

ISSN 2412-8627

Vol. 9 No. 1

12+

Noise

Theory and Practice

Scientific Journal



Изображение от 4045 на Freepik

I
2023

Acoustic Design Institute

Редакционная коллегия

Главный редактор

Иванов Николай Игоревич



Доктор технических наук, профессор кафедры "Экология и производственная безопасность" Балтийского государственного технического университета "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова, заслуженный деятель науки РФ (г. Санкт-Петербург, РФ)

Члены редакционной коллегии

Шашурин Александр Евгеньевич



Доктор технических наук, декан факультета "Е" Оружие и системы вооружения, профессор, заведующий кафедрой "Экология и производственная безопасность" Балтийского государственного технического университета "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова (г. Санкт-Петербург, РФ)

Заплетников Игорь Николаевич



Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой оборудования пищевых производств Донецкого национального университета экономики и торговли имени Михаила Туган-Барананского (г. Донецк, Украина)

Элеонора Карлетти



Директор Института сельскохозяйственной и землеройнотранспортных машин (IMAMOTER-CNR) и руководитель исследовательской группы IMAMOTER, работающей в предметной области акустики и вибрации (г. Феррара, Италия)

Серджио Луцци



Профессор и лектор в Университете Флоренции. Руководитель Курса "Акустика и контроль транспортного шума" в UNISER в Италии г.Пистойя (г. Флоренция, Италия)

Тюрин Александр Павлович



Доктор технических наук, профессор кафедры "Техносферная безопасность", зам. начальника Управления научно-исследовательских работ ФГБОУ ВПО "ИжГТУ имени М.Т. Калашникова" (г. Ижевск, РФ)

Васильев Андрей Витальевич



Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Химическая технология и промышленная экология" Самарского государственного технического университета, почетный работник высшего профессионального образования РФ (г. Самара, РФ)

Тупов Владимир Борисович



Доктор технических наук, профессор кафедры "Тепловые электрические станции" Национального исследовательского университета "Московский энергетический институт" (г. Москва, РФ)

Цукерников Илья Евсеевич



Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института строительной физики, профессор Московского государственного университета печати имени Ивана Федорова (г. Москва, РФ)

Буторина Марина Вадимовна



Кандидат технических наук, доцент кафедры «Экология и производственная безопасность» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (г. Санкт-Петербург, РФ)

Тюрина Наталья Васильевна



Доктор технических наук, руководитель службы главного инженера ЗАО "Институт "Трансэкопроект" (г. Санкт-Петербург, РФ)

Рассошенко Юлия Сергеевна



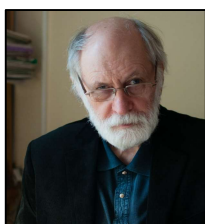
Кандидат технических наук, доцент кафедры "Экология и производственная безопасность" Балтийского государственного технического университета "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова (г. Санкт-Петербург, РФ)

Дэвид Копли



Сертифицированный член совета Института технологий по контролю за шумом, член совета Института технологий по контролю за шумом, руководитель группы инженеров по борьбе с шумом в техническом центре Caterpillar (г. Пеория, США)

Емельянов Владислав Николаевич



Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Плазмогазодинамика и теплотехника» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (г. Санкт-Петербург, РФ)

Элькин Юрий Иосифович



Доктор технических наук, профессор кафедры «Техносферная безопасность» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (г. Москва, РФ)

Editor-in-chief

Nickolay Ivanov



Doctor of Engineering Science, Professor of the Department of Ecology and Industrial Safety of the Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov, Honored Scientist of the Russian Federation (St. Petersburg, Russia)

Members of the Editorial Board

Aleksandr Shashurin



Doctor of Engineering Science, Dean of the E faculty 'Weapons and weapons systems', Professor, Head of the Department of Ecology and Industrial Safety, Leading Researcher of the Scientific Research Unit of the Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov (St. Petersburg, Russia)

Igor Zapletnikov



Doctor of Engineering Science, Professor, Head of Department of Food production equipment of the Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky (Donetsk, Ukraine)

Eleonora Carletti



Director of the Institute of Agricultural and Earth-Moving Machinery (IMAMOTER-CNR) and leader of the IMAMOTER Research Group working in the Acoustics and Vibration subject area (Ferrara, Italy)

Sergio Luzzi



Contract Professor and Lecturer at the University of Florence. Honorary Visiting Professor at USURT University of Ekaterinburg. Visiting Lecturer at the School of Architecture of the Royal College of Art in London (Florence, Italy)

Alexander Tyurin



Doctor of Engineering Science, Professor of Technosphere Safety Department, Deputy Head of Research and Development Office of the FSBEI HPO 'Izhevsk State Technical University' named after M.T.Kalashnikov (Izhevsk, Russia)

Andrey Vasilyev



Doctor of Engineering Science, Professor, Head of Chemical technology and industrial ecology chair of the Samara State Technical University, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, honored ecologist of the Samara region (Samara, Russia)

Vladimir Tupov



Doctor of Engineering science, Professor of the 'Thermal power plants' Department of the National Research University 'Moscow Power Engineering Institute' (MPEI) (Moscow, Russia)

Ilya Tsukernikov



Doctor of Engineering Science, Professor, Chief Researcher at the Research Institute of Construction Physics, Professor of the Moscow State University of Printing Arts named after Ivan Fyodorov (Moscow, Russia)

Marina Butorina



Ph.D. of Engineering Science, Assistant Professor of the Department of Ecology and Industrial Safety of the Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov (St. Petersburg, Russia)

Natalya Tyurina



Doctor of Engineering Science, Head of the Chief Engineer's office of JSC 'Institute 'Transekoproekt' (St. Petersburg, Russia)

Iuliia Rassoshenko



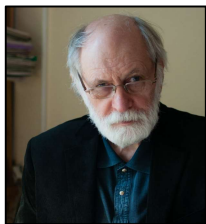
Ph.D. of Engineering Science, Senior Researcher of the Scientific Research Unit, Assistant Professor of the Department of Ecology and Industrial Safety of the Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov (St. Petersburg, Russia)

David Copley



Board-Certified member of the Institute of Noise Control Engineering, member of the Society of Automotive Engineers Acoustical Materials committee, a team leader in a group of noise control engineers at Caterpillar's Technical Center (Peoria IL, USA)

Vladislav Emelyanov



Doctor of Engineering Science, Professor, Head of Plasma Gas Dynamics and Thermal Engineering Department of the Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov (St. Petersburg, Russia)

Yuri Elkin



Doctor of Engineering Science, Professor of the Department of Technosphere Safety, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), (Moscow, Russia)

Научный журнал

Том 9 №1

Учредитель

Общество с ограниченной ответственностью
"Институт акустических конструкций" (ООО "ИАК")
при БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова

Сетевой Научный Журнал 'Noise Theory and Practice'

выпускается с 2015 г.

Основателем Журнала является
д.т.н., профессор кафедры
"Экология и производственная
безопасность "

Балтийского государственного
технического университета
"ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова
основатель транспортной
акустики в России -
Иванов Николай Игоревич.

"Noise Theory and Practice"
посвящен фундаментальным
проблемам в области
вибраакустики и принимает
работы по направлениям:
- 29.00.00 Физика
- 29.37.00 Акустика
- 43.00.00 Общие и комплексные
проблемы естественных и
точных наук
- 87.00.00 Охрана окружающей
среды. Экология человека

Все статьи, поступающие в
редакцию, проходят
обязательное рецензирование.
Журнал является открытым
сетевым ресурсом и издается
с периодичностью четыре раза
в год.

Фактический адрес редакции

Россия, г. Санкт-Петербург,
Наб. Обводного канала, д. 138, к 7,
Литера А, пом. 11-Н, офис 2-2А
+7 (812) 495-77-97
www.noisetp.com
e-mail: secretary@noisetp.com
Ответственный секретарь
Храпко Н. Н.

Зарегистрировано в Федеральной
службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий
и массовых коммуникаций
Свидетельство
ЭЛ № ФС 77-74057

Содержание

- Тюрин А.П.** РУС
К вопросу исследования эффективности средств индивидуальной защиты рук от вибрации и его техническая реализация
стр. 7-16
- Тараторин А.А., Павлов Д.А.** РУС
Моделирование снижения шума на поворотах энергетических газовоздухопроводов
стр. 17-28
- Зинкин В.Н., Драган С.П., Сливина Л.П., Дроздов С.В., Харитонов В.В.** РУС
Обоснование рекомендаций по определению границы санитарно-защитной зоны приаэродромной территории аэродромов государственной авиации
стр. 29-49
- Кирпичников В.Ю., Кощев А.П., Кудаев А.В.** РУС
Экспериментальные исследования эффективности полосового вибропоглотителя с одноточечным креплением
стр. 50-57
- Мошков П.А.** РУС
Основные подходы к экспериментальным исследованиям шума винтовых летательных аппаратов самолетного типа. Обзор
стр. 58-76
- Зинкин В.Н., Драган С.П., Дроздов С.В., Харитонов В.В.** РУС
Вертолетный шум и его особенности: механизмы образования, последовательность обработки акустических сигналов, гигиеническая оценка и защита
стр. 77-91
- Мошков П.А.** РУС
Об экранировании шума винтомоторных силовых установок элементами планера
стр. 92-101

**The Online Scientific Journal
'Noise Theory and Practice'**

has been published since 2015. The founder of the journal is Nikolay Igorevich Ivanov, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the department of Ecology and Industrial Safety of the Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D. F. Ustinov, the founder of the transport acoustics in Russia.

'Noise Theory and Practice' is devoted to the fundamental problems in the field of vibroacoustics and accepts papers in the following areas:
- 29.00.00 Physics
- 29.37.00 Acoustics
- 43.00.00 General and complex issues of natural and exact sciences
- 87.00.00 Environmental protection. Human ecology.

All articles submitted to the editorial office are subject to mandatory review. The journal is an open network resource and published four times a year.

Location address of the Editorial office

Bldg. 7'A', 138 Obvodny Canal emb., office 11-N, room 2-2
+7 (812) 495-77-97
www.noisetp.com
e-mail: secretary@noisetp.com
Executive Secretary
Khrapko Natalya

Journal is registered in Federal service for supervision of communications, information technology, and mass media
The certificate of registration
ЭЛ № ФС 77-74057

Contents

Tyurin A.P.	RUS
On the issue of researching the effectiveness of anti-vibration gloves from vibration and its technical implementation pp. 7-16	
Taratorin A.A., Pavlov D.A.	RUS
Modelling of noise reduction at bends of energy gas and air ducts pp. 17-28	
Zinkin V.N., Dragan S.P., Slivina L.P., Drozdov S.V., Kharitonov V.V.	RUS
Substantiation of recommendations for determining the boundar of sanitary protection zone of the aerodrome territory of airfields of state aviation pp. 29-49	
Kirpichnikov V.Yu., Koshcheev A.P., Kudaev A.V.	RUS
Experimental studies of the effectiveness of a strip vibration absorber with a single-point fastening pp. 50-57	
Moshkov P.A.	RUS
The main approaches to experimental studies of the noise of propeller-driven fixed-wing aircraft. Review pp. 58-76	
Zinkin V.N., Dragan S.P., Drozdov S.V., Kharitonov V.V.	RUS
Helicopter noise and its features: mechanisms of formation, sequence of acoustic signal processing, hygienic assessment and protection pp. 77-91	
Moshkov P.A.	RUS
About noise shielding of propeller-driven power plants by airframe elements pp. 92-101	

УДК: 87.55.31

OECD: 1.03, 2.05

К вопросу исследования эффективности средств индивидуальной защиты рук от вибрации и его техническая реализация

Тюрин А.П.

