

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ЗВУКОВОГО ПОЛЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

**Сумбатян М.А., Казаков Е.А., Мусатова Н.К., Самсонов И.К.**

**Ключевые слова:** аэроакустика, летательный аппарат, функция Грина, акустическое давление, акустическое поле, квадрокоптер.

**Sumbatyan M.A., Kazakov E.A., Musatova N.K., Samsonov I.K.**  
**Theoretical and experimental study of the sound field of the unmanned aerial vehicle**

**Keywords:** aeroacoustics, aircraft, Green's function, acoustic pressure, acoustic field, quadrocopter.

In the paper we demonstrate the measurements of the structure of the sound field of the quadrocopter in the hover mode. The influence of the configuration of the outer region on the pattern of the vortex field is analyzed. Here are compared the results of theoretical and natural experiments. It is established that in the open area the theoretical results nearly coincide with the measured ones. The results in a closed area differ by no more than 2 dB, which somewhat exceeds the generally accepted permissible error of 1 dB and can be explained by the non-ideal physical conditions of the experiment (roughness of the ground surface, the influence of surrounding buildings, trees, etc.). The qualitative properties established should also become apparent in the conditions of UAV movement along the streets of the city with sound reflection from buildings.

**Մումբատյան Մ.Ա., Կազակով Ե.Ա., Մուսատովա Ն.Կ., Սամսոնով Ի.Կ.**

**Անօդաչու թռչող սարքի ձայնային դաշտի տեսական և փորձարարական ուսումնասիրությունը**

**Հիմնաբանը՝** աէրոակուստիկա, թռչող սարք, Գրինի ֆունկցիա, ակուստիկ ճնշում, ակուստիկ դաշտ, կվադրոկոպտեր:

Աշխատանքում բերված են կվադրոկոպտերի ձայնային դաշտի կառուցվածքի չափումները կախման ռեժիմում: Կատարված է արտաքին միջավայրի տեսքի ազդեցության անալիզը մրրկային դաշտի կարգվածքի վրա: Հաստատված է, որ բաց տարածությունում տեսական արդյունքները պրակտիկորեն համընկնում են չափումների արդյունքների հետ: Փակ տարածությունում արդյունքները տարբերվում են 2դԲ, որը մի փոքր ավելի է ընդունված 2դԲ թույլատրելի սխալներից, ինչը կարող է բացատրվել ֆիզիկական փորձի ֆիզիկական պայմանների ոչ կատարելությունից:

В работе представлены измерения структуры звукового поля квадрокоптера в режиме висения. Выполнен анализ влияния конфигурации внешней области на структуру вихревого поля. Произведено сравнение теоретических результатов с результатами натурных экспериментов. Установлено, что в открытом пространстве теоретические результаты практически совпадают с результатами измерений. Результаты в замкнутом пространстве отличаются не более 2 дБ, что несколько превышает общепринятую допустимую погрешность 1 дБ и может быть объяснено неидеальностью физических условий проведения эксперимента (неровность поверхности земли, влияние окружающих зданий, деревьев и т. д.). Выявленные там качественные свойства должны проявляться и в условиях движения БПЛА по улицам города с отражением звука от строений.

**Введение**

За последние несколько лет беспилотная авиация, будь то гражданские малогабаритные квадрокоптеры либо более крупные коммерческие беспилотные

