения повторяются с шагом 15-30 минут всего 6-7 раз. В настоящей работе обработка измеренного звукового сигнала включала в себя получение третьоктавных спектров в диапазоне частот 16-10000 Гц и суммарного уровня звукового давления для диапазона частот 10-20000 Гц.

Была выполнена статистическая обработка измеренных третьоктавных спектров природных акустических фонов согласно [14]. Расчет доверительного интервала производился для 90% надежности, согласно t-распределению Стьюдента.

В результате был сформирован банк данных по интенсивности и спектральным характеристикам шума приземного слоя атмосферы. Он включает в себя числовые и графические матрицы спектров уровней звукового давления природного фона в третьоктавных полосах частот, осредненные для 90%-го уровня надежности оценки и сгруппированные по метеопараметрам с указанием доверительных интервалов.

#### Графические матрицы третьоктавных спектров природного фона

Результаты измерений третьоктавных спектров звукового давления природного акустического фона представлены в виде типовых нормализованных графических матриц спектров уровней звукового давления на рис. 2-7. Можно отметить, что измерения природного фона и формирование базы данных по его интегральным и спектральным характеристикам проводились в период с апреля по сентябрь 2014 года.

На рис. 2, 4, 6 представлены измеренные в течение 1 мин. интервала времени с шагом 5 секунд третьоктавные спектры звукового давления природного акустического фона, а на рис. 3, 5, 7 представлены осредненные за интервал времени 60 секунд спектры уровней звукового давления.











в) t = 12.30





**Рис. 2.** Спектры природного акустического фона при измерениях в течение 1мин с шагом 5с. 24.04.2014 (W=4-6м/c)

На каждом рисунке приведена идентификационная надпись, содержащая: дату проведения испытаний, время начала измерений (t), скорость ветра, оценка состояния облачности. Параметры атмосферы во время испытаний изменялись в следующих диапазонах: скорость ветра (W) – 0-6м/с; температура (T) – 8-30°С; относительная влажность – 30-59%; состояние облачности – от «ясно» до «кучевые облака».



**Рис. 3.** Изменение осредненных спектров природного фона при измерении в течение дня 24.04.2014 (W=4-6м/c)







б) t = 11.35



в) t = 11.52



 $\Gamma$ ) t = 12.08

**Рис. 4.** Спектры природного акустического фона при измерениях в течение 1мин с шагом 5с. 29.04.2014 (W=1-2м/c)



**Рис. 5.** Изменение осредненных спектров природного фона при измерении в течение дня 29.04.2014 (W=1-2м/c)











в) t = 11.36



г) t = 11.48

**Рис. 6.** Спектры природного акустического фона при измерениях в течение 1мин с шагом 5с. 20.05.2014 (W=1-4<sub>M</sub>/c)



**Рис. 7.** Изменение осредненных спектров природного фона при измерении в течение дня 20.05.2014 (W=1-4<sub>M</sub>/c)

На основании полученных третьоктавных спектров уровней звукового давления природного акустического можно сделать следующие выводы:

1. Акустическое излучение, соответствующее природному акустическому фону, является широкополосным в широком диапазоне частот 16-10000 Гц.

- В спектре природного акустического фона можно выделить, по крайней мере, четыре диапазона частот, в которых отмечается характерное изменение уровней спектральных составляющих по частоте. Это:
  - диапазон частот 16-400Гц, где отмечается монотонное уменьшение спектрального уровня звукового давления при увеличении частоты;
  - диапазон частот 400-10000 Гц, где с ростом частоты спектральный уровень звукового давления уменьшается слабо или даже сохраняет постоянное значение;
  - диапазоны частот 1000-2000 Гц и 3000-4000 Гц, в которых имеет место возрастание спектрального уровня звукового давления природного акустического фона.

Источники излучения в данных диапазонах частот предстоит определить в дальнейшем.

3. Спектральные уровни природного акустического фона могут быть весьма нестабильны даже в процессе интервала времени, равном 1 мин, при отсутствии или при низкой (до 2 м/с) скорости ветра. И, наоборот, спектральные уровни звукового давления могут мало изменяться во времени даже при повышенной (до 6 м/с) скорости ветра.

