

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ.  
ШУМЫ И ВИБРАЦИЯ

УДК 534.874.1

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛЕЙ  
НЕСУЩИХ ВЕРТОЛЕТНЫХ ВИНТОВ НА ОТКРЫТОМ СТЕНДЕ

© 2016 г. В. Ф. Копьев\*, \*\*, М. Ю. Зайцев\*, \*\*, Н. Н. Остриков\*, \*\*, С. Л. Денисов\*,  
С. Ю. Макашов\*, В. А. Аникин\*\*\*, В. В. Громов\*\*\*

\*ФГУП ЦАГИ, Научно-исследовательский Московский комплекс ЦАГИ  
105005 Москва, ул. Радио 17

\*\*Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
614990 Пермь, Комсомольский просп. 29

\*\*\*КБ "Камов"  
123610 Москва, Краснопресненская наб. 12

E-mail: [aeroacoustics@tsagi.ru](mailto:aeroacoustics@tsagi.ru)

Поступила в редакцию 22.12.2015 г.

Приводятся результаты экспериментальных исследований, направленных на создание методики измерения акустических характеристик моделей несущих вертолетных винтов в условиях открытого стенда. С помощью метода последовательностей максимальной длины (MLS) проводится выбор оптимального расположения микрофонов на открытом стенде, минимизирующего влияние паразитных отраженных сигналов. Представлены результаты обработки данных акустического эксперимента с модельным несущим винтом.

*Ключевые слова:* шум вертолета, шум несущего винта, M-последовательность.

DOI: 10.7868/S032079191605004X

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема снижения шума вертолета становится в настоящее время все более актуальной, т.к. имеются реальные предпосылки для обсуждения в ИКАО целесообразности дальнейшего ужесточения требований по шуму для вертолетов. Неизбежность дальнейшего ужесточения стандартов ИКАО по шуму на местности требует разработки перспективных технологий снижения шума вертолетов. Возможность оценки уровней шума вертолета на местности на этапе проектирования, а также поиск способов снижения этого шума на основе численных подходов, наталкиваются на значительные вычислительные трудности. Одной из возможностей преодоления этой проблемы является экспериментальное исследование акустических характеристик модельных вертолетных винтов, представляющих доминирующий источник шума вертолета в целом. Наилучшим местом для проведения таких испытаний являются аэродинамические трубы (АДТ) с заглушенной рабочей частью [1, 2] (например, АДТ DNW-LLF, Голландия), однако на данный момент в России нет такой установки, в которой можно было бы проводить акустические измерения шума крупномасштабных моделей винтов в заглушенных условиях.

Частично эту проблему можно решить за счет проведения акустических испытаний модельных

винтов на открытом стенде. Вместе с тем, проведение экспериментальных акустических исследований в условиях открытого стенда сопряжено с необходимостью учета влияния отражений от различных конструктивных элементов стенда (например, бетонного покрытия, стойки винтового прибора, элементов ограждения и др.), влиянием атмосферной турбулентности на уровень шума винта и т.д. В связи с этим в настоящей работе в основном рассматриваются методические вопросы по определению оптимального расположения микрофонов, которое позволило бы свести к минимуму влияние паразитных отраженных сигналов, а также представлены некоторые результаты обработки данных акустического эксперимента с модельным несущим винтом.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

*Описание экспериментального стенда для исследования шума модельного винта вертолета*

Акустические измерения шума модельного винта вертолета проводились на открытом стенде (рис. 1) с использованием специальной методики, позволяющей количественно учесть отраженный от поверхности земли и структурных элементов сигнал, а постпроцессинг включал в себя как