Д.т.н., профессор кафедры «Техносферная безопасность»,
ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», г. Ижевск, РФ

Аннотация

Статья посвящена краткому обзору исследований в области оценки эффективности средств индивидуальной защиты от вибрации с помощью вибрационных стенов. При проектировании таких средств защиты становится важным учитывать особенности использования тех или иных видов материалов для подавления вибрации, передающейся на руки. В исследованиях последних лет подтверждается, что не всегда толщина материала с достаточной степенью эффективности подавляет вибрацию, кроме того, для разных частей руки характерны различные степени снижения виброскорости. Для понимания принципов подавления вибрации, передающейся на руки, использование профессиональных систем не всегда оправдано материальными средствами. В этой связи разработка работающих моделей лабораторных стенов имеет положительное значение. В работе показано, что с помощью доступных измерительных средств с общей погрешностью не более 10% и бытовых инструментов, генерирующих вибрацию, возможно оценивать эффективность не только материалов, но с СИЗ рук в целом. Использование измерительных техник и методик измерения должно удовлетворять положениям стандартов с точки зрения точности и воспроизводимости измерений.

Ключевые слова: средства индивидуальной защиты от вибрации, эффективность, исследования, исследования на стендах.

On the issue of researching the effectiveness of anti-vibration gloves from vibration and its technical implementation

Tyurin A.P.

Doctor of technical Sciences, Professor of the Technosphere Security Department,
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Abstract

The article is devoted to a brief review of research in the field of evaluating the effectiveness of personal protective equipment against vibration using vibration stands. When designing such protective equipment, it becomes important to take into account the peculiarities of using certain types of materials to suppress vibration transmitted to the hands. In recent studies, it is confirmed that the thickness of the material does not always suppress vibration with a sufficient degree of efficiency, in addition, different parts of the hand are characterized by different degrees of vibration velocity reduction. To understand the principles of vibration suppression transmitted to the hands, the use of professional systems is not always justified by material means. In this regard, the development of working models of laboratory stands is of positive importance. The paper shows that with the help of available measuring instruments with a total error of no more than 10% and household tools that generate vibration, it is possible to evaluate the effectiveness of not only materials, but with hand PPE

in general. The use of measurement techniques and measurement procedures must comply with the provisions of the standards in terms of measurement accuracy and reproducibility.

Keywords: *antivibration gloves, efficiency, research, research on stands.*

Введение

Одна из актуальных проблем современного промышленного производства – борьба с вибрацией на рабочем месте. Технические средства борьбы с вибрацией разрабатываются в таких основных направлениях как ослабление вибрации на путях передачи, устранение причин вибрации или непосредственная защита человека-оператора, испытывающего действие вибрации с помощью средств индивидуальной защиты. Для научного обоснования их разработки и совершенствования необходим спектральный анализ вибрационных процессов источников. В настоящее время появляется достаточно много виброметров, как правило, анализаторов, которые, в отличие от прежних своих моделей, отличаются наличием функций цифровой обработки сигналов с последующим выводом получаемого спектра в амплитудно-частотной или амплитудно-временной зависимости на жидкокристаллический дисплей прибора или монитор компьютера. Примерами являются продукция таких фирм, как «Брюль и Кьер» (Дания), «Алгоритм-Акустика» (г. С-Петербург), НПП «Мера» (г. Москва) и ряд других. Однако измерительные системы для оценки средств индивидуальной защиты рук от вибрации имеют свои особенности, так как они должны обеспечивать генерацию вибрации на обхватываемой рукояти. В связи с высокой стоимостью профессиональных измерительных систем существует потребность в разработке лабораторных моделей, на которых можно изучать ключевые особенности спектров вибрации и шума и принципиальные подходы к их обработке.

1. Обзор исследований, посвященных оценке эффективности средств индивидуальной защиты рук от вибрации

Научные исследования вибраций при передаче их через средства индивидуальной защиты распространены преимущественно среди зарубежных ученых [1–6], в том числе такие исследования носят и медицинский характер [7]. Использование профессиональных систем не всегда оправдано материальными средствами. Между тем, физическая модель позволяет проверить адекватность аналитических зависимостей, описывающих реальный исследуемый объект.

Среди научных источников, посвященных созданию оборудования типа вибрационных стендов, встречается достаточное количество патентов [8-9]. Запатентован уникальный способ измерения вибрации, передаваемой от электроинструмента при техническом обслуживании оборудования на орбите [11]. Заявленные технические решения преимущественно используются в исследованиях влияния жесткости систем плоскостного типа на характер вибрации в условиях внешних вибрационных воздействий. Источник вибрации, как правило, может быть различным и выбирается, исходя из особенностей конструкции и целей исследования. Так, в [8] вибрационный режим испытываемой пластины обеспечивается с помощью генератора низких частот и электромагнита, создающего электромагнитное поле. Необходимый контроль вибрации испытываемых пластин осуществляется виброизмерительным прибором через закрепленный на изделии вибродатчик. Затем результаты исследований влияния жесткости системы плоскостного типа на характер вибрации в условиях лабораторного процесса уточняются

за счет обеспечения защиты внешнего лабораторного оборудования от вибраций, создаваемых вибростендом, и защиты вибростенда от внешних вибраций, создаваемых другим лабораторным оборудованием [8].

В исследованиях, имеющих научно-практическую направленность и касающихся оценки эффективности средств защиты рук, авторы проводят испытания имеющихся на рынке антивибрационных перчаток в количестве 17-ти видов в соответствии с методикой, утвержденной в стандарте EN ISO 10819:2013. Основная цель подобных исследований заключалась в проверке данных, предоставленных производителями в спецификациях средств индивидуальной защиты рук и руководствах пользователя. Так на основании измеренных значений коэффициентов передачи вибрации установлено, что, несмотря на наличие сертификатов на все испытанные средства индивидуальной защиты рук, шесть типов из них не соответствуют минимальным требованиям, предъявляемым к антивибрационным перчаткам, а два типа соответствуют указанным свойствам на грани удовлетворения этих требований. Два типа перчаток (несмотря на наличие сертификата) не продемонстрировали существенного демпфирования вибрации во всем испытанном диапазоне частот. В связи с этим, авторы источника [2] утверждают, что полученные результаты испытаний свидетельствуют о необходимости проверки антивибрационных свойств имеющихся сертифицированных перчаток у неподтвержденных поставщиков. Подобные виды исследований характерны для зарубежных ученых. Выполнение подобных исследований открывает необходимость оценки эффективности защиты антивибрационных перчаток в условиях их фактического использования.

Использование средств индивидуальной защиты рук снижает риск возникновения профессиональных заболеваний, возникающий в связи с передачей вибрации на руки работника. Для принятия обоснованного решения о любом типе средств индивидуальной защиты необходимо иметь данные о характеристиках, позволяющие оценить степень их защиты. Сведения по степени вибрационной защиты, предоставляемые из сертификатов конкретной антивибрационной перчатки, следует понимать с учетом некоторых базовых знаний о том, как тестируются перчатки. Факторы, влияющие на потенциальную эффективность антивибрационных перчаток, включают в себя особенности, связанные с воздействием вибрации на руку, условия внешней среды во время испытания перчаток, диапазон частот и направление вибрации, от которой требуется защита, величина усилия, создаваемое хватом руки, а также физические ограничения, связанные с материалом и конструкцией перчаток [12]. Зачастую принятые гипотезы об эффективности снижения вибрации материалом могут отличаться от выводов, полученных в эксперименте.

Так, можно предположить, что увеличение толщины перчатки уменьшит вибрацию, передаваемую на руку. В исследовании [13] три образца материала антивибрационной перчатки соединялись в трехслойную конструкцию, обеспечивая при этом три различные толщины: 6,4, 12,8 и 19,2 мм. Были измерены динамическая жесткость всех трех толщин, действующая масса на ладони и пальце и передача вибрации на ладонь и палец. Показано, что на частотах от 20 до 350 Гц материал уменьшал вибрацию на ладони, но увеличивал вибрацию на пальце. В свою очередь, увеличение толщины защитного материала уменьшает вибрацию на ладони, но увеличивает вибрацию на пальце. Было показано, что уменьшение динамической жесткости материала перчаток может увеличить или уменьшить передачу вибрации в зависимости от материала, частоты вибрации и точки измерения (ладонь или палец) [13].

В конечном счете, нельзя полагаться на то, что антивибрационные перчатки обеспечивают достаточную и постоянную защиту пользователя, и прежде чем рассматривать возможность их использования, следует сначала оценить возможность применения других доступных средств уменьшения вибрации.

В некоторых случаях степень снижения вибрации средствами индивидуальной защиты рук может требовать специальных испытаний для подтверждения эффективности защиты пальцев при передаче вибрации на руки от машин и ручных инструментов. Ослабление вибрации, передаваемой на пальцы, может стать причиной специальных исследований, проводимых, в том числе, для улучшения понимания механизмов работы таких перчаток. Так, в эксперименте [14] приняли участие семь взрослых мужчин. Выбранные для оценки факторы включали величину усилия охвата руки (четыре уровня), конструктивные особенности перчаток (наличие камеры с гелем или воздушной полости без геля) и позиция измерения вибрации, передаваемая на пальцы. В контрольном случае проводили замеры вибрации, передаваемую на руки, без использования перчаток. Для измерений вибраций на пальцах и ладони использовалась комплексная система, основу которой представлял трехмерный лазерный виброметр. Подобные виды специальных исследований подтверждают особенности снижения вибрации при использовании перчаток в зависимости от распределения жесткости контакта с пальцами и усилием захвата. Неожиданные выводы свидетельствуют о том, что перчатки могут как увеличивать вибрацию, так и снижать ее в зависимости от частотного диапазона: в среднем перчатки снижают вибрацию всех пальцев менее чем на 3% при частотах ниже 80 Гц, но увеличивают при частотах от 80 до 400 Гц. На более высоких частотах перчатка с гелевым наполнителем более эффективно снижает вибрацию пальцев, чем перчатка с воздушной камерой [14]. Результаты таких исследований, несомненно, представляют научную ценность с практической точки зрения.