# Статистическое обобщение экспериментальных данных по шуму турбулентности в приземном слое атмосферы

#### Осредненные спектры звукового давления и доверительные интервалы

На представленных ниже рис. 8-10 приведены осредненные спектры звукового давления для нескольких дней наблюдения, показаны границы доверительного интервала для каждой полосы частот и значения суммарных по спектру уровней звукового давления для осредненного спектра и для граничных спектров.

Осредненные спектры уровней звукового давления природного фона являются составной частью базы данных по природному акустическому фону в приземном слое атмосферы и позволяют провести оценку влияния скорости ветра и типа подстилающей поверхности на спектральные уровни звукового давления и на величину суммарного по осредненному спектру уровня звукового давления.



**Рис. 8.** Осредненный спектр акустического фона в третьоктавных полосах частот, границы доверительных интервалов и суммарные уровни звукового давления для W= 4-6 м/с. Измерения 24.04.2014 (T= 8°C, P= 1007 гПа, относ. влажность - 38%, ψ<sub>B</sub> = 330°-360°, ясно. Доверительный интервал для частот 16-10000Гц: δ= ± (1,6÷0,2) дБ)



Рис. 9. Осредненный спектр акустического фона в третьоктавных полосах частот, границы доверительных интервалов и суммарные уровни звукового давления для W= 4 м/с. Измерения 7.05.2014 (T= 8°C, P= 999 гПа, относ. влажность - 43%, ψ<sub>в</sub> = 270°, кучевые облака. Доверительный интервал для частот 16-10000 Гц: δ= ± (2,8÷0,69) дБ)



Рис. 10. Осредненный спектр акустического фона в третьоктавных полосах частот, границы доверительных интервалов и суммарные уровни звукового давления для W= 2-3 м/с. Измерения 27.05.2014 (T= 28°C, P= 989 гПа, относ. влажность - 42%,  $\psi_{\rm B} = 40^{\circ}$  - 50°, кучевые облака. Доверительный интервал для частот 16-10000 Гц:  $\delta = \pm (2,96 \div 0,36)$  дБ)

### Влияние типа подстилающей поверхности на суммарный уровень звукового давления природного фона

Суммарные уровни природного фона, соответствующие скорости ветра 4-6 м/с и разным значениям румбов ветра (рис. 1), были измерены 24.04.2014, 7.05.2014 и 14.05.2014. В таблице 1 приведены измеренные значения скорости и направления ветра, суммарного уровня звукового давления, рассчитанного по осредненному спектру ( $L_{\Sigma}$ ), и величина разности температур воздуха на высоте 2 метра между дневной температурой (в 13<sup>00</sup> часов) и минимальной ночной температурой воздуха. Эти температуры определялись по данным метеостанции г. Волоколамска [15].

Аналогичные данные для скорости ветра 2-2,5 м/с (измерения 29.04.2014, 20.05.2014 и 14.05.2014) представлены в таблице 2.

Дата испытаний	24.04.2014	7.05.2014	14.05.2014
Скорость ветра, (м/с)	4 - 6	4,5 - 5	4 - 6
Угол ветра, (град.)	330-360	270	248
L <sub>2</sub> , (дБ)	75,5	74,2	69,8
∆Т(воздух), (°С)	6,9	5,8	11,5
T <sub>13-00</sub> , (°C)	6,1	8,1	18,5

Таблица 1. Суммарные уровни фона и метеопараметры для измерений при скорости ветра 4-6 м/с

Дата испытаний	29.04.2014	20.05.2014	14.05.2014
Скорость ветра, (м/с)	2	2	2-2,5
Угол ветра, (град.)	220	100	260
L <sub>2</sub> , (дБ)	64,4	79	59,1
∆Т (воздух), (°С)	16	10,5	11,5
T <sub>13-00</sub> , ( <sup>o</sup> C)	18,9	27,5	18,5