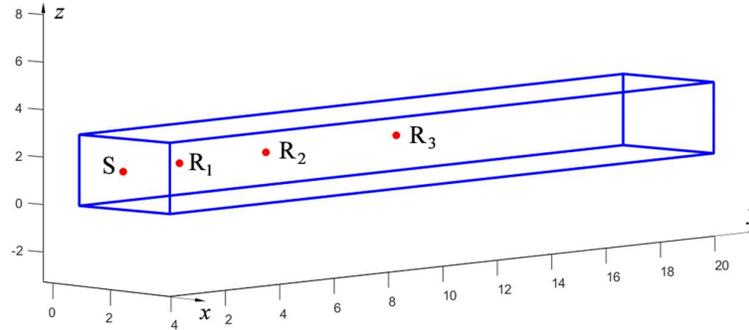
летательные аппараты (БПЛА), получает всё большее распространение. Примером актуальности темы исследования могут служить недавние работы [1-3]. Работы [1,2] посвящены обнаружению БПЛА с земли. В статье [1] также представлена оценка достижимых расстояний обнаружения звука БПЛА в различных средах с разными значениями фонового шума. В работе [2] делается попытка проанализировать малозаметность и аэродинамические характеристики средневысотного аппарата большой продолжительности полета. Также интересной является работа [3]. В ней представлена сложная трёхмерная модель распространения звука от дрона среди застройки, построенная при помощи метода трассировки лучей Гаусса. Это лишь малая часть работ, посвященных задаче распространения звука от БПЛА. Большое внимание уделяется крупным коммерческим летательным аппаратам, мы же рассматриваем БПЛА с гораздо меньшими размерами, весом и геометрией. Вследствие этой растущей популярности актуальной является тематика изучения акустического поля БПЛА в аспектах обнаружения и контроля в рамках городской среды и снижения негативного влияния на экологическую картину. В случае с квадрокоптерами, генерируемое возмущение воздушного потока является вихревой зоной, ввиду фундаментальных особенностей конструкций винтомоторной группы, лежащей в основе технологии их изготовления. Целью данной работы является сравнение результатов, полученных на основе аналитической модели, и результатов, полученных путём проведения натуральных экспериментов, по замеру акустического поля квадрокоптеров.

#### **Аналитическое моделирование**

Пользуясь теорией вихревого звука, в которой доказывается, что вихревое поле порождает звуковое [4], будем говорить о расчете акустического давления в среде. Вычислим акустическое давление в заданной точке приёма при различном расположении источников звука. Точка приёма при полевых испытаниях соответствует положению микрофона, записывающего шум от беспилотного летательного аппарата, а точка источника – непосредственно положение летательного аппарата. В качестве ограниченного пространства, моделирующего городские условия распространения звука от парящего квадрокоптера, рассмотрим бесконечный по одной координате и ограниченный по двум другим трёхмерный прямоугольный параллелепипед. Этот случай можно рассматривать как аналог реальной ситуации полета БПЛА между домами в параллельной узкой застройке. При сравнении с натурными экспериментами такая модель соответствует случаю распространения звука в длинном узком коридоре. Для сопоставления аналитических результатов с уровнем звука, полученным при натуральных экспериментах в децибелах, воспользуемся доказанным утверждением, что сигналы, пришедшие в точку приемника после переотражений, складываются по энергии. Зная формулу для энергии, а также учитывая характер звукопоглощения поверхностей в помещении, получим уровень звукового давления, сопоставимый с экспериментальным.

Пусть точка источника имеет координаты  $S = (x_s, y_s, z_s) = (a/2, 5, c/2)$ , а точки приёма  $R_1 = (a/2, 6, c/2)$ ,  $R_2 = (a/2, 10, c/2)$ ,  $R_3 = (a/2, 15, c/2)$ . Ширина слоя равна  $h = 2.7$  м вдоль осей  $x$  и  $z$  – ширина и высота коридора при натуральных экспериментах. Частота работы пропеллеров БПЛА равна приблизительно

$\omega = 1000 \text{ рад/с}$ ; для этого случая волновое число равно  
 $k = \omega / c = \frac{1000 \text{ рад/с}}{343 \text{ м/с}} \approx 2.915$ .



Фиг.1. Схема расположения источников звука и точки приёма в трёхмерном параллелепипеде.