2. Практическая реализация измерительного комплекса

Для решения простых задач оценки эффективности средств индивидуальной защиты от вибрации на этапе создания прототипов допустимо создавать комплекс лабораторного оборудования, имеющих черты профессиональных систем. Наиболее простой и достаточно информативный способ может быть реализован с применением шумомера-виброметра ВШВ-003-М2 в совокупности с цифровым осциллографом, имеющим функцию цифровой обработки сигналов. Примером простейшего из них может являться двухканальный цифровой осциллограф. Реализация такой измерительной схемы проиллюстрирована на рис. 1. Ключевые узлы программно-аппаратного комплекса представляют собой:

- 1) источник вибрации – бытовая электродрель модели «Skill» (мощность 500 Вт);
- 2) устройство для измерения вибрации – измеритель шума и вибрации ВШВ-003-М2;
- 3) устройство для цифровой обработки сигналов – цифровой запоминающий осциллограф «Актаком» АСК-3106 РО;
- 4) устройство для чтения и обработки данных, например, компьютер.

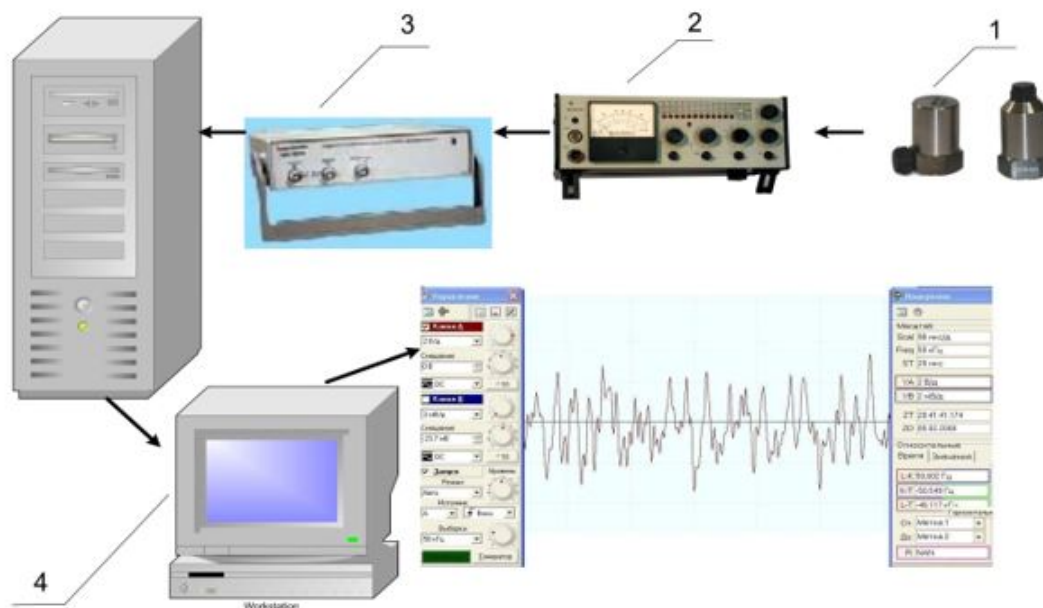


Рис. 1. Схема лабораторной модели измерительного комплекса вибрации:

- 1 - вибропреобразователи ДН-3-М1; 2 – измерительное устройство;
3 – цифровой осциллограф; 4 – персональный компьютер для обработки данных

Конечно, шумомер-виброметр ВШВ-003-М2, используемый в измерительном комплексе, является устаревшим прибором, однако его функциональные возможности вполне могут быть использованы для решения простейших поставленных задач, в особенности для образовательных целей. Сам прибор относится к шумомерам I класса точности [15] и имеет BNC-разъем. Данный тип разъема (Bayonet Neill-Concelman) представляет собой общий тип RF-разъема, активно используемых в радио-видео аппаратуре, в которой сигнал передается по радиочастотному кабелю. Для такого вида разъема существуют ограничения по частоте и напряжению, например, максимально допустимая частота составляет 3 ГГц, а напряжение должно быть не более 500 В. В указанном шумоизмерительном приборе частотные характеристики уровней звука по шкалам коррекции А, В или С в диапазоне частот 2 Гц – 18 кГц измеряются с достаточной точностью. Кроме того измеряются квадратические значения виброускорения и виброскорости. Съём информации о вибрации осуществляется специальным преобразователем модели ДН-3-М1 или ДН-4-М1.

Ключевые функциональные узлы измерителя шума и вибрации:

- 1) вибропреобразователь ДН-3-М1(или ДН-4-М1);
- 2) предусилитель ВПМ-101 (для согласования высокоомного сопротивления капсуля с входным сопротивлением измерительного прибора);
- 3) усилитель;
- 4) октавный фильтр;
- 5) устройство индикации;
- 6) преобразователь напряжения;
- 7) источник питания (или батареи).

Устройство и принцип работы преобразователя ДН-3-М1 делает его пригодным для снятия спектров вибрации в точке измерения вибрирующей поверхности.

Результаты исследований

Представленная на рис. 1 схема измерительного комплекса вполне работоспособна, и реализация экспериментов на нем в первом приближении позволяет получить общее представление о вибрационных спектрах и анализировать особенности их обработки.

Результаты исследований, получаемые при обработке вибрационных спектров на сконструированном оборудовании, имеют количественную и качественную интерпретации.

В тестовой задаче измерение вибрации, воздействующей на оператора, проводилось при выполнении простейшей технологической операции – сверление отверстия электродрелью в режиме дробления. Вибропреобразователь устанавливался в месте контакта работающего с электродрелью.

Для иллюстрации на рис. 2 представлен спектр вибрации, излучаемой электродрелью «Skill» в режиме дробления, сигнал которой снят через цифровой осциллограф. На рис. 3 продемонстрирован амплитудно-временной спектр вибрации электродрели на октавной полосе со среднегеометрической частотой 16 Гц, возбуждаемый работающей электродрелью в точке контакте рукоятки с ладонью без использования виброзащитной подкладки.

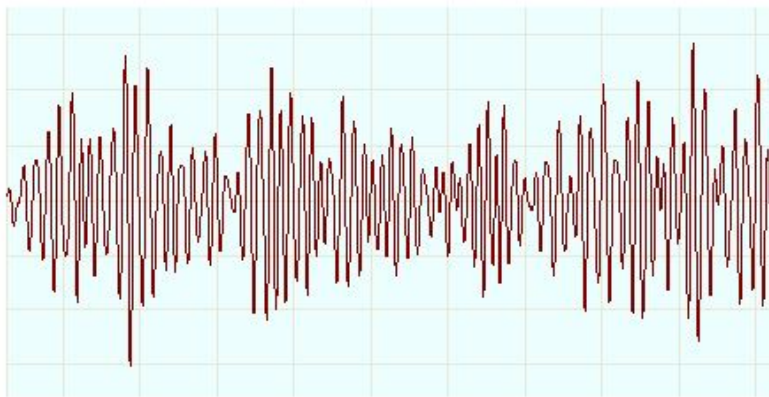


Рис. 2. Вибрационный спектр на рукоятке электродрели «Skill»

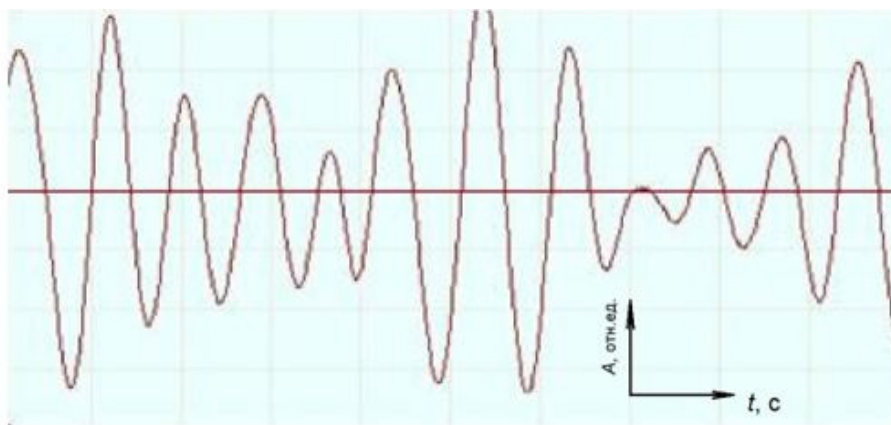


Рис. 3. Спектр вибрации электродрели «Skill» на октавной полосе со среднегеометрической частотой 16 Гц

Исследования вибрации, возникающей в месте контакта руки оператора с инструментом в процессе дробления, показывают, что их амплитуды при работе в СИЗ рук с виброзащитной подкладкой снижаются, при этом уровень виброскорости, передаваемый на обрабатываемую деталь, не изменяется. Способность перчаток ослаблять вибрацию в реальных условиях их применения на рабочем месте может отличаться от наблюдаемой в лабораторных испытаниях. Средства защиты рук изготавливают из различных конструкций с защитными прокладками, усилительными накладками и подкладками различной формы, и местом расположения. Защитные прокладки выполняются из упругодемпфирующих материалов, в том числе запатентованных, например, вибропоглощающий вкладыш Airgel ®.

Спектры вибрации могут быть обработаны с помощью программного обеспечения осциллографа АСК-3106. По ним можно судить о снижении интенсивности вибрации в целом в результате применения виброгасящего материала и о величине данного снижения. Графики строятся в специфических координатах «интенсивность – время». Однако для более продвинутых техник обработки сигналов можно использовать различное программное обеспечение, например Matlab или открытое программное обеспечение Scilab-5.1.

Таким образом, в результате сравнения подобных спектров, полученных от различных виброгасящих материалов, можно сравнивать эти материалы по эффективности подавления вибрации, передающейся на руки. Такие исследования должны соответствовать положениям ГОСТ ISO 10819-2017 «Метод измерений и оценки передаточной функции перчаток в области ладони».

Выполненные тестовые исследования уровня виброскорости без использования виброизолирующего материала (или перчаток) сведены в таблицу. Количество испытаний – шесть. Корректированное значение уровня виброскорости, дБ, вычислялось по формуле:

$$L_U = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1(L_{ui} + L_{ki})},$$

где L_{ui} – среднее квадратическое значение уровня виброскорости в i -ой частотной полосе; n – число октавных полос; L_{ki} – весовые коэффициенты для i -ой частотной полосы для полосы 8 Гц: -6, для остальных - 0.

Основная погрешность при измерении виброскорости в рабочем диапазоне амплитуд и частот не превышает значения в $\pm 10\%$ [15].