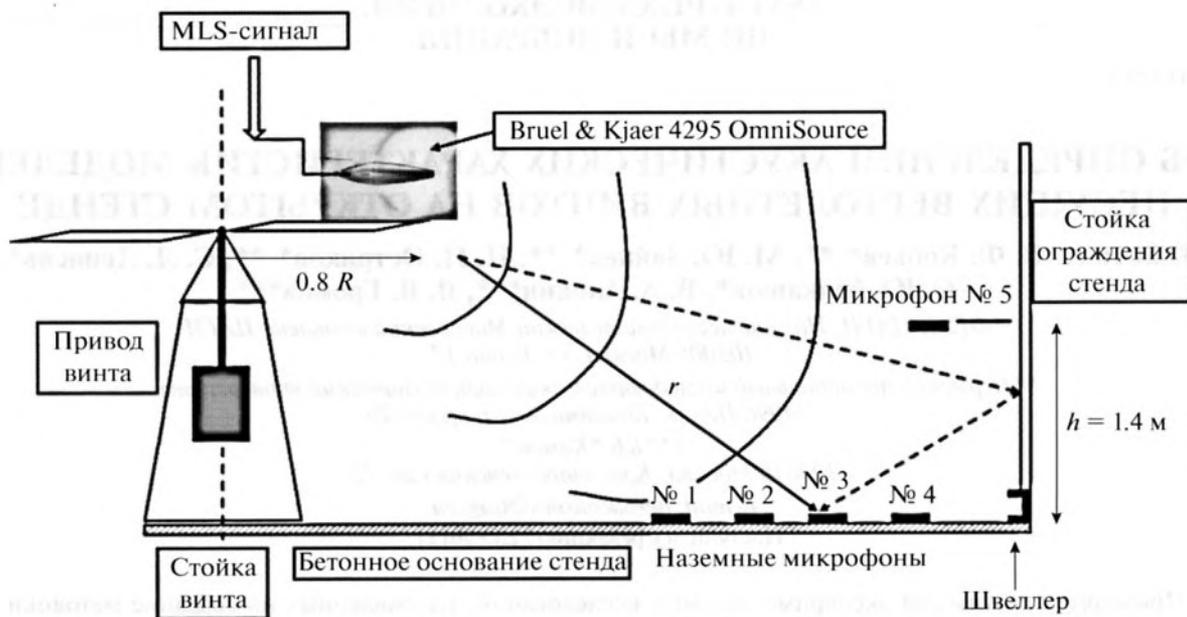


Рис. 1. Блок-схема открытого стенда для исследования шума модельного вертолетного винта на режиме висения.

использование усреднения в частотной области, так и синхронное усреднение во временной области.

Конструктивно открытый стенд представляет собой круглую площадку с бетонным покрытием. В центре площадки располагается пирамидальная стойка, на которой установлены электродвигатели, приводящие во вращение втулку, в верхней части которой устанавливаются исследуемые модели несущего винта вертолета.

По периметру стенда установлены стальные коробчатые стойки, к которым с двух сторон прикреплена металлическая сетка, предотвращающая разлет за пределы стенда лопастей в случае их разрушения при проведении испытаний. Для усиления конструкции стоек по всему периметру стенда установлены усиливающие элементы.

Для акустических измерений на открытом стенде использовались пять преполяризованных 1/4-дюймовых микрофонов с интегрированным предусилителем фирмы «Брюль и Кьер» (В&К) типа 4935 (номинальная чувствительность 5 мВ/Па, частотный диапазон 20 Гц–5 кГц), 12-канальный блок сбора данных LAN-XI 3053-B-120, калибровка проводилась с помощью пистонфона В&К тип 4228.

На предварительном этапе работ проводился выбор оптимального расположения микрофонов с точки зрения уменьшения влияния отражений от поверхности земли, структурных элементов стенда, ограждения и т.д.

Для возможности количественного учета отражения от земли при измерениях в условиях открытого стенда микрофоны № 1–№ 4 (рис. 1) располагались на бетонном основании стенда на специально изготовленных квадратных площадках из фанеры (площадь каждого фанерного ли-

ста 1 м<sup>2</sup>, толщина фанеры 20 мм). Микрофоны устанавливались заподлицо с поверхностью площадки. Такое расположение микрофонов при измерениях вблизи поверхности земли, как показано в работе [3], позволяет использовать для уровня звукового давления постоянную поправку на отражение от поверхности земли в 6 дБ в широком диапазоне частот от нескольких герц до 5 кГц. Кроме того, один из микрофонов (№ 5) устанавливался на штативе, на высоте  $h = 1.4$  м от поверхности земли для сравнения с «наземными» (см. рис. 1).

#### *Использование метода последовательности максимальной длины (MLS) для выбора оптимального расположения микрофонов*

Для выбора положения микрофонов, при котором отражение от структурных элементов стенда и ограждения сводилось бы к минимуму, использовался эталонный электроакустический источник фирмы «Брюль и Кьер» (В&К) тип 4295, располагаемый в плоскости вращения винта (рис. 1) на расстоянии  $\sim 0.8R$  от оси винта ( $R$  – радиус винта). Источник имел монополярную направленность в широком диапазоне частот и генерировал синтезированный сигнал, позволяющий с помощью специальной программы обработки для каждого положения микрофона вычислять импульсный отклик, определять источник отражений и оценивать относительный вклад отраженного сигнала в общий сигнал, измеряемый микрофоном в данной точке.