Таблица 2. Суммарные уровни фона и метеопараметры для измерений при скорости ветра 2-2,5 м/с

Анализ представленных данных позволяет сделать следующие выводы. Наибольшие суммарные уровни ЗВУКОВОГО давления отмечаются В случаях, когда ветер распространяется над ровной поверхностью при отсутствии лесного покрова (измерения 24.04.2014 в таблице 1 и измерения 20.05.2014 в таблице 2). Снижение суммарного уровня звукового давления природного фона при распространении ветра над подстилающей поверхностью с лесным покровом, по сравнению со случаем распространения ветра над земной поверхностью без лесного покрова, составляет: при скорости ветра 4-6 м/с -  $\Delta L_{\Sigma}$ , = 4,5 ÷5,7 дБ, а при скорости ветра 2-2,5 м/с -  $\Delta L_{\Sigma}$ , = 14 ÷ 18дБ.

Над лесным покровом скорость конвективного потока существенно ниже, чем в случае подстилающей поверхности без лесного покрова. Конвективные потоки вообще возникают только тогда, когда температура поверхности земли превышает температуру окружающего воздуха. И чем больше разность температур земли и воздуха, тем выше ожидаемая скорость конвективного потока и тем выше турбулентность приземного слоя. В дневное время суток это условие реализуется в основном на открытых поверхностях, а в ночное время, наоборот, конвективные потоки могут появиться над заросшими лесом поверхностями.

В общем случае величина снижения уровня шума будет зависеть не только от вида подстилающей поверхности, но и от скорости передачи тепла от земли к воздуху, которая зависит от скорости нагрева верхнего слоя подстилающей поверхности. Этим можно объяснить различие в уровнях фона, измеренных 29.04.2014 и 14.05.2014 (таблица 2). Поэтому приведенные оценки показывают скорее тенденцию изменения уровня шума в приземном слое при изменении вида подстилающей поверхности.

Полученный результат качественно согласуется с предложенной моделью генерации шума в приземном слое атмосферы, в рамках которой уровень шума тем больше, чем выше интенсивность турбулентности в приземном слое. А интенсивность турбулентности определяется величинами скоростей ветра и конвективного потока и соотношением между этими скоростями. Скорость конвективного потока определяется степенью прогрева подстилающей поверхности, вдоль которой распространяется ветер, и она существенно выше на открытых для солнечной радиации поверхностях по сравнению с поверхностями с лесным покровом.

Отмеченное выше заметное превышение влияния конвекции на уровень шума при относительно низкой скорости ветра (2-2,5 м/с), по сравнению со случаем повышенной скорости ветра (4-6 м/с), обусловлено, возможно, тем, что в рассматриваемом сравнении

случаю с пониженной скоростью ветра соответствует более высокий прогрев подстилающей поверхности (на 10,5°С нагрев воздуха, таблица 2) и, следовательно, более высокая скорость конвективного потока, чем это имело место в случае повышенной скорости ветра (на 6,9°С нагрев воздуха, таблица 1).

# Влияние скорости ветра на суммарный уровень звукового давления природного фона

Ниже рассматриваются результаты измерений суммарных уровней природного фона и метеопараметров для различных скоростей ветра, но при одинаковом типе подстилающей поверхности. В таблицах 3 и 4 представлены результаты измерения уровней фона при разной скорости ветра. Данные результаты получены для открытой и покрытой лесом подстилающих поверхностей.

**Таблица 3.** Суммарные уровни фона и метеопараметры для измерений при открытой подстилающей поверхности

Дата испытаний	20.05.2014	20.05.2014
Скорость ветра, (м/с)	2	3
Угол ветра, (град.)	100	100
L <sub>∑</sub> , (дБ)	79	80,9
Δ <b>T</b> , (° <b>C</b> )	10,5	10,5
T <sub>13-00</sub> , ( <sup>o</sup> C)	27,5	27,5

Таблица 4. Суммарные уровни фона и метеопараметры для измерений при покрытой лесом подстилающей поверхности