Таблица 1

Результаты замеров уровней виброскорости на рукояти электродрели в контакте с рукой, с использованием перчатки без подкладки

№ испы- тания	объединенная ячейка								Корректированное значение уровня виброскорости, дБ
	8	16	31,5	63	125	250	500	1000	
1	98	89	88	87	80	73	72	70	95,6
2	97	88	89	84	84	74	72	68	95,1
3	99	90	84	86	83	81	73	72	96,0
4	97	90	88	87	82	78	75	69	95,6
5	94	85	85	83	85	80	77	71	92,9
6	98	88	87	86	86	83	79	70	95,8

Заключение

Выполненные исследования на предмет подходов к оценке эффективности средств индивидуальной защиты или материалов от вибрации показали, что данное направление имеет хороший научный потенциал как с точки зрения обработки спектров, так и оценки собственно свойств антивибрационных материалов.

Профессиональные измерительные системы оценки эффективности средств индивидуальной защиты рук от вибрации используются в лабораториях, выполняющих их сертификацию или на предприятиях-производителях таких средств. Такие исследования соответствуют положениям ГОСТ ISO 10819-2017 «Метод измерений и оценки передаточной функции перчаток в области ладони». Они отличаются высоким уровнем воспроизводимости, точностью обработки виброспектров, однако вопрос стоимости таких систем остается весьма значимым, а информация о технических характеристиках доступна только по запросу. Поэтому в области непрофессиональных (или учебно-исследовательских) работ использование таких систем ограничено. Однако генерация вибрации, последующий захват вибросигнала может быть осуществлен с помощью доступного оборудования, инструмента и вибропреобразователей. За основу в данной работе был взят шумовиброизмерительный прибор 1-го класса точности ВШВ-003М2 и вибропреобразователь ДН-3-М1.

Выполненная техническая реализация измерений с использованием вибропреобразователя и измерительного прибора ВШВ-003-М2 1-го класса точности отличается простотой и эффективностью. Конечно, использование подобного оборудования для решения профессиональных задач ограничено. Однако для понимания принципов оценки, для образовательных и исследовательских целей такой подход может дать надежный старт. Этап получения и обработки вибрационных спектров должен реализовываться в соответствии с принятыми нормами. Тестовая проверка работоспособности технического комплекса в режиме работы выбранного источника вибрации позволила оценить корректированное значение уровня виброскорости, передаваемую на руку оператора. Основная погрешность при измерении виброскорости в рабочем диапазоне амплитуд и частот не превышает значения в $\pm 10\%$.

Список литературы

1. Иванкина, О. П. Исследование вибраций на вибростенде / О. П. Иванкина, А. В. Байдов, И. Тишин // *Инновации. Наука. Образование.* – 2022. – № 60. – С. 153-157. – EDN OSUOVV.
2. Kowalski, P., & Zając, J. (2022). Tests of selected anti-vibration gloves available on the Polish market. *Vibroengineering PROCEDIA*, 40, 44–49. <https://doi.org/10.21595/vp.2021.22343>
3. McDowell, T. W., Dong, R. G., Welcome, D. E., Xu, X. S., & Warren, C. (2013). Vibration-reducing gloves: transmissibility at the palm of the hand in three orthogonal directions. *Ergonomics*, 56(12), 1823–1840. <https://doi.org/10.1080/00140139.2013.838642>
4. Zając J., Kowalski P., and Rejman M. (2018). Test method for anti-vibration gloves according to the standard EN ISO 10819:2013. *Mechanical Review*, 1(3), pp. 46–50, Mar. 2018, <https://doi.org/10.15199/148.2018.3.5>
5. Dong RG, Xu XS, Welcome DE, McDowell TW. (2021) A Method for Analyzing the Effectiveness of Vibration-Reducing Gloves Based on Vibration Power Absorption. *Vibration*. 2021; 4(1):16-29. <https://doi.org/10.3390/vibration4010002>
6. Сравнительное исследование характеристик эффективности антивибрационных рукавиц и перчаток различных конструкций / В. В. Смирнов, П. Ю. Булдаков, С. Н. Бухаров [и др.] // *Ученые записки физического факультета Московского университета.* – 2017. – № 5. – С. 1751409. – EDN YPDDAI.
7. Jetzer, T.; Haydon, P.; Reynolds, D.D. Effective intervention with ergonomics, antivibration gloves, and medical surveillance to minimize hand-arm vibration hazards in the workplace. *J. Occup. Environ. Med.* 2003, 45, 1312–1317. <https://doi.org/10.1097/01.jom.0000099981.80004.c9>
8. Патент на полезную модель № 198252 U1 Российская Федерация, МПК F16F 15/02, G01M 7/06. Вибростенд для изучения методов защиты от вибраций : № 2019140380 : заявл. 06.12.2019 : опубл. 26.06.2020 / В. В. Булкин, Р. В. Первушин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение образования «Владимирский Государственный Университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ). – EDN WWENVA
9. Патент № 2441213 C1 Российская Федерация, МПК G01M 7/06. Вибростенд : № 2010145135/28 : заявл. 08.11.2010 : опубл. 27.01.2012 / В. Ф. Глушков ; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» (ФГУП «ВНИИА»). – EDN ZGGEFV.
10. Wang Naiwen, MO Tianfen. Patent CN217542320 (U) Vibration test tool. 10.04.2022.
11. Fu Hao; Yu Yang; Yang Xiaoning; Wang Zhe; Wu Tingting; Zheng Peng. Patent CN114112260 (A) Method for measuring hand-transmitted vibration of electric tool for space on-orbit maintenance. 03.01.2022.
12. Hewitt, S., Dong, R., McDowell, T., & Welcome, D. (2016). The Efficacy of Anti-vibration Gloves. *Acoustics Australia*, 44(1), 121–127. <https://doi.org/10.1007/s40857-015-0040-5>
13. Md Rezali, K. A., & Griffin, M. J. (2016). Transmission of vibration through gloves: effects of material thickness. *Ergonomics*, 59(8), 1026–1037. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1102334>
14. Welcome, D. E., Dong, R. G., Xu, X. S., Warren, C., & McDowell, T. W. (2014). The effects of vibration-reducing gloves on finger vibration. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44(1), 45–59. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2013.10.003>

15. Измеритель шума и вибрации ВШВ-003-М2. Паспорт (технические характеристики) – 70 с.

References

1. Ivankina, O.P. Study of vibration on the vibration tools / O.P. Ivankina, A.V. Baydov, I. Tishin // *Innovation. Science. Education.* – 2022. – No 60. – pp. 153-157. – EDN OSUOVV.
2. Kowalski, P., & Zając, J. (2022). Tests of selected anti-vibration gloves available on the Polish market. *Vibroengineering PROCEDIA*, 40, 44–49. <https://doi.org/10.21595/vp.2021.22343>
3. McDowell, T. W., Dong, R. G., Welcome, D. E., Xu, X. S., & Warren, C. (2013). Vibration-reducing gloves: transmissibility at the palm of the hand in three orthogonal directions. *Ergonomics*, 56(12), 1823–1840. <https://doi.org/10.1080/00140139.2013.838642>
4. Zając J., Kowalski P., and Rejman M. (2018). Test method for anti-vibration gloves according to the standard EN ISO 10819:2013. *Mechanical Review*, 1(3), pp. 46–50, Mar. 2018, <https://doi.org/10.15199/148.2018.3.5>
5. Dong RG, Xu XS, Welcome DE, McDowell TW. (2021) A Method for Analyzing the Effectiveness of Vibration-Reducing Gloves Based on Vibration Power Absorption. *Vibration*. 2021; 4(1):16-29. <https://doi.org/10.3390/vibration4010002>
6. Comparative research of anti-vibration mittens and gloves's efficiency / Smirnov V.V., Buldakov P.Y., Buharov S.N., Viunenko Y.N., Hlopkov E.A // *Moscow University Physics Bulletin.* – 2017. – № 5. – p. 1751409. – EDN YPDDAI.
7. Jetzer, T.; Haydon, P.; Reynolds, D.D. Effective intervention with ergonomics, antivibration gloves, and medical surveillance to minimize hand-arm vibration hazards in the workplace. *J. Occup. Environ. Med.* 2003, 45, 1312–1317. <https://doi.org/10.1097/01.jom.0000099981.80004.c9>
8. Utility Model No 198252 U1 Russia, MPC F16F 15/02, G01M 7/06. Vibration stand for studying methods of protection against vibrations : No 2019140380 : publ. 26.06.2020 / V.V. Bulkin, P.V. Pervushin; Applicant: Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs. – EDN WWENVA.
9. Patent № 2441213 C1 Russia, MPC G01M 7/06. Vibration stand : № 2010145135/28 : publ. 27.01.2012 / V.F. Glushkov; Applicant: Federal State Unitary Enterprise Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA). – EDN ZGGEFV.
10. Wang Naiwen, MO Tianfen. Patent CN217542320 (U) Vibration test tool. 10.04.2022.
11. Fu Hao; Yu Yang; Yang Xiaoning; Wang Zhe; Wu Tingting; Zheng Peng. Patent CN114112260 (A) Method for measuring hand-transmitted vibration of electric tool for space on-orbit maintenance. 03.01.2022.
12. Hewitt, S., Dong, R., McDowell, T., & Welcome, D. (2016). The Efficacy of Anti-vibration Gloves. *Acoustics Australia*, 44(1), 121–127. <https://doi.org/10.1007/s40857-015-0040-5>
13. Md Rezali, K. A., & Griffin, M. J. (2016). Transmission of vibration through gloves: effects of material thickness. *Ergonomics*, 59(8), 1026–1037. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1102334>
14. Welcome, D. E., Dong, R. G., Xu, X. S., Warren, C., & McDowell, T. W. (2014). The effects of vibration-reducing gloves on finger vibration. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44(1), 45–59. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2013.10.003>
15. Noise and Vibration Meter VShV-003-M2. Technical certificate – 70 p.

УДК: 502.3:621.311.1

OECD: 02.07.1H

Моделирование снижения шума на поворотах энергетических газоздухопроводов

Тараторин А.А.^{1*}, Павлов Д.А.²¹ к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва, РФ² ФГБУ «РЭА» Минэнерго России, г. Москва, РФ

Аннотация

В статье представлены результаты математического моделирования снижения шума на поворотах энергетических газоздухопроводов. Тягодутьевые машины на объектах энергетики являются источниками постоянного шума, который часто превышает требования санитарных нормативов. Для выполнения акустических расчётов и при проектировании шумозащитных мероприятий необходимо учитывать затухание шума на поворотах. В статье представлен анализ существующих методов расчёта затухания шума на поворотах и показано, что они не учитывают особенности конструкций энергетических газоздухопроводов или не позволяют определить затухание для отдельных среднегеометрических частот, в то время как акустический расчёт выполняется для частот 31,5-8000 Гц. В статье представлены результаты моделирования затухания шума, полученные в программе Ansys, для различных углов поворотов: 90°, 120°, 135° и 150° и размеров коробов газоздушных трактов: 600, 1000, 2000 и 4000 мм. Проиллюстрировано, как влияет учёт затухания шума в поворотах при выполнении акустических расчётов, определении требуемого снижения и длины пластинчатого глушителя шума. В качестве источника шума рассмотрены осевые дымососы марки ДОД-43, которые используются, например, на теплоэлектроцентралях с энергетическими котлами ТГМП-314.