Использованная в данной работе методика MLS-анализа (MLS – Maximum Length Sequence, последовательность максимальной длины) [4, 5]

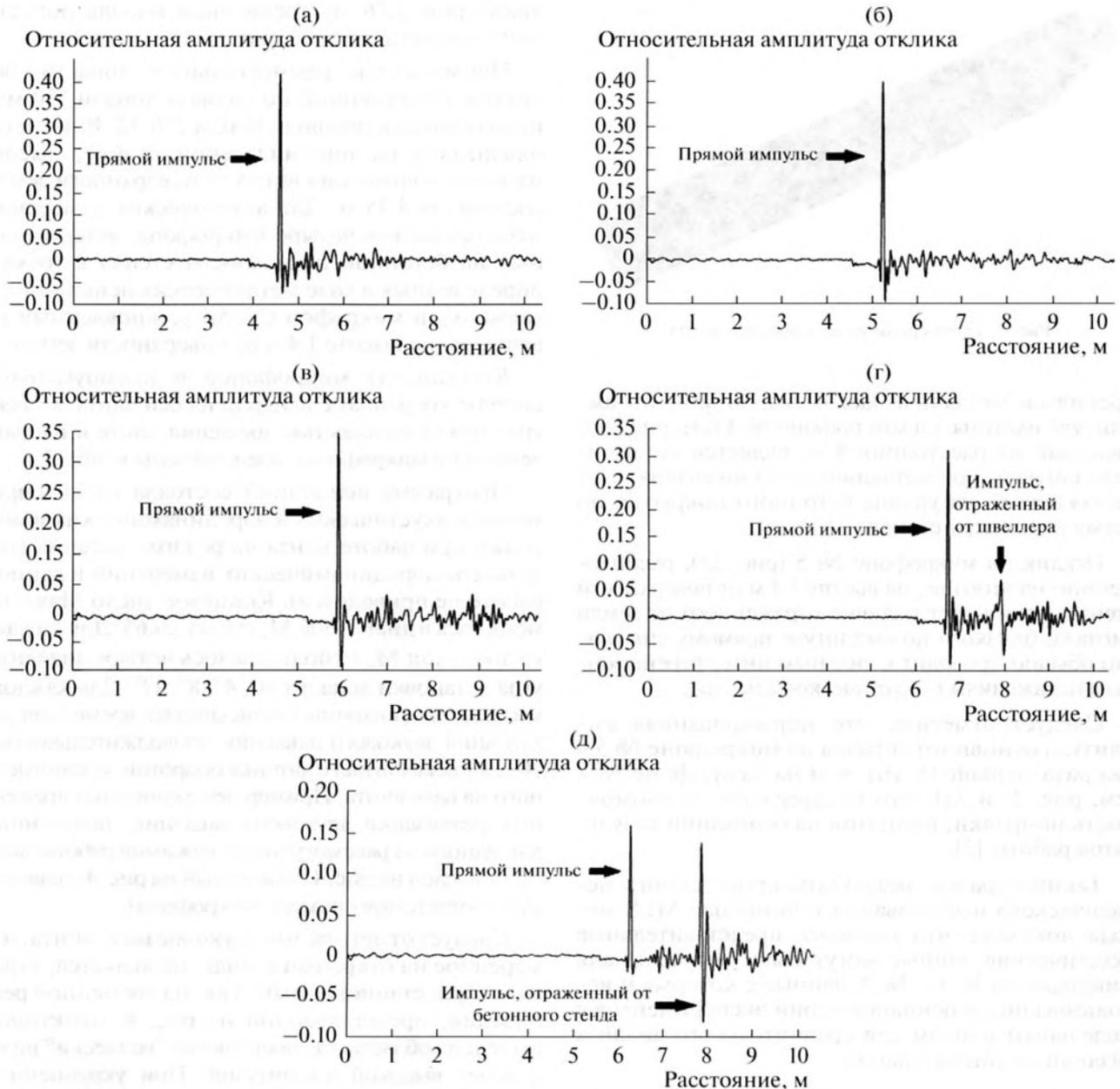


Рис. 2. Нормированный импульсный отклик (а)–(г) на микрофонах № 1–№ 4, расположенных заподлицо с поверхностью земли, и (д) на микрофоне № 5, установленном на высоте 1.5 м от поверхности стенда.