В случае абсолютно отражающих стен давление в произвольной точке пространства бесконечного параллелепипеда вычисляется по формуле [5,6]:

$$p(\xi, \eta, \zeta) = \sum_{j=1}^4 \sum_{n,l=-\infty}^{\infty} \frac{\exp(ikr)}{r}, \quad r = \sqrt{(\xi_j + 2an)^2 + \eta_j^2 + (\zeta_j + acl)^2}$$

$$\begin{aligned} (\xi_1, \eta_1, \zeta_1) &= (x_S - x_R, y_S - y_R, z_S - z_R), \\ (\xi_2, \eta_2, \zeta_2) &= (-x_S - x_R, y_S - y_R, z_S - z_R), \\ (\xi_3, \eta_3, \zeta_3) &= (x_S - x_R, y_S - y_R, -z_S - z_R), \\ (\xi_4, \eta_4, \zeta_4) &= (-x_S - x_R, y_S - y_R, -z_S - z_R), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $a \times b \times c$  – размер параллелепипеда ( $0 < x < a$ ,  $b \rightarrow \infty$ ,  $0 < z < c$ ). Вдоль оси укоридор считается бесконечным, что соответствует измерениям, проведенным в коридоре учебного института.

Известно, что энергия акустического сигнала пропорциональна квадрату давления:  $E = |p(x, y, z)|^2$ . Тогда, при суммировании членов ряда (1) по энергии, числитель в формуле (1) обратится в единицу в силу того, что экспонента от мнимого аргумента по модулю равна 1, а в знаменателе останется квадрат расстояния между точками приёма и источника:

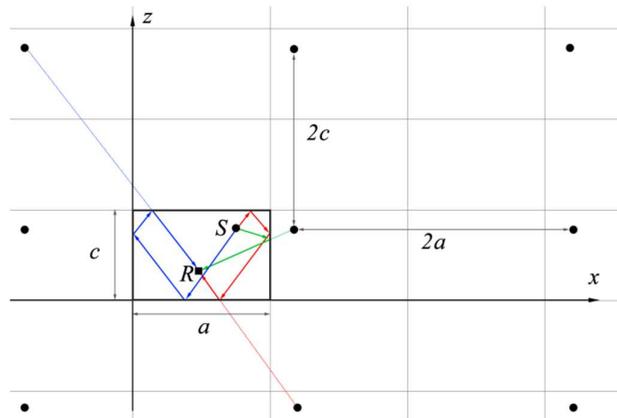
$$E(\xi, \eta, \zeta) = \sum_{j=1}^4 \sum_{n,l=-\infty}^{\infty} \frac{1}{(\xi_j + 2an)^2 + \eta_j^2 + (\zeta_j + acl)^2}, \quad (2)$$

В формуле (2) учтено, что, за долгую практику развития акустики установлено, что сигналы, пришедшие после переотражений, складываются по энергии.

Ряд (2) соответствует случаю идеально отражающих поверхностей без звукопоглощения. Для корректных вычислений необходимо учитывать, что при каждом отражении энергия звукового луча уменьшается в  $(1-\alpha)$  раз, где  $0 < \alpha < 1$  – коэффициенты звукопоглощения. Для простоты полагаем, что все отражающие поверхности имеют один и тот же коэффициент звукопоглощения  $\alpha$ . При  $\alpha = 0$  имеем случай абсолютно отражающих стен. Тогда, например, первая сумма из ряда (2) примет вид:

$$\text{Sum}_1^E = \sum_{n,l=-\infty}^{\infty} \frac{(1-\alpha)^{2|n|+2|l|}}{(\xi_1 + 2an)^2 + \eta_1^2 + (\zeta_1 + acl)^2} \quad (3)$$

Она соответствует случаю  $(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) = (x_S - x_R, y_S - y_R, z_S - z_R)$ . Показатель степени в формуле (3) равен сумме числа пересечений отрезка, соединяющего точки мнимого источника и приёмника, а также вертикальных (параметр  $2|n|$ ) и горизонтальных (параметр  $2|l|$ ) линий, как показано на Фиг.2. В частности, для  $n = 0, l = 0$  имеем случай прямого попадания звукового луча из реального источника  $S$  в точку приёма  $R$ . В данном случае это происходит без каких-либо переотражений от стен и, следовательно, без пересечений лучом вертикальных и горизонтальных линий, как это имело бы место при пролете луча от мнимого источника к приёмнику.