Дата испытаний	14.05.2014	14.05.2014
Скорость ветра, (м/с)	4-5	2 - 2,5
Угол ветра, (град.)	220	260
L <sub>Σ</sub> , (дБ)	64,4	59,1
Δ <b>Τ</b> , ( <sup>°</sup> C)	16	11,5
T <sub>13-00</sub> , ( <sup>o</sup> C)	18,5	18,5

Из представленных в таблицах 3 и 4 данных видно, что при прочих равных условиях увеличение скорости ветра от 2 до 3 м/с (таблица 3) приводит к возрастанию суммарного уровня звукового давления на 1,9 дБ. А увеличение скорости ветра в два раза (таблица 4) вызывает возрастание суммарного уровня звукового давления на 5,3 дБ.

# Частотное распределение доверительных интервалов для оценок осредненных уровней звукового давления

Частотное распределение доверительных интервалов для оценок осредненных уровней звукового давления показывает стабильность уровней звукового давления природного фона в третьоктавных полосах частот и может свидетельствовать о роли

отдельных источников акустического излучения в формировании уровня звукового давления в конкретной полосе частот.

На рис. 11 представлены графики частотного распределения доверительных интервалов для оценок осредненных уровней звукового давления природного акустического фона, рассчитанные для измеренных третьоктавных спектров звукового давления.



**Рис. 11.** Третьоктавные спектры доверительных интервалов для осредненных спектральных уровней звукового давления природного фона

Малые величины доверительных интервалов (0,5-1,5 дБ) в области средних частот наблюдаются в случаях относительно прохладной погоды при повышенной скорости ветра 4-6 м/с (24.04.2014, 7.05.2014, T=7–8°C), когда конвективные потоки имеют малую скорость и достаточно равномерно распределены в пространстве приземного пограничного слоя атмосферы.

Можно видеть (рис. 11), что величина доверительного интервала для оценки осредненных спектральных уровней звукового давления природного фона не постоянна по частоте и может изменяться в широких пределах от 0,1 дБ в области высоких частот до 3,2 дБ в области средних и низких частот.

#### Заключение

В результате выполненных измерений спектральных характеристик природного акустического фона в условиях аэродрома базирования малой авиации получены нормализованные третьоктавные спектры уровней звукового давления природного акустического фона в графической форме в приземном слое атмосферы. Установлены

Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана

значения доверительных интервалов для оценок математического ожидания спектральных уровней звукового давления фона для 90% уровня надежности для различных значений метеорологических параметров, характеризующих состояние атмосферы.

Акустическое излучение, соответствующее природному акустическому фону, является широкополосным в диапазоне частот 16-10000 Гц. В спектрах фона можно выделить, по крайней мере, четыре диапазона частот, в которых отмечается характерное изменение уровней спектральных составляющих по частоте. Вероятнее всего эти диапазоны частот соответствуют различным механизмам генерации звука природного происхождения.

Показано, что даже в условиях равнинной местности спектральные уровни природного акустического фона могут быть весьма не стабильны даже в процессе 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 и характера подстилающей поверхности на пути распространения ветра.

#### Список литературы

- 1. CH 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. М.: Минздрав России, 1996. 8 с.
- 2. Самохин В.Ф., Мошков П.А. Акустические характеристики легкого винтового самолета с двигателем внутреннего сгорания // Труды МАИ. 2012. № 57. Режим доступа: <u>http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=30715</u> (дата обращения 01.06.2015).
- 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.
- Алексеев В.В., Гусев А.М. Свободная конвекция в геофизических процессах // Успехи физических наук. 1983. Т. 141, вып. 10. С. 311- 342. DOI: <u>10.3367/UFNr.0141.198310d.0311</u>
- 6. Прох Л.З. Словарь ветров. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 312 с.
- Lighthill M.J. On Sound Generated Aerodynamically. I. General Theory // Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1952. Vol. 211. P. 564-587. DOI: <u>10.1098/rspa.1952.0060</u>