позволила определить оптимальное расположение микрофонов, которое минимизировало влияние отраженных сигналов, способных привести к значительным ошибкам в измерении.

В основе корреляционного MLS-метода лежит специально синтезированный сигнал, автокорреляционная функция которого близка к дельта-функции. Используя данный сигнал, излучаемый эталонным источником, метод двух микрофонов для измерения объемной скорости и последующий постпроцессинг, можно получить импульсный отклик системы. Данный отклик позволяет с высокой точностью определить вклад в основной

сигнал от различных рассеивающих и отражающих элементов конструкции стенда.

На рис. 2а–2д представлен нормированный импульсный отклик на микрофонах № 1–№ 5. Зависимости, приведенные на рис. 2а и 2б, демонстрируют почти полное отсутствие отражений в сигналах на микрофонах № 1, № 2, расположенных на наибольшем удалении от ограждения стенда, и небольшое отражение (~14% от амплитуды прямого сигнала) от элементов ограждения для микрофонов № 3, № 4. Эти отражения можно интерпретировать как отражения от корбчатых вертикальных опор стенда, к которым

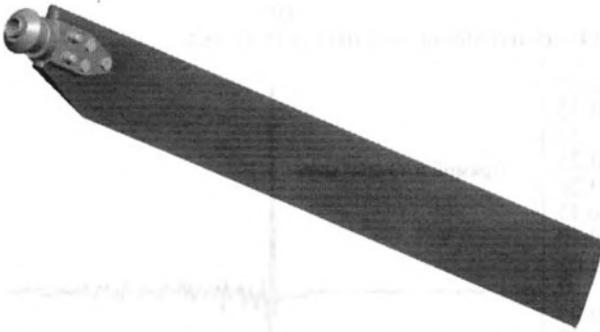


Рис. 3. Трехмерная модель лопасти винта.

крепилась металлическая сетка; второй по амплитуде импульс на микрофоне № 4 (см. рис. 2г), видимый на расстоянии 8 м, является отраженным сигналом от металлического швеллера, расположенного на уровне бетонного покрытия по всему периметру стенда.

Отклик на микрофоне № 5 (рис. 2д), расположенном на штативе, на высоте 1.4 м от поверхности стенда, показывает наличие отраженного от земли сигнала, близкого по амплитуде прямому сигналу, что обычно приводит к сильным интерференционным искажениям в акустическом спектре.

Следует отметить, что нормированная амплитуда основного сигнала на микрофоне № 5 в два раза меньше (6 дБ), чем на микрофоне № 4 (см. рис. 2г и 2д). Это подтверждает правомочность поправки, принятой на основании результатов работы [3].

Таким образом, результаты проведенного методического исследования с помощью MLS-метода показали, что наиболее представительные акустические данные могут быть получены для микрофонов № 1 и № 2, данные с которых и использовались в основной серии экспериментов с модельным винтом для сравнительного анализа различных конфигураций.

## МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ АКУСТИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

На открытом стенде исследовалась двух- и четырехлопастная модель несущего винта вертолета

Таблица 1

Координаты микрофонов	x, м	y, м	r, м	θ, град
№ 1	3.9	4.35	5.8	48
№ 2	4.9	4.35	6.5	42
№ 3	5.9	4.35	7.3	36
№ 4	6.9	4.35	8.2	32
№ 5	6.9	2.95	7.5	23

диаметром 2.76 м (трехмерная модель лопасти винта представлена на рис. 3).

Применялись прямоугольные лопасти без крутки с постоянной по размаху хордой 130 мм, использовался профиль NACA 230-12. Винт устанавливался на пирамидальной стойке, высота плоскости вращения винта от поверхности земли составляла 4.35 м. Для акустических измерений использовались четыре микрофона, установленных на бетонной поверхности стенда в точках, определенных в ходе методических испытаний, а также один микрофон (№ 5), установленный на штативе, на высоте 1.4 м от поверхности земли.

Координаты микрофонов в прямоугольной системе координат с центром на оси винта, а также угол между плоскостью вращения винта и направлением на микрофоны, представлены в табл. 1.