Ключевые слова: газоздухопроводы, энергетика, затухание шума, акустический расчёт, тягодутьевые машины, моделирование затухания.

Modelling of noise reduction at bends of energy gas and air ducts

Taratorin A.A.^{1*}, Pavlov D.A.²¹ PhD, associate Professor, MPEI, Moscow, Russia² REA by the Ministry of Energy of the Russia, Moscow, Russia

Abstract

The article presents the results of mathematical modeling of noise reduction at bends of energy gas and air ducts. Draft and blow fans at energy facilities are sources of constant noise, which exceeds the requirements of sanitary standards. To perform acoustic calculations and when designing noise protection measures, it is necessary to consider the attenuation of noise at bends. The article presents an analysis of existing methods for calculating noise attenuation at bends and shows that they do not take into account the design features of energy gas and air bands or do not allow to determine attenuation for octave bands. While the acoustic calculation is performed for octave bands frequencies 31.5-8000 Hz. The article presents the results of noise attenuation modeling obtained in the Ansys for various angles of bends: 90°, 120°, 135° and 150° and the sizes of gas-air ducts: 600, 1000, 2000 and 4000 mm. It is illustrated how the consideration of noise attenuation in bends affects when performing acoustic calculations, determining the required reduction and the length of the

*E-mail: TaratorinAA@yandex.ru (Тараторин А.А.)

plate noise silencer. As a noise source are considered axial draft fans DOD-43, which are used, for example, at thermal power plants with T-250/300-23.5 turbines.

Keywords: gas and air ducts, power engineering, noise attenuation, acoustic calculation, blow fan, attenuation modeling.

Введение

На тепловых электрических станциях (ТЭС) имеется большое количество основного и вспомогательного энергетического оборудования, которое излучает постоянный шум. При этом на любом объекте, где используется органическое топливо устанавливаются тягодутьевые машины (ТДМ), являющиеся самыми массовыми источниками постоянного шума [1, 2]. Шум, который они излучают, распространяется через устья дымовых труб (в случае дымососов) и от воздухозаборов (в случае дутьевых вентиляторов). Учитывая, что теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) располагаются в непосредственной близости от бытовых потребителей тепловой энергии, данный шум может превышать санитарные нормы и под его воздействием оказывается значительное количество людей. При этом избыточному шумовому воздействию подвергаются как сотрудники предприятий, так и жильцы на селитебной территории.

В качестве вентиляторов и дымососов применяют радиальные машины одно- или двухстороннего всасывания и осевые машины. Уровни звуковой мощности (УЗМ) для современных центробежных машин доходят до 135 дБ, а осевых – до 140-150 дБ. Шум, излучаемый от осевых ТДМ, имеет характерные тональные составляющие, которые усугубляют субъективное восприятие шума человеком, а поэтому при выполнении акустических расчётов к нормативным значениям уровней звука и уровней звукового давления вводится поправка -5 дБ.

Различают три пути распространения шума от ТДМ: от корпуса, излучение шума на стороне всаса (воздухозабор вентилятора) и на стороне нагнетания (шум от дымососов, который излучается через устье дымовой трубы). Последние два пути распространения шума, особенно из устья трубы, наиболее опасны для окружающего района. Это связано с тем, что шум, излучаемый с высоты, не снижается за счет естественных и искусственных наземных препятствий.

Для проектирования глушителей шума энергетических газозовдухопроводов необходимо выполнить акустический расчёт и определить требуемое снижение шума. При этом длина коробов газового тракта может составлять десятки и сотни метров, а их трассировка всегда предполагает наличие нескольких поворотов. Такая особенность определяет необходимость учёта снижения шума по длине газозовдухопровода и на поворотах. Затухание шума по длине канала с металлическими стенками является незначительным и рассчитывается по известным методам [1, 3-5]. На поворотах каналов снижение звуковой энергии достигает нескольких децибел и происходит из-за отражения части звуковой энергии обратно в канал. Для снижения звуковой энергии на повороте должен быть участок канала, от которого происходит отражение звуковой энергии обратно в канал, при этом интенсивность падающей звуковой энергии на отражающий участок канала поворота зависит от степени расширения канала и звукопоглощающих свойств отражающего участка [1].

1. Методы расчёта затухания шума на поворотах

Существующие методы расчёта снижения шума в поворотах энергетических газоздухопроводов имеют ряд недостатков: они либо не позволяют учесть снижение шума для различных среднегеометрических частот, либо не учитывают возможные повороты канала на различные углы. Необходимость учёта снижения уровня звуковой мощности в элементах газоздухопроводов по пути распространения шума, в том числе на поворотах, при расчёте ожидаемых уровней шума, регламентирована законодательно [6]. Однако методики, которые следует использовать при расчёте указанного затухания, не определены.

Согласно [1] снижение уровня звуковой мощности на поворотах энергетических газоздухопроводов [1] может быть определено как:

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2. \quad (1)$$

Первое слагаемое ΔL_1 , дБ, определяет снижение уровня звуковой мощности за счёт отражения части звуковой энергии обратно в канал в зависимости от геометрических характеристик поворота и вычисляется по формуле [1]:

$$\Delta L_1 = 10 \cdot \lg \left(\frac{1+m}{2 \cdot m} \cdot \sec^2 \left(\frac{\varphi}{2} \right) \right), \quad (2)$$

где $m = F_1/F_2$ – отношение площадей поперечного сечения канала до и после изменения сечения по пути распространения звука, φ – угол поворота.

Второе слагаемое ΔL_2 определяет снижение уровня шума за счёт поглощения звуковой энергии стенками поворота и рассчитывается по формуле [1]:

$$\Delta L_2 = \frac{40 \cdot \alpha_{\text{п}} \cdot \lg(1+m) \cdot \sin(\varphi)}{(2 - \alpha_{\text{АВ}}) \cdot D_{\text{г}}}, \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{п}}$ – коэффициент звукопоглощения боковых поверхностей поворота; $\alpha_{\text{АВ}}$ – коэффициент звукопоглощения отражающей поверхности поворота; $D_{\text{г}}$ – гидравлический диаметр воздухопровода.

Формулы (1-3) позволяют оценить снижение уровня звуковой мощности при прохождении поворота, однако не позволяют определить снижение УЗМ для отдельных среднегеометрических частот, что необходимо при выполнении акустических расчётов [5].

Согласно [7] существует параметр W/λ , по которому можно определить снижение шума на прямых (угол 90°) скругленных поворотах без облицовки стенок (см. табл. 1), при этом W – сторона газоздушного короба (показана на рис. 1), м; λ – длина волны, м.

Таблица 1

Снижение шума на прямом повороте без облицовки

Параметр	Скругленный поворот
$W/\lambda < 0,14$	0
$0,14 \leq W/\lambda < 0,28$	1
$0,28 \leq W/\lambda < 0,55$	2
$0,55 \leq W/\lambda < 1,11$	3
$1,11 \leq W/\lambda < 2,22$	3
$W/\lambda > 2,22$	3

Представленный метод оценки снижения шума в повороте не позволяет учесть различные углы, которые в энергетических газозовдухопроводах зачастую отличны от 90° . Изменение угла поворота может привести как к увеличению фактического затухания шума, так и к его снижению. В первом случае мероприятия для снижения шума будут обеспечивать выполнение требований санитарных норм, однако, затраты на изготовление глушителя и его аэродинамическое сопротивление окажутся избыточными, что скажется на работе оборудования. Во втором случае требуемое снижение шума будет определено ошибочно и мероприятия не дадут ожидаемого эффекта.

Существуют также исследования, посвящённые снижению УЗМ в облицованных поворотах [3, 7-9]. Энергетические газозовдухопроводы до проведения специальных мероприятий не облицовываются, поэтому в данной статье представлены результаты моделирования снижения шума на необлицованных поворотах с углами 90° , 120° , 135° , 150° для коробов газозовдушных трактов (ГВТ) квадратного сечения со сторонами 600, 1000, 2000 и 4000 мм. Схемы поворотов приведены на рис. 1.

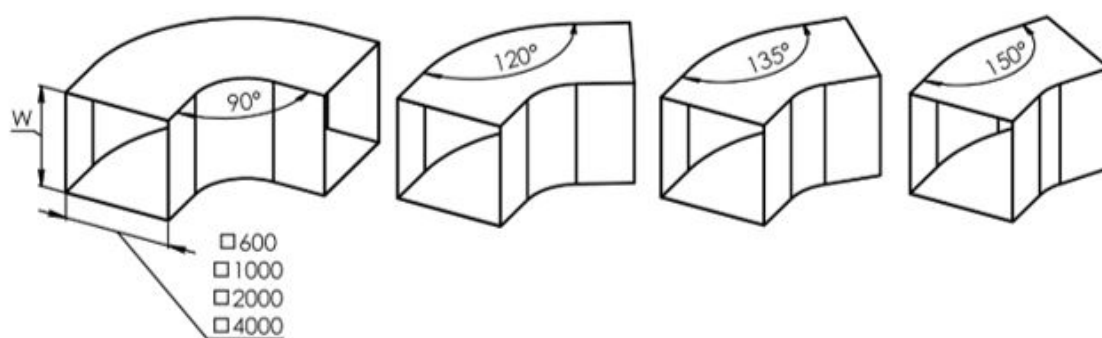


Рис. 1. Схемы поворотов газозовдухопроводов

2. Моделирования затухания шума на поворотах

В данном разделе статьи представлены результаты моделирования затухания шума на поворотах в зависимости от среднегеометрической частоты, угла поворота и сечения канала. При моделировании в программе Ansys затухание шума на участке тракта или на повороте рассчитывается, как соотношение звуковой энергии на входе в поворот и на выходе из него [10]:

$$\Delta L = 10 \cdot \lg \left(\frac{W_{\text{вх}}}{W_{\text{вых}}} \right), \quad (4)$$

где $W_{\text{вх}}$ – звуковая энергия перед поворотом, дБ; $W_{\text{вых}}$ – звуковая энергия на выходе поворота, дБ. При этом учитывается, что при прохождении поворота часть падающей звуковой энергии $W_{\text{пад}}$ отражается от стенки канала $W_{\text{отр}}$, что приводит к уменьшению звуковой энергии на выходе из канала. Баланс энергий схематически показан на рис. 2.