Фиг.2. Отражение звуковых лучей от сторон параллелепипеда, соответствующее мнимым источникам для суммы  $\text{Sum}_2^E$ .

Опишем также три других элемента суммы из формулы (2):

$$\begin{aligned}
 \text{Sum}_2^E &= \sum_{n,l=-\infty}^{\infty} \frac{(1-\alpha)^{|2n-1|+2|l|}}{(\xi_2 + 2an)^2 + \eta_2^2 + (\zeta_2 + acl)^2} \\
 \text{Sum}_3^E &= \sum_{n,l=-\infty}^{\infty} \frac{(1-\alpha)^{2|n|+|2l-1|}}{(\xi_3 + 2an)^2 + \eta_3^2 + (\zeta_3 + acl)^2} \\
 \text{Sum}_4^E &= \sum_{n,l=-\infty}^{\infty} \frac{(1-\alpha)^{|2n-1|+|2l-1|}}{(\xi_4 + 2an)^2 + \eta_4^2 + (\zeta_4 + acl)^2}
 \end{aligned} \tag{4}$$

Рассмотрим подробнее эти выражения, например, для второй суммы в (2) при  $j=2$ . Это соответствует первой строке в (4), и здесь отличие от случая  $j=2$  состоит в позиции источника по координате  $x: (\xi_2, \eta_2, \zeta_2) = (-x_S - x_R, y_S - y_R, z_S - z_R)$  и в показателе степени в числителе – вместо  $|2n|$  теперь стоит  $|2n-1|$ , поскольку «исходный источник»  $(-x_S, y_S, z_S)$  (соответствующий положению при  $n=0, l=0$ ) является мнимым и лежит вне границ параллелепипеда. Тогда точки мнимых источников в пространстве будут располагаться, как изображено на Фиг.2 черными кругами, из числа которых следует исключить реальный источник  $S$ . Например, для случая  $n=1, l=0$  появляется точка мнимого источника, которая смещена от точки  $(-x_S, y_S, z_S)$  вправо вдоль оси  $x$  на величину  $2a$ ; вдоль оси  $z$  смещение не происходит. Это соответствует зеленому лучу однократного отражения на Фиг.2. При этом отрезок, соединяющий мнимый источник с приёмником, действительно пересек одну вертикальную линию ( $|2n-1|=1$ ). Случаи, отмеченные на графике синим и красным цветом, оба соответствуют трехкратному отражению. Для синего цвета имеем  $n=0, l=1$ , в итоге  $|2n-1|+|2l|=3$ . Для красного цвета имеем  $n=1, l=-1$ , и опять получаем  $|2n-1|+|2l|=3$ .

Случаи третьего и четвертого слагаемых ( $j=3,4$ ) аналогичны первым двум, с той лишь разницей, что  $(\xi_3, \eta_3, \zeta_3) = (x_S - x_R, y_S - y_R, -z_S - z_R)$  и  $(\xi_4, \eta_4, \zeta_4) = (-x_S - x_R, y_S - y_R, -z_S - z_R)$ .

Как было отмечено выше, область, которая моделировалась в среде MATLAB, представляет собой бесконечный по  $y$  коридор с размерами  $a = 2.7$  м,  $c = 2.7$  м вдоль осей  $x$  и  $z$ . Коэффициент звукопоглощения  $\alpha = 0.2$  подобран, исходя из акустических характеристик помещения. Величины «бесконечных» параметров суммирования в двойных рядах (3), (4), брались  $n, l = \overline{-100, 100}$ .

Результаты численных расчетов приведены в таблице 1 в виде, показывающем ослабление сигнала на расстояниях  $r_2 = 5$  и  $r_3 = 10$  метров по сравнению с расстоянием  $r_1 = 1$  метр, – в относительном ослаблении по энергии и в децибелах.

**Таблица 1.** Ослабление уровня принимаемого акустического сигнала при увеличении расстояния от источника до приемника в трехмерном бесконечном параллелепипеде.