Программа испытаний состояла из одновременных акустических и аэродинамических измерений при работе винта на режиме висения (результаты аэродинамических измерений в данной работе не приводятся). Концевое число Маха изменялось в диапазоне  $M_k = 0.35 \dots 0.65$ . Для каждого значения  $M_k$  использовались четыре значения угла установки лопасти:  $0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$ . Для каждого микрофона синхронно записывалась временная реализация звукового давления продолжительностью 30 с, а также сигнал с датчика оборотов, установленного на валу винта. Пример неусредненных временных реализаций звукового давления, полученных для одного из рассмотренных режимов работы винта, приведен на рис. 4 (указанный на рис. 4 слева номер соответствует номеру микрофона).

Следует отметить, что звуковое поле винта, измеренное на открытом стенде, не является, строго говоря, стационарным. Так, на временной реализации, представленной на рис. 4, пунктиром выделена область, где появляются “всплески” шума с более высокой амплитудой. При укрупненном масштабе можно заметить, что всплески шума связаны с появлением во временной реализации звукового давления периодических импульсов, что говорит о возникновении нового акустического источника. В условиях открытого стенда наиболее вероятным “паразитным” источником может быть взаимодействие лопасти с набегающей атмосферной турбулентностью [6].

Сравнение спектров звукового давления для микрофона № 1 (рис. 6), построенных для участка сигнала без атмосферной турбулентности и при ее наличии, показывает сильное увеличение уровня шума в области средних и высоких частот для второго случая. При этом область низких частот, которая в основном определяется шумом стационарной аэродинамической нагрузки, не подвержена влиянию набегающей турбулентно-

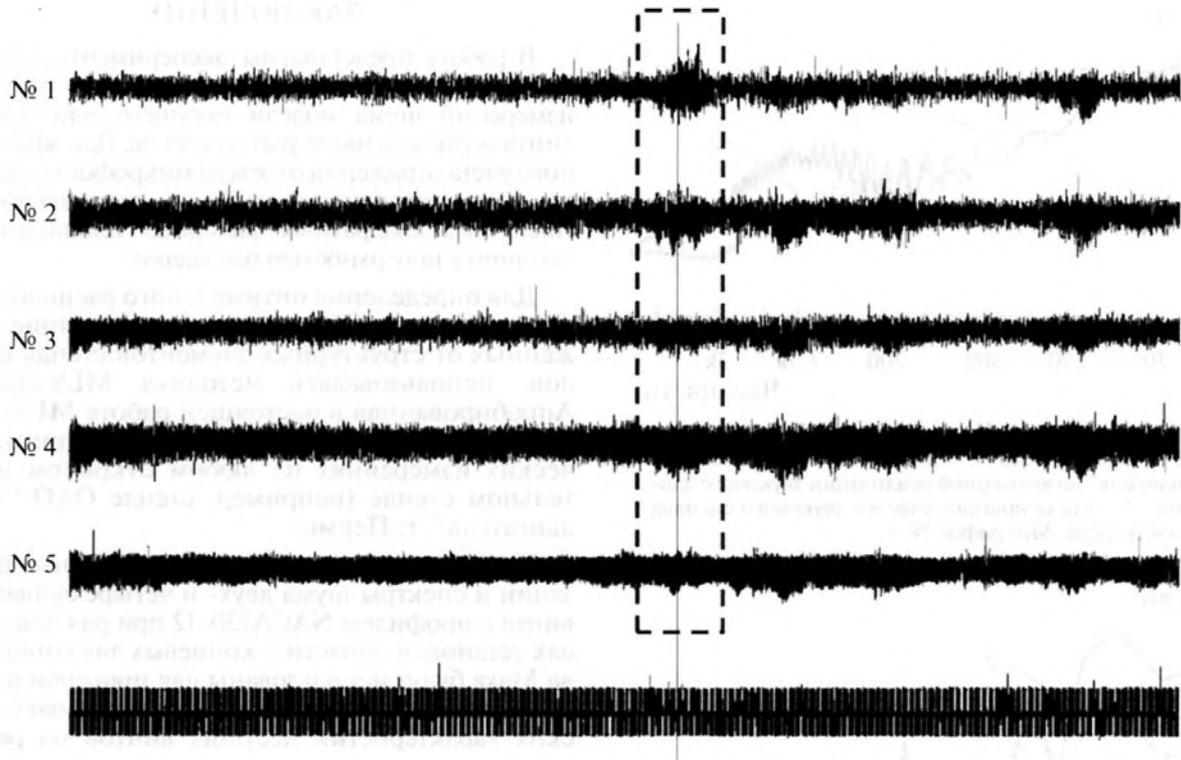


Рис. 4. Временная реализация звукового давления, синхронно записанная для пяти микрофонов и датчика оборотов (четырёхлопастной винт, угол установки  $8^\circ$ ,  $M_k = 0.65$ ).