- Lighthill M.J. On Sound Generated Aerodynamically. II. Turbulence as a Source of Sound // Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1954. Vol. 222. P. 1-32. DOI: 10.1098/rspa.1954.0049
- Мунин А.Г., Самохин В.Ф., Шипов Р.А., Власов Е.В. Авиационная акустика. Часть 1. Шум на местности дозвуковых пассажирских самолетов и вертолетов / под общ. ред. А.Г. Мунина. М.: Машиностроение, 1986. 248 с.
- Гетлинг А.В. Конвекция Рэлея-Бенара. Структура и динамика. М.: Эдиаториал УРСС, 1999. 247 с.
- 11. Закинян Р.Г., Сухов С.А., Ларченко И.Н. Математическое моделирование тепловой конвекции // Современные проблемы науки и образования. 2011. № 6. Режим доступа: <u>www.science-education.ru/100-5016</u> (дата обращения 14.06.2015).
- 12. Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации: Охрана окружающей среды. Том 1. Авиационный шум. 6-е изд., ИКАО, 2011.
- 13. Авиационные Правила. Часть 36. Сертификация воздушных судов по шуму на местности / Межгосударственный авиационный комитет. М.: Авиаиздат, 2003. 122 с.
- 14. Техническое руководство ИКАО по окружающей среде, регламентирующее использование методик при сертификации воздушных судов по шуму. 3-е изд. ИКАО, 2004.
- 15. Расписание Погоды: сайт компании. Режим доступа: <u>http://www.rp5.ru</u> (дата обращения 16.03.2015).

# Science & Education of the Bauman MSTU

Electronic journal ISSN 1994-0408 Science and Education of the Bauman MSTU, 2015, no. 07, pp. 146–170.

#### DOI: 10.7463/0715.0782827

Received: Revised:

© Bauman Moscow State Technical Unversity

# Ambient Background Noise under Acoustic Tests of Aircrafts at the Local Aerodrome

V.G. Kazhan<sup>1</sup>, P.A. Moshkov<sup>1,\*</sup>, V.F. Samokhin<sup>1</sup>

\*<u>moshkov89@bk.ru</u>

04.04.2015

16.06.2015

<sup>1</sup>Central Aerohydrodynamic Institute n. a. N.E. Zhukovsky, Zhukovsky, Russia

Keywords: background ambient noise, aerosphere turbulence, ground noise

To obtain the qualitative experimental data about acoustical characteristics of light propeller aircrafts is a relevant problem when conducting the full-scale tests at the local aerodrome. For such tests [1 - 3], it was very important that a desired signal level was significantly higher than the ambient background noise.

In this regard, it is relevant to form a databank both of the spectral structure of aerosphere acoustical radiation, corresponding to the ambient background noise for various climatic zones and natural landscapes, and of the basic regularities to form an ambient background noise in a bottom layer of aerosphere.

The article describes the authors' developed procedure of data acquisition about a spectral structure and the procedure to form a bank of statistical data about spectral and integrated characteristics of an ambient background noise.

The article provides measurements of spectral characteristics of an ambient background noise taken in conditions of local aerodrome. It shows the normalized graphical matrixes of 1/3-oktave spectra of the sound pressure levels (SPL) of an ambient background noise. The paper also estimates confidence intervals to assess mathematical expectation of the spectral sound pressure levels of a background to have a reliability level of 90 % for various values of the meteorological parameters characterizing aerosphere condition. In the course of tests, the aerosphere parameters were changing within the following ranges: wind speed - 0-6 m/s; temperature -  $8-30^{\circ}$  C; relative humidity - 30-59%; air cover condition - from «clear sky» to « cumulus clouds».

The obtained data allowed us to find that the acoustical radiation corresponding to the ambient background noise is broadband, within the range of frequencies of 16-10000Hz. In the background noise spectra, it is possible to distinguish, at least, four frequency ranges, which have the notable characteristic frequency-changing levels of spectral components. It may be possible that these frequency ranges match to various sources (or mechanism of sound generation) of a natural origin. It is shown that even in conditions of flat ground, spectral levels of the background ambient noise can be rather unstable even in a time interval, equal to one minute, with no or low (up to 2 m/s) wind speed. And, on the contrary, a change of the spectral levels of sound pressure can be poor in a time even with increasing (up to 6 m/s) wind speed.