$E_1 / E_2$	3.631	$E_1 / E_3$	7.079
$E_1 - E_2$	5.6 дБ	$E_1 - E_3$	8.5 дБ

Здесь  $E_1, E_2$  и  $E_3$  – давление, соответствующее точкам приемника  $R_1, R_2$  и  $R_3$  на указанных расстояниях от приемника соответственно.

Любопытно рассмотреть поведение уровня звука с расстоянием при более близком расположении точек приёма к источнику звука:  $S = (a/2, 5, c/2)$ ,  $R_4 = (a/2, 5.2, c/2)$ ,  $R_5 = (a/2, 5.35, c/2)$ ,  $R_6 = (a/2, 5.9, c/2)$ , что отражено в таблице 2.

**Таблица 2.** Ослабление уровня принимаемого акустического сигнала при увеличении расстояния от источника до приемника в трехмерном параллелепипеде в случае близкого расположения излучателя и приемников.

$E_4 / E_5$	2.561	$E_4 / E_6$	7.271
$E_4 - E_5$	4.1 дБ	$E_4 - E_6$	8.6 дБ

### Экспериментальная часть

По данному направлению исследований были проведены несколько циклов измерений в летний и осенний периоды 2021 года. Измерения проводились при трёх различных условиях на базе Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И.Ворovichа Южного федерального университета (г. Ростов-на-Дону, Россия):

- в узком коридоре – шириной 2,7 метра, длиной 30 метров, высотой 2,7 метра;
- в широком коридоре – в плане 8 на 10 метров, при той же высоте потолка;
- на уличной площадке – расстояние от стены института составляло от 10 до 15 метров. При этом с трёх других боковых сторон стены отсутствовали, т. е. в этих направлениях пространство было практически неограниченным.

В качестве генераторов акустических сигналов использовались БПЛА марки «Геоскан Пионер», «Геоскан Пионер мини» российского производства и «DJI Mavic Air» китайского производства. Для измерений использовались микрофоны РСВ-378В02 производства США, а также четырехканальный акустический измерительный прибор SIRIUSm-3xACC-1xACC+ производства компании DEWESOFT (страна изготовитель Словения).

При выполнении измерений расстояния от микрофона до БПЛА составляли 1, 5, 10 и 15 метров. БПЛА находился в режиме висения на высоте установки микрофона, которая составляла 1,5 метра. В случаях измерений, которые проводились на

уличной площадке и в широком коридоре, показания снимались с трёх микрофонов путём измерения среднего значения. Микрофоны располагались на углах 45 и 90 градусов мнимой окружности вокруг БПЛА и были направлены непосредственно на него. Схемы расположения микрофонов во время измерений представлены на Фиг. 3-5.

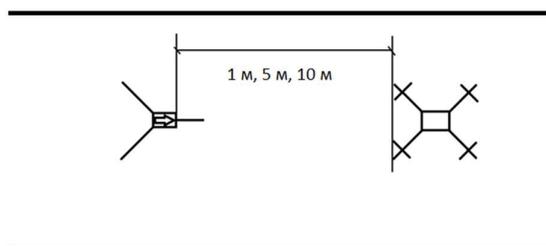
Измерения в помещениях проводились в выходной день, в условиях практически полного отсутствия посторонних источников шума. Это же касается и измерений на уличной площадке, достаточно удалённой от проезжей части. Это говорит о том, что полученные в результате измерений данные в достаточной мере удовлетворяют необходимой точности. Полученные данные представлены в Таблицах 3 и 4.

**Таблица 3.** Данные экспериментов для квадрокоптера Геоскан Пионер (полный уровень сигнала).

	1 метр	5 метров	10 метров
улица, дБ	73,5	63,5	56
коридор, дБ	81	75	71,5
площадка, дБ	82	75	72,5

**Таблица 4.** Данные экспериментов для квадрокоптеров DJI Mavic Air и Геоскан Пионер мини на расстоянии 1 метр (полный уровень сигнала).