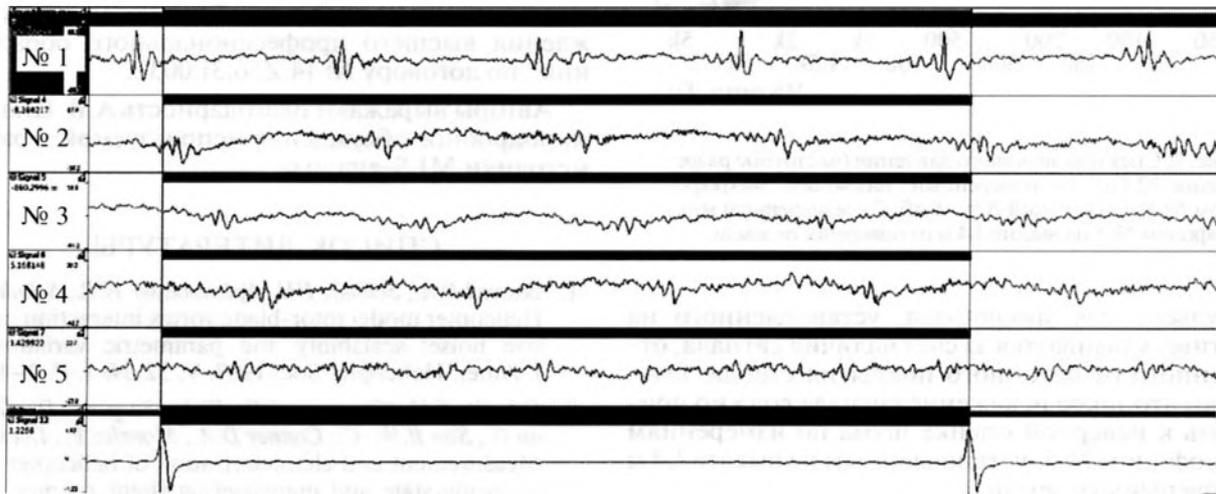


Рис. 5. Растянутый по времени вид области “всплесков” звукового давления, демонстрирующий появление звуковых импульсов (выделенный временной интервал соответствует одному обороту вала винта).

сти. Этот пример показывает, что для получения на открытом стенде представительных результатов по измерениям таких составляющих шума вертолетного винта, как шум аэродинамической нагрузки и шум вытеснения, необходимо проведение предварительного редактирования временных реализаций звукового давления, измеренных микрофонами, с целью как выявления посторонних шумов (прослушивание микрофонной записи), так и

исключения источников шума (взаимодействие лопасти и турбулентности), не связанных напрямую с основными компонентами шума винта.

Следует также отметить, что сигнал, записанный микрофоном на штативе (сигнал № 5 на рис. 5), существенно отличается от сигналов на “наземных” микрофонах № 1–№ 4. Если частота импульсов на “наземных” микрофонах равна частоте следования лопастей, то количество звуковых

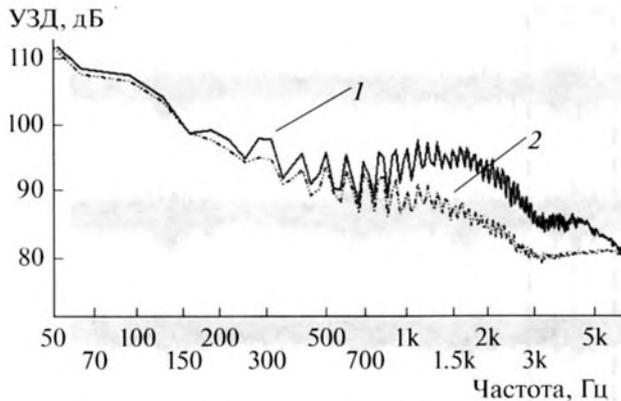


Рис. 6. Спектр звукового давления: 1 – для области “всплесков” во временной реализации звукового давления, 2 – для основного участка звукового сигнала без импульсов. Микрофон № 1.