Математическое моделирование с целью определения затухания звуковой энергии при прохождении поворотов осуществляется в программном пакете Ansys ACT Acoustic, в котором выполняется гармонический анализ. Моделирование методом конечных элементов основано на разбиении расчётной области на отдельные ячейки, для которых в случае гармонической временной зависимости звукового поля решается уравнение Гельмгольца [10].

Акустический домен представляет собой поворот воздушного короба квадратного сечения. В расчёте моделируется распространение воздушного шума через участок канала с поворотом, поэтому задаются следующие свойства воздуха: скорость звука в воздухе $c=346,3$ м/с и плотность воздуха $\rho = 1,23$ кг/м³ [10]. При моделировании использовались следующие граничные условия:

- источник звуковых волн во входном сечении перед поворотом задан при помощи нормальной скорости продольной волны [10, 11];
- поверхность поглощения, которая имитирует акустические свойства металлической стенки поворота;
- условие поглощения (прозрачности), учитывающее отсутствие отражения звуковых волн от входного и выходного участка канала. Данное условие позволяет моделировать меньшую часть акустического домена, предполагая, что входящие и выходящие волны продолжают движение по каналу и не отражаются от входного и выходного сечений [10].

Размер ячеек сетки определяется наименьшей длиной звуковых волн [10, 12], которые в данном случае соответствуют среднегеометрической частоте 8000 Гц. Для этой частоты размер элементов сетки составляет 7 мм. Такие размеры накладывают ограничения на вычислительные ресурсы при расчёте 3D моделей на высоких частотах [10]. В целях снижения затрат ресурсов для выполнения моделирования и определения затухания шума на высоких частотах вместо 3D модели использована 2,5D модель [13], толщина которой принята 2 мм.

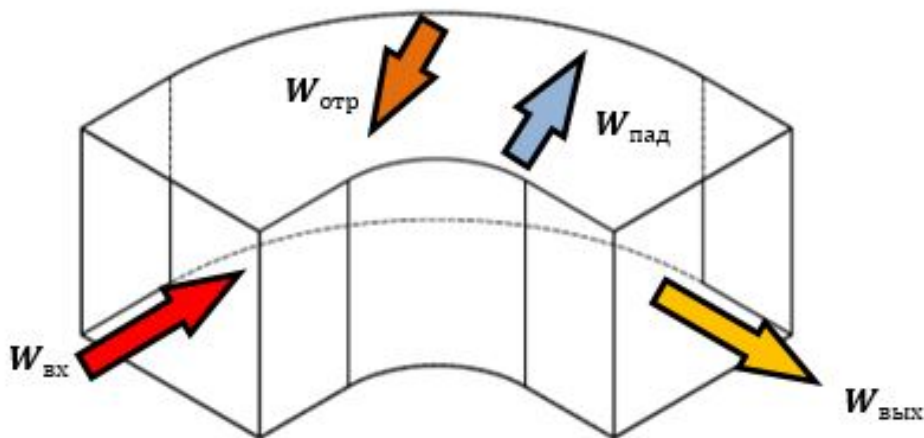


Рис. 2. Баланс звуковой энергии для поворота

Сравнение результатов моделирования снижения шума на прямом плавном необлицованном повороте и данных расчётов по известным методикам представлено в таблице 2.

Таблица 2

Сравнение результатов моделирования и справочных данных

Метод расчёта	Снижение УЗМ, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	600 мм								
Результаты моделирования	0,0	0,0	1,1	2,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
По [6]	0,0	0,0	1,0	2,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
По [1]	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
	1000 мм								
Результаты моделирования	0,0	1,0	2,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,1	3,0
По [6]	0,0	1,0	2,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
По [1]	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
	2000 мм								
Результаты моделирования	1,0	2,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
По [6]	1,0	2,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
По [1]	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
	4000 мм								
Результаты моделирования	2,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
По [6]	2,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
По [1]	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0

Как видно из таблицы 2, результаты моделирования в Ansys для случая прямого поворота имеют хорошую сходимость с расчётами по известным методикам. На рис. 3-6 представлены результаты моделирования в Ansys для различных углов поворотов короба.

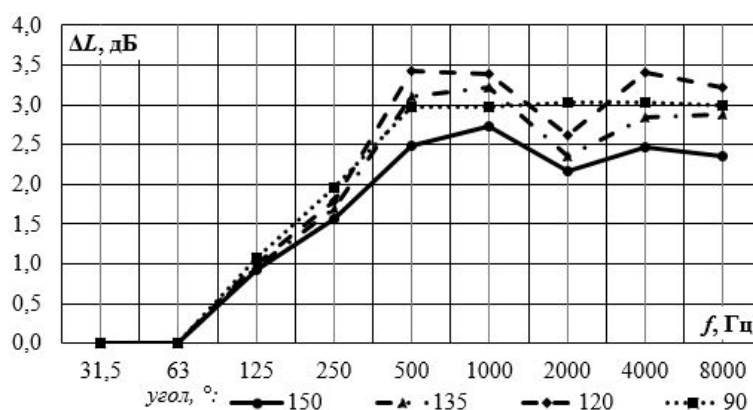


Рис. 3. Снижение УЗМ в поворотах с различными углами для квадратного короба со сторонами 600 мм

Из рис. 3 видно, что при стороне короба 600 мм и угле поворота 90° достигается наибольшее снижение УЗМ на частотах 31,5-250 Гц и 2000 Гц, на остальных частотах – при угле поворота 120°.

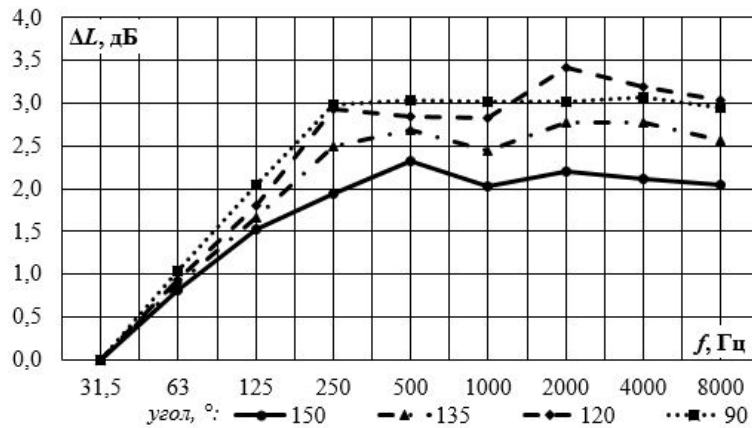


Рис. 4. Снижение УЗМ в поворотах с различными углами для квадратного короба со сторонами 1000 мм

Из рис. 4 видно, что при стороне короба 1000 мм в области низких и средних частот наибольшее снижение УЗМ наблюдается для угла поворота в 90° по сравнению с остальными, а на частотах 2000-8000 Гц – для угла 120° .

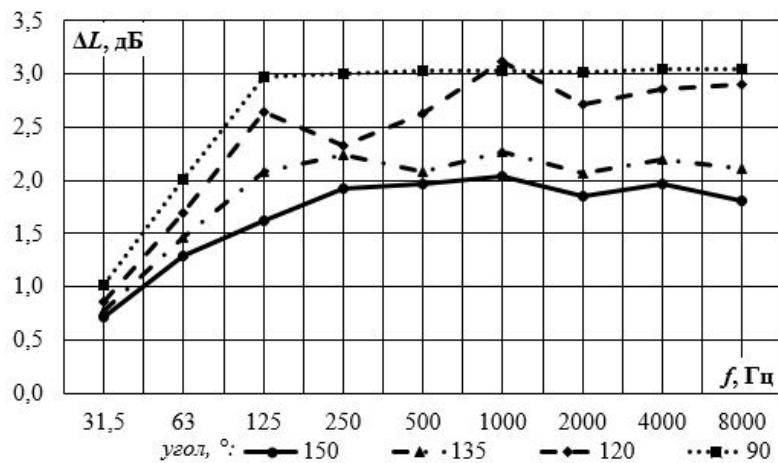


Рис. 5. Снижение УЗМ в поворотах с различными углами для квадратного короба со сторонами 2000 мм

Из рис. 5 видно, что при стороне короба 2000 мм для всех частот наибольшее снижение УЗМ наблюдается для угла поворота 90° , за исключением 1000 Гц, где большее затухание для угла поворота 120° .

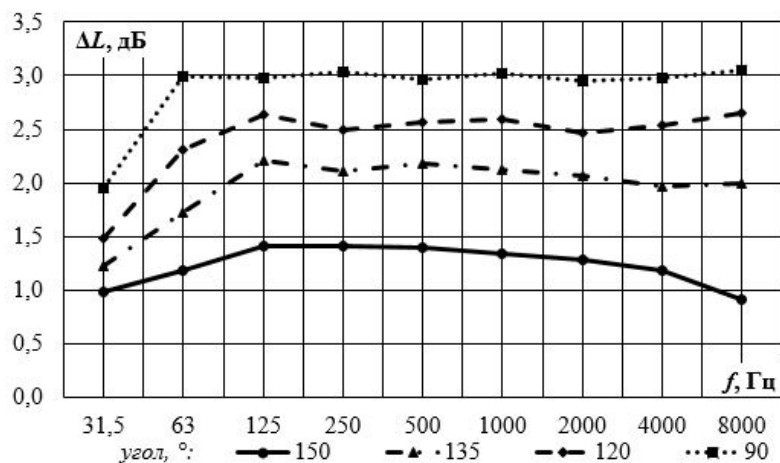


Рис. 6. Снижение УЗМ в поворотах с различными углами для квадратного короба со сторонами 4000 мм

Из рис. 6 видно, что при стороне короба 4000 мм для всех частот наибольшее снижение УЗМ для угла поворота 90°, а наименьшее значения снижение шума на повороте ГВТ наблюдается для угла 150°.

Анализ рис. 3-6 показывает, что по мере увеличения размеров короба для любого из углов поворотов снижение УЗМ в диапазоне частот 31,5-8000 Гц становится более равномерным.

3. Учёт влияния затухания шума на поворотах в акустических расчётах

В данном разделе статьи проиллюстрировано, как влияет учёт затухания УЗМ в поворотах при выполнении акустических расчётов. В качестве источника шума рассмотрены осевые дымососы марки ДОД-43, которые используются, например, на ТЭЦ с турбоустановками Т-250/300-23,5. При выполнении расчетов учитывалось, что на ТЭЦ установлено четыре энергетических котла ТГМП-314, каждый из которых имеет по два дымососа. Таким образом удаление дымовых газов осуществляется восьмью дымососами ДОД-43. В общем случае шум от тягодутьевых машин ТЭЦ излучается со стороны всаса, напора, от корпуса, а также структурный шум передаётся через опоры строительным конструкциям [14]. В расчёте для возможности анализа вклада снижения УЗМ на поворотах учитывался исключительно шум от срезов дымовых труб и не учитывался шум от прочих источников (газораспределительного пункта, градирен, трансформаторов и др.). Шумовые характеристики дымососов принимались на основании данных завода-изготовителя. Количество поворотов во всех случаях принимается одинаковым и равно четырём.