	DJIMavicAir	Геоскан Пионер мини
коридор, дБ	75	67
площадка, дБ	74	64



Фиг. 3. Схема расположения микрофонов в узком коридоре.

Основные выводы об уровне шума сводятся к следующему.

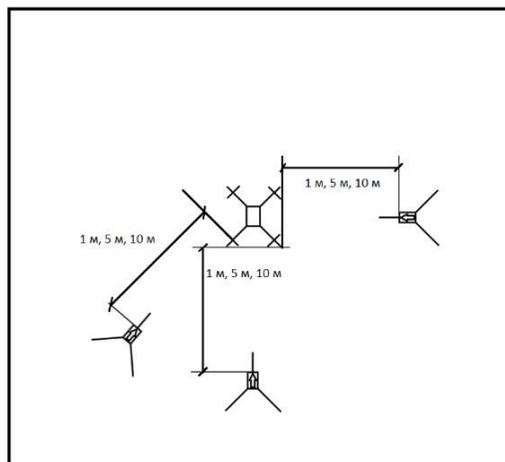
1. Результаты в неограниченном пространстве. Они приведены в первой строке таблицы 3. Теоретический расчет уровня звука, с целью сравнения с измеренными табличными данными, возможен лишь при наличии информации об уровне звука самого квадрокоптера – данные, которые не предоставляются покупателю. Однако относительные значения уровня сигнала при изменении расстояния можно оценить напрямую. При анализе табличных данных следует принимать во внимание горизонтальную поверхность земли.

Энергетическое суммирование интенсивности прямого звукового луча (траектория пролета луча 1м) и отраженного от поверхности земли (пролет луча  $\sqrt{3^2+1^2}=\sqrt{10}$ м при высоте установки источника и приемника, равной 1.5 м) дает уровень сигнала в децибелах:  $10\lg(1+1/10)=0,41$  дБ, т.к. энергия сигнала убывает как квадрат расстояния. Траектория отраженного от земли звукового луча показана на Фиг. 6.

По сравнению с этим уровнем на расстоянии приемника от источника, равном 5м, имеем длину пролета прямого луча 5м, а длину пролета отраженного от поверхности луча  $\sqrt{3^2+5^2}=\sqrt{34}$  м. При этом энергетическое суммирование дает для уровня суммарного сигнала  $10\lg(1/25+1/34)=-11,59$  дБ.

На расстоянии 10м имеем длину пролета прямого луча 10м, а длину пролета отраженного от поверхности луча  $\sqrt{3^2+10^2}=\sqrt{109}$  м. При этом энергетическое суммирование дает для уровня суммарного сигнала  $10\lg(1/100+1/109)=-17,17$  дБ.

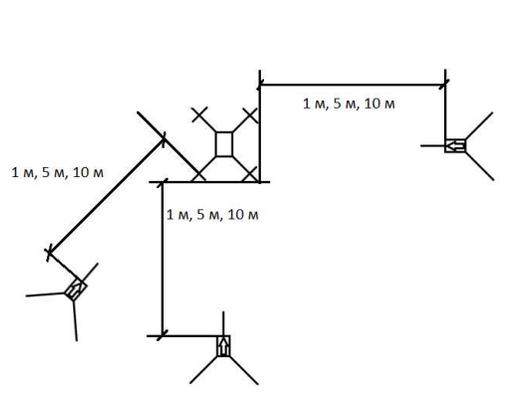
Разность первого и третьего чисел в первой строке таблицы 3 дает  $56 - 73,5 = -17,5$  дБ, что практически совпадает с разностью теоретических значений  $-17,17-0,41 = -17,58$  дБ, если учесть, что общепринятая допустимая ошибка при измерениях уровня звука равна 1 дБ. Разность первого и второго значения в первой строке таблицы 1 равна  $63,5 - 73,5 = -10$  дБ; при этом разность теоретических значений равна  $-11,59 - 0,41 = -12$  дБ. Т.е. разница между теоретическим и измеренным значением отличается на 2 дБ, что несколько превышает допустимую погрешность и может быть объяснена неровностью поверхности земли при измерениях на асфальтированной автомобильной стоянке вблизи здания Института.