#### References

- SN 2.2.4/2.1.8.562-96. Shum na rabochikh mestakh, v pomeshcheniyakh zhilykh, obshchestvennykh zdanii i na territorii zhiloi zastroiki [Sanitary Norms 2.2.4/2.1.8.562-96. Noise in the Workplace, in Indoor Spaces of Residential and Public Buildings, and in Residential Development Zones.]. Moscow, Minzdrav Rossii Publ., 1996. 8 p. (in Russian)
- Samokhin V.F., Moshkov P.A. Acoustic characteristics of an easy propeller airplane with internal combustion engines. *Trudy MAI*, 2012, no. 57. Available at: <a href="http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=30715">http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=30715</a> , accessed 01.06.2015. (in Russian).
- Samokhin V.F., Moshkov P.A. Research of acoustic characteristics by Vilga-35a light propeller aircraft on level flight conditions. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2014, vol. 21, no. 2, pp. 55-65. (in Russian).
- 4. Moshkov P.A. Some results of the experimental research of acoustical characteristics power plant extralight aircraft in static conditions. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Volga region Bulletin*, 2014, no. 6, pp. 265-270. (in Russian).
- 5. Alekseev V.V., Gusev A.M. Free convection in geophysical processes. Uspekhi fizicheskikh nauk, 1983, vol. 141, no. 10, pp. 311- 342. DOI: <u>10.3367/UFNr.0141.198310d.0311</u> (English version of journal: Soviet Physics Uspekhi, 1983, vol. 26, no. 10, pp. 906-922. DOI: <u>10.1070/PU1983v026n10ABEH004520</u>).
- 6. Prokh L.Z. *Slovar' vetrov* [Dictionary of winds]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1983. 312 p. (in Russian).
- Lighthill M.J. On Sound Generated Aerodynamically. I. General Theory. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1952, vol. 211, pp. 564-587. DOI: <u>10.1098/rspa.1952.0060</u>
- Lighthill M.J. On Sound Generated Aerodynamically. II. Turbulence as a Source of Sound. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1954, vol. 222, pp. 1-32. DOI: <u>10.1098/rspa.1954.0049</u>
- Munin A.G., Samokhin V.F., Shipov R.A., Vlasov E.V. Aviatsionnaya akustika. Chast' 1. Shum na mestnosti dozvukovykh passazhirskikh samoletov i vertoletov [Aviation acoustics. Part 1: The noise on the ground of subsonic passenger aircraft and helicopters]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 248 p. (in Russian).
- 10. Getling A.B. *Konvektsiya Releya-Benara. Struktura i dinamika* [Rayleigh-Benard convection. Structure and dynamics]. Moscow, Ediatorial URSS Publ., 1999. 247 p. (in Russian).

- 11. Zakinyan R.G., Sukhov S.A., Larchenko I.N. bathematical modeling of thermal convection. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern problems of science and education, 2011, no. 6. Available at: <u>www.science-education.ru/100-5016</u>, accessed 14.06.2015. (in Russian).
- 12. Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation: Environmental Protection. Volume I. Aircraft Noise. 6<sup>th</sup> ed. ICAO, 2011.
- Aviatsionnye Pravila. Chast' 36. Sertifikatsiya vozdushnykh sudov po shumu na mestnosti [Aviation Regulations. Pt. 36. Aircraft noise received on the ground certification]. Moscow, Interstate Aviation Committee, Aviaizdat Publ., 2003. 122 p. (in Russian).
- 14. Environmental Technical Manual on the Use of Procedures in the Noise Certification of Aircraft (ETM). 3<sup>rd</sup> ed. ICAO, 2004.
- 15. Reliable Prognosis: website of Raspisaniye Pogodi Ltd. Available at: <u>http://www.rp5.ru</u> , accessed 01.06.2015.