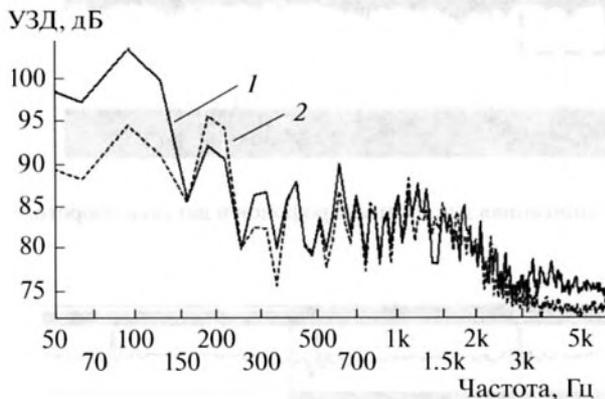


Рис. 7. Спектры звукового давления (частотное разрешение 32 Гц): 1 – измеренный “наземным” микрофоном № 4, с поправкой  $\Delta = -6$  дБ, 2 – измеренный микрофоном № 5 на высоте 1.4 м от поверхности земли.

импульсов для микрофона, установленного на штативе, удваивается за счет наличия сигнала, отраженного от бетонного покрытия стенда. Очевидно, что такое искажение сигнала должно приводить к неверной оценке шума по измерениям микрофоном № 5, установленным на высоте 1.4 м от поверхности земли.

Сравнение спектров шума модельного винта, представленное на рис. 7, показывает, что интерференция прямого и отраженного от земли сигнала на микрофоне № 5 существенно искажает уровни шума первых трех гармоник частоты следования лопастей (100, 200, 300 Гц) и занижает амплитуду звука в области высоких частот (свыше 3 кГц). Такое искажение особенно критично для низких частот, т.к. суммарный уровень шума для рассмотренного режима работы винта (четырёхлопастной винт, угол установки  $8^\circ$ ,  $M_k = 0.65$ ) в основном определяется амплитудой низших гармоник частоты следования лопастей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены экспериментальные результаты, необходимые для разработки методики измерений шума модели несущего или рулевого винта вертолета на открытом стенде. Для эффективного учета отражения от земли микрофоны располагались на поверхности земли, на специально изготовленных квадратных фанерных площадках, заподлицо с поверхностью площадки.

Для определения оптимального расположения микрофонов, минимизирующего влияние отраженных от структурных элементов стенда сигналов, использовалась методика MLS-анализа. Апробированная в настоящей работе MLS-методика может быть использована также при акустических измерениях на любом открытом двигательном стенде (например, стенде ОАО “Авиадвигатель”, г. Пермь).

Полученные в эксперименте временные реализации и спектры шума двух- и четырехлопастного винта с профилем NACA230-12 при различных углах установки лопасти и концевых значениях числа Маха будут использованы для проверки результатов численного моделирования аэроакустических характеристик несущих винтов на режиме висения.

Работа частично выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства РФ по постановлению № 220 “О мерах по привлечению ведущих ученых в российские образовательные учреждения высшего профессионального образования” по договору № 14.Z50.31.0032.

Авторы выражают благодарность А.В. Шанину за подробное обсуждение используемой в работе методики MLS-анализа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boxwell D.A., Schmitz F.H., Spletstoesser W.R., Schultz K.J. Helicopter model rotor-blade vortex interaction impulsive noise: scalability and parametric variations // J. Amer. Helicopter Soc. 1987. V. 32. № 1. P. 3–12.
2. Schmitz F.H., Greenwood E., Sickenberger R.D., Gopalan G., Sim B.W.-C., Conner D.A., Moralez E., Decker W. Measurement and characterization of helicopter noise in steady-state and maneuvering flight / Amer. Helicopter Soc. 63rd Annual Forum (Virginia Beach, VA), May 2007.
3. Willshire W.L., Jr., Nystrom P.A. Investigation of effects of microphone position and orientation on near-ground noise measurements // NASA TP 2004, 1982.
4. Шанин А.В., Валяев В.Ю. Метод последовательностей максимальной длины в акустическом эксперименте // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 3. С. 420–425.
5. Валяев В.Ю., Шанин А.В. Экспериментальная оценка параметров пористого дорожного покрытия // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 6. С. 776–784.
6. Schmitz F.H. Rotor noise / In “Aeroacoustics of flight vehicles”. Ed. by Hubbard H.H. 1995. P. 65–150.