Фиг. 4. Схема расположения микрофонов в широком коридоре.

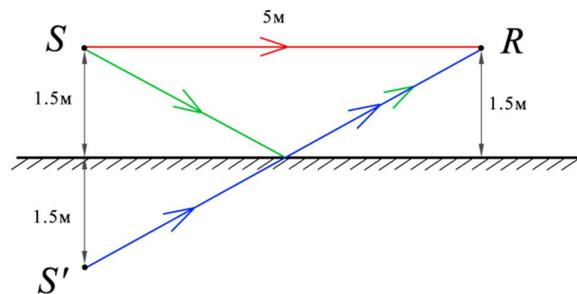
2. Результаты в замкнутом пространстве. Если бы не было стен, то сигнал незначительно нарастал бы с ростом частоты, оставаясь почти постоянным, т. к. это является общим качественным свойством шума пропеллеров. Влияние же стен состоит в том, что при кирпичной оштукатуренной и/или покрашенной стене на

данном частотном интервале коэффициент звукопоглощения монотонно возрастает с ростом частоты. Т. е. эффект стенки уменьшает сигнал с ростом частоты – по сравнению со случаем, если бы стена была идеально отражающей поверхностью.

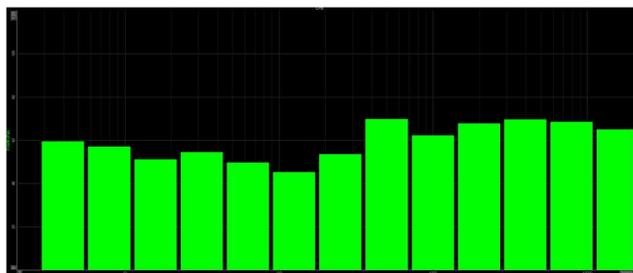


Фиг. 5. Схема расположения микрофонов на уличной площадке.

В результате взаимодействия этих двух факторов на данном частотном интервале получается, что с ростом частоты уровень сигнала сначала уменьшается, а потом нарастает, что и подтверждается гистограммами в частотном интервале от 4 до 20000 Гц, представленными на Фиг. 7 и 8.



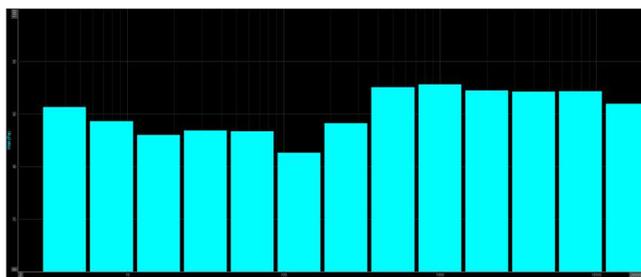
Фиг. 6. Траектория прямого и отраженного от земли звукового луча. Длина пробега отраженного луча равна длине пробега прямого распространения от мнимого источника  $S'$  до приемника  $R$ .



Фиг.7. Зависимость уровня звукового сигнала от квадрокоптера Геоскан Пионер по октавным частотам, на расстоянии 5 метров, в режиме висения между двумя стенами.

Заметим лишь, что представленные гистограммы имеют локальный максимум в окрестности средней частоты, близкой к соответствующей частоте вращения пропеллеров, что довольно естественно с физической точки зрения. В то же время доминирование основной частоты над остальными незначительно.

Заметим также, что спадание уровня сигнала в ограниченных пространствах намного слабее, чем в неограниченных, что объясняется многочисленными отражениями волн от стен, пола и потолка со звукопоглощением энергии при отражениях, и является совершенно естественным с физической точки зрения.



Фиг. 8. Уровень звукового сигнала от квадрокоптера DJI Mavic Air по октавным частотам, на расстоянии 1 метр, в режиме висения между двумя стенами.