Модель объекта, представленная на рис. 7, разработана в программе АРМ «Акустика», которая позволяет выполнять расчёты шумового воздействия источников шума при распространении на местности в расчетной точке по ГОСТ 31295.2-2005 [15]. Расчётные точки на открытом воздухе выбраны в зонах постоянного пребывания людей, а также на расстоянии 2 м от плоскости фасадов ближайших жилых зданий, ориентированных в сторону источника шума. Расчётные точки выбраны: на прилегающей территории учебного заведения (РТ-1), территории медицинского учреждения (РТ-2), а также на территории жилого района (РТ-3).

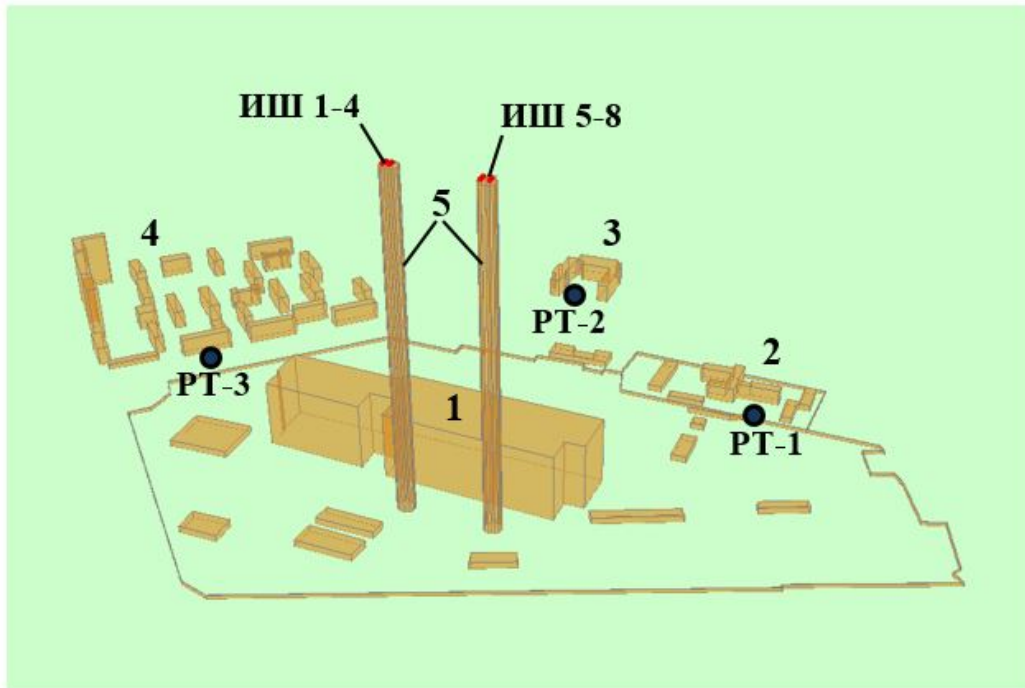


Рис. 7. Расчётная модель для определения УЗД и УЗ: 1 – главный корпус ТЭЦ, 2 – учебное заведение, 3 – медицинское учреждение; 4 – жилой район; 5 – дымовые трубы; РТ– расчётная точка; ИШ – источник шума

Наибольшие значения превышений уровней звукового давления (УЗД) и уровня звука (УЗ) наблюдаются в РТ-2. На рис. 8 и 9 представлены графики, показывающие результаты УЗД в РТ-2, а также сравнение с нормативными значениями по шуму [16], с учётом поправки на тональность шума (-5 дБ).

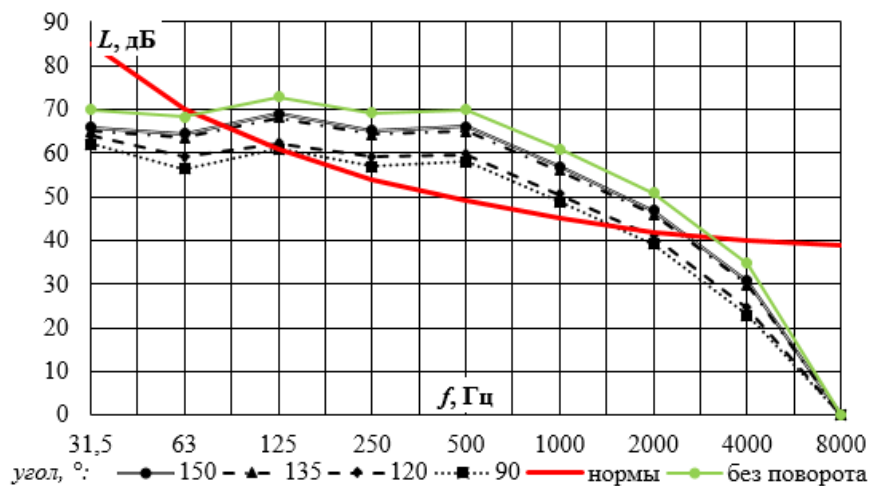


Рис. 8. УЗД в РТ-2 для короба со сторонами 4000 мм

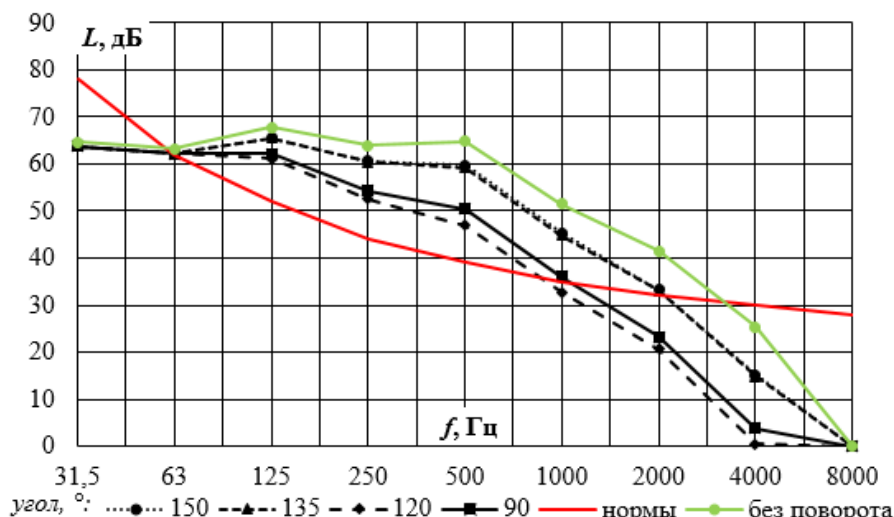


Рис. 9. УЗД в РТ-2 для короба со сторонами 600 мм

Превышение нормативных значений УЗД по результатам расчётов приходится на диапазон среднегеометрических частот от 125 до 2000 Гц для короба со сторонами 4000 мм и от 125 до 1000 Гц для короба со сторонами 600 мм. Превышение достигает максимальных значений для угла поворота в 150° для обоих сечений ГВТ; наименьшие значения наблюдаются для угла 90° в случае короба со сторонами 4000 мм, 120° в случае короба со сторонами 600 мм.

Максимальное различие УЗД в расчётной точке достигает 25 дБ на частоте 4000 Гц для поворота на 120° при стороне короба 600 мм.

Для снижения шума от вентиляторов, к которым относятся также и тягодутьевые машины ТЭС, широко применяются пластинчатые диссипативные глушители, устанавливаемые в каналах перед или за машиной [17]. Пластинчатые глушители шума наряду с высокой акустической эффективностью должны обладать возможно меньшим аэродинамическим сопротивлением [18]. Оценка показывает, что без учёта влияния затухания шума на поворотах в рассмотренном примере увеличивается длина пластинчатого глушителя с проходным сечением 50% на 1,3 м при стороне короба 600 мм и на 2,5 м при стороне короба 4000 мм. Соответствующее увеличение аэродинамического сопротивления составит 38 и 11 Па.

Заключение

1. Представлен анализ известных методов расчёта снижения УЗМ в поворотах, показаны их недостатки, такие как невозможность расчёта снижения УЗМ для отдельных среднегеометрических частот или углов поворотов, отличных от 90°.

2. Представлены результаты моделирования снижения УЗМ для различных углов поворотов: 90°, 120°, 135°-150° и размеров коробов газозовдушных трактов ТЭС: 600, 1000, 2000 и 4000 мм.

3. Акустические расчёты показывают, что учёт затухания на повороте приводит к снижению УЗД в расчётных точках до 25 дБ при среднегеометрической частоте 4000 Гц.

4. Необходимая длина пластинчатого глушителя существенно увеличивается, если не учитывать фактическое затухания шума на поворотах. В рассмотренном примере увеличение длины глушителя составило 2,5 м, а его аэродинамического сопротивления – на 38 Па.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации

для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК 3244.2022.4.

Список литературы

1. Тупов В.Б. Снижение шума, излучаемого в окружающую среду от больших энергетических газозовдухопроводов: дис. ...докт. техн. наук: 05.14.14 / Тупов Владимир Борисович. – М., 1997. – 544 с.
2. Kisku G. C. et al. Assessment of noise level of a medium scale thermal power plant // Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine. – 2006. – V. 10. – №. 3. – P. 133.
3. Munjal M. L. Noise and vibration control. – World Scientific, 2013. – V. 3.
4. Munjal M. L. Acoustics of ducts and mufflers with application to exhaust and ventilation system design. – John Wiley & Sons, 1987.
5. Möser M. Engineering acoustics // Nova York (Estados Unidos): Springer Publishing. – 2009.
6. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003.
7. Bies D. A., Hansen C. H., Howard C. Q. Engineering noise control. – CRC press, 2017.
8. Huang L. A theoretical study of duct noise control by flexible panels // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1999. – V. 106. – №. 4. – P. 1801-1809.
9. Fan H. K. H., Shen C., Leung R. C. K. Duct aeroacoustic control by multiple flexible panels // INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. – Institute of Noise Control Engineering, 2018. – V. 258. – №. 3. – P. 4908-4915.
10. C.Q. Howard, B.S. Cazzolato. Acoustic Analyses Using MATLAB and Ansys, CRC press, 2015.
11. Wu S.F. Reconstructing acoustic field based on the normal surface velocity input data // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2015. – V. 137. – №. 4. – P. 2234-2234.
12. Хрулев С. Анализ акустики в ANSYS Mechanical 15.0 // САПР и графика. – 2014. – №. 8. – С. 54.
13. Azizi M. A. Simulation of Acoustic Pressure Field Generated by Ultrasonic Transducer. – 2019.
14. Barron R. F. Industrial noise control and acoustics. – CRC Press, 2002.
15. ГОСТ 31295.2–2005 (ИСО 9613–2:1996) Шум. Затухание звука при распространении на местности.
16. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.
17. Crocker M. J., Arenas J. P. Engineering acoustics: noise and vibration control. – John Wiley & Sons, 2021.
18. Nashed M. W., Elnady T., Abom M. Review of splitter silencer modeling techniques // Euronoise 2018, Crete.