Эти же качественные свойства должны проявляться и в условиях движения БПЛА по улицам города, с отражением звука от строений. Именно, в открытом пространстве уровень звукового давления, генерируемого квадрокоптером, практически в любой точке приема монотонно возрастает с ростом частоты. Однако в условиях городской застройки это качественное свойство существенно изменяется. Зависимость от частоты становится не монотонной, а сначала (примерно до средних частот порядка 250–500 Гц) уменьшается и только потом начинает возрастать с ростом частоты.

### Сравнение натуральных экспериментов и теоретической модели и выводы

Наконец, сравним численно теоретически полученные результаты для трёхмерного бесконечного параллелепипеда по формулам (2) – (4), с экспериментом, проведенным в узком длинном коридоре Института математики, механики и компьютерных наук ЮФУ.

Из таблицы 5 видно, что эксперимент и предложенная авторами теоретическая модель показывают очень близкие результаты – в пределах погрешности, не превышающей 1 дБ. Данное расхождение можно объяснить тем, что в аналитической модели не учитываются шероховатости поверхностей, от которых происходит переотражение акустических волн, а также особенностью аналитической модели, которая представляет граничные условия в виде стен с однородными свойствами звукопоглощения, что на практике трудноосуществимо.

**Таблица 5.** Ослабление уровня принимаемого акустического сигнала с расстоянием в трехмерном ограниченном пространстве. Сравнение эксперимента и аналитической модели.

	Натурный эксперимент	Аналитическая 3D модель
$E_1 - E_2$	6 дБ	5.6 дБ
$E_1 - E_3$	9.5 дБ	8.5 дБ

Авторы признательны Российскому Фонду Фундаментальных Исследований (РФФИ) за поддержку, грант № 19-29-06013.

Авторы также отмечают высокую эффективность исследований при использовании акустического измерительного прибора SIRIUSm-3xACC-1xACC+ и микрофонов РСВ-378В02, приобретенных Южным федеральным университетом по программе Минобрнауки РФ обновления приборной базы российских университетов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ekimov A., Estimation of UAVs detection distance using passive acoustic, 2022. DOI:10.13140/RG.2.2.13401.24164.
2. Haoqin S., Xiaoxiang B., Jianhua L., Kai L., Mengxi C., Jing S., Calculation and analysis on stealth and aerodynamic characteristics of a medium altitude long endurance UAV, Procedia Engineering, 2015, V. 99, P.111-115. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.514.
3. Bian H., Tan Q., Zhong S., Zhang X., Assessment of UAM and drone noise impact on the environment based on virtual flights, Aerospace Science and Technology, 2021, V. 118, 106996. DOI:10.1016/j.ast.2021.106996.
4. Powell A., Theory of vortex sound, Journal of the Acoustical Society of America, 1964, V. 36, No.1, P. 177–195.
5. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах, Москва: Наука, 1973.

6. Сумбатьян М.А., Скалия А. Основы теории дифракции с приложениями в механике и акустике, Москва: Физматлит, 2013.

**Сведения об авторах:**

**Сумбатьян Межлум Альбертович** – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра теоретической и компьютерной гидроаэродинамики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И.Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов н/Д, 344090, Россия, e-mail: masumbatyan@sfedu.ru, тел.: +7(928)139-70-67

**Казakov Евгений Алексеевич** – ассистент, кафедра теоретической и компьютерной гидроаэродинамики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И.Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов н/Д, 344090, Россия, e-mail: Eugene.A.Kazakov@yandex.ru, тел.: +7(918)896-44-07

**Мусатова Наталия Кристиановна** – аспирант, кафедра теоретической и компьютерной гидроаэродинамики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И.Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов н/Д, 344090, Россия, e-mail: musatova.nataliasfedu.ru@gmail.com, тел.: +7(999)698-66-97

**Самсонов Илья Константинович** – аспирант, кафедра теоретической и компьютерной гидроаэродинамики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И.Воровича, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов н/Д, 344090, Россия, e-mail: ellias.samsonov@gmail.com, тел.: +7(905)432-89-09

Поступила в редакцию 20.02.2022