References

1. Tupov V.B. Reduction of noise emitted into the environment from large energy gas and air ducts / doctoral thesis. – M., 1997. – 544 p.

2. Kisku G. C. et al. Assessment of noise level of a medium scale thermal power plant // Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine. – 2006. – V. 10. – №. 3. – P. 133.
3. Munjal M. L. Noise and vibration control. – World Scientific, 2013. – V. 3.
4. Munjal M. L. Acoustics of ducts and mufflers with application to exhaust and ventilation system design. – John Wiley & Sons, 1987.
5. Möser M. Engineering acoustics // Nova York (Estados Unidos): Springer Publishing. – 2009.
6. SP 51.13330.2011. Noise protection. Updated edition SNiP 23-03-2003.
7. Bies D. A., Hansen C. H., Howard C. Q. Engineering noise control. – CRC press, 2017.
8. Huang L. A theoretical study of duct noise control by flexible panels // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1999. – V. 106. – №. 4. – P. 1801-1809.
9. Fan H. K. H., Shen C., Leung R. C. K. Duct aeroacoustic control by multiple flexible panels // INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. – Institute of Noise Control Engineering, 2018. – V. 258. – №. 3. – P. 4908-4915.
10. C.Q. Howard, B.S. Cazzolato. Acoustic Analyses Using MATLAB and Ansys, CRC press, 2015.
11. Wu S.F. Reconstructing acoustic field based on the normal surface velocity input data // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2015. – V. 137. – №. 4. – P. 2234-2234.
12. Khrulev S. Analysis of acoustics in ANSYS Mechanical 15.0 // CAD and graphics. – 2014. – №. 8. – P. 54.
13. Azizi M. A. Simulation of Acoustic Pressure Field Generated by Ultrasonic Transducer. – 2019.
14. Barron R. F. Industrial noise control and acoustics. – CRC Press, 2002.
15. GOST 31295.2–2005 (ISO 9613–2:1996) Noise. Sound attenuation during propagation on the ground.
16. SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans.
17. Crocker M. J., Arenas J. P. Engineering acoustics: noise and vibration control. – John Wiley & Sons, 2021.
18. Nashed M. W., Elnady T., Åbom M. Review of splitter silencer modeling techniques // Euronoise 2018, Crete.

УДК: 693.3
OECD: 3.03

Обоснование рекомендаций по определению границы санитарно-защитной зоны приаэродромной территории аэродромов государственной авиации

Зинкин В.Н.^{1*}, Драган С.П.², Сливина Л.П.³, Дроздов С.В.⁴, Харитонов В.В.⁵

¹ Профессор консультант

² Заведующий отделом

³ Заведующая кафедрой

⁴ Научный сотрудник

⁵ Доцент Филиал «Взлёт» Московского авиационного института (государственного технического университета), г. Ахтубинск, Астраханская область, РФ

^{1,3} кафедра гигиены Волгоградский государственный медицинский университет, г. Волгоград, РФ

^{2,4} ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА, г. Москва, РФ

Аннотация

В соответствии с «Методикой установления (изменения) седьмой подзоны приаэродромной территории», разработанной Роспотребнадзором для аэродромов гражданской авиации, она не применяется для аэродромов государственной авиации. Согласно ей, границы санитарно-защитной зоны устанавливаются только по уровню шумового воздействия. Аэродромы государственной авиации имеют существенные отличия от аэродромов гражданской авиации по их эксплуатации и организации полетов. К вредным факторам, оказывающим влияние на население приаэродромной территории, относятся шумовое и электромагнитное воздействие, а также химическое загрязнение. Показаны особенности каждого из указанных факторов для аэродромов государственной авиации. При расчете уровня шумового воздействия надо учитывать тип воздушных судов, их летно-технические характеристики, организацию полетов. Электромагнитное воздействие зависит от количества радиотехнических станций на аэродроме и вне его, расчет проводится по самой мощной станции с учетом удаленности населенных пунктов. Химическое загрязнение приаэродромной территории обусловлено преимущественно продуктами сгорания авиационного топлива. Особое внимание необходимо обращать на зону траектории взлета и посадки воздушных судов, а также имеющих специальных зон. Рекомендации должны разрабатываться для конкретного аэродрома государственной авиации. Их надо обязательно согласовывать с территориальной администрацией, в чьем ведомстве находится территория аэродрома.

Ключевые слова: санитарно-защитная зона, аэродром, государственная авиация, воздушное судно, вредные факторы, нормирование.

Substantiation of recommendations for determining the boundar of sanitary protection zone of the aerodrome territory of airfields of state aviation

Zinkin V.N.^{1*}, Dragan S.P.², Slivina L.P.³, Drozdov S.V.⁴, Kharitonov V.V.⁵

¹ Professor Consultant

² Head of the Department

³ Head

⁴ Researcher⁵ Associate Professor Branch "Take-off" of the Moscow Aviation Institute (State Technical University), Akhtubinsk, Astrakhan region, Russia^{1,3} of the Department of Hygiene Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia^{2,4} of the A.I. Burnazyan SSC FMBC of the FMBA, Moscow, Russia**Abstract**

In accordance with the "Methodology for establishing (changing) the seventh subzone of the aerodrome territory" developed by Rospotrebnadzor for civil aviation airfields, it is not used for state aviation airfields. According to it, the boundaries of the sanitary protection zone are set only by the level of noise exposure. Airfields of state aviation have significant differences from airfields of civil aviation in their operation and organization of flights. Harmful factors affecting the population of the aerodrome area include noise and electromagnetic effects, as well as chemical pollution. The features of each of these factors for airfields of state aviation are shown. When calculating the noise level, it is necessary to take into account the type of aircraft, their flight characteristics, and the organization of flights. The electromagnetic impact depends on the number of radio engineering stations at the airfield and outside it, the calculation is carried out according to the most powerful station, taking into account the remoteness of settlements. Chemical pollution of the aerodrome area is caused mainly by the combustion products of aviation fuel. Special attention should be paid to the area of the trajectory of take-off and landing of aircraft, as well as the existing special zones. Recommendations should be developed for a specific aerodrome of state aviation. They must necessarily be coordinated with the territorial administration, in whose department the territory of the airfield is located.

Keywords: sanitary protection zone, airfield, state aviation, aircraft, harmful factors, rationing.

Введение

Санитарно-защитная зона (СЗЗ) – специальная территория с особым режимом использования, которая устанавливается вокруг объектов и производств, являющихся источниками воздействия на среду обитания и здоровье человека. Она обеспечивает уменьшение воздействия загрязнения (химического, биологического, физического и др.) на атмосферный воздух и территорию до значений, установленных гигиеническими нормативами. По своему функциональному назначению она является защитным барьером, обеспечивающим уровень безопасности населения при эксплуатации объекта.

Эксплуатация аэропортов сопровождается шумовым и электромагнитным воздействием, а также химическим загрязнением атмосферного воздуха и территории, что создает риск здоровью населения приаэродромных территорий (ПАТ) [1–4]. Федеральным законодательством на ПАТ всех аэродромов устанавливается выделение семи подзон, в которых вводятся ограничения использования объектов недвижимости и осуществления деятельности. Особое внимание представляет седьмая подзоны, в которой предусмотрено выполнение требований законодательства в области обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения [5–8].

При определении седьмой подзоны для гражданской авиации учитываются такие факторы как типы эксплуатируемых ВС и их тактико-технические данные, особенности организации полетов (при взлете, посадке и других летных операциях в районе аэродрома и ПАТ), ландшафт аэродрома, график полетов ВС (с учетом дневного и ночного периода суток) и др. Для определения границ СЗЗ разработаны методические рекомендации [9], но они не распространяется на аэродромы государственной и экспериментальной авиации. Кроме того, этим документом границы СЗЗ устанавливаются только по шумовому воздействию, а в качестве критерия необходимо использовать эквивалентный уровень звука в дневное и ночное время.

Актуальность работы определяется отсутствием методики определения границ СЗЗ аэродромов государственной авиации, в которой должны быть учтены специфические особенности (организация полетов, типы ВС, конструктивные и летно-технические характеристики летательных аппаратов и др.) [10–12]. При этом надо учитывать, что аэродромы государственной авиации расположены на территории, законодательно принадлежащей местным органам самоуправления.

Цель: показать особенности организации полетов на аэродромах государственной авиации и эксплуатации аэродромов, которые необходимо учитывать при разработке методики определения седьмой подзоны ПАТ.

1. Особенности вредных факторов на аэродромах государственной авиации, влияющие на определение границ СЗЗ приаэродромной территории

С учетом рекомендаций и стандартов ИКАО в целях планирования землепользованием в районах аэродромов необходимо устанавливать зоны с различными уровнями загрязнения, в том числе и по уровню шума [13, 14]. Российская Федерация является членом этой международной организации, поэтому обязана выполнять данные требования. В соответствии с положениями федерального законодательства на ПАТ аэродромов должны быть выделены семь подзон, в которых устанавливаются ограничения использования объектов недвижимости и осуществления деятельности. В настоящее время установление (изменение) границ седьмой подзоны ПАТ должно проводиться согласно методическим рекомендациям [9]. В них определены порядок обоснования границ, проведения их верификации и производственного контроля в части оценки уровня авиационного шума.

При анализе этого документа [9] необходимо обратить внимание на следующее:

- согласно п.1.1 он «не применяется для установления (изменения) границ седьмой подзоны аэродромов **государственной** и экспериментальной авиации»;

- согласно п.3.1.2 границы СЗЗ устанавливаются только **по критериям уровня шума**: 1) эквивалентному скорректированному уровню дневного шума ($L_{\text{экв. д}}=55$ дБА) за период с 7.00 до 23.00; 2) эквивалентному скорректированному уровню ночного шума ($L_{\text{экв. н}}=45$ дБА) за период с 23.00 до 7.00; 3) эквивалентному средневзвешенному суточному шуму ($L_{\text{экв. дн}}$), который характеризует хроническое воздействие [15, 16];

- таблицей 1 п.3.4.3 предусмотрено, что при проведении мониторинга авиационного шума, должны быть использованы **ВС гражданской авиации**, на долю которых приходится не менее 80% взлетно-посадочных операций;

- документом **не предусмотрено установление границ СЗЗ по уровню электромагнитного воздействия и химического загрязнения**.

Ниже будут рассмотрены особенности шумового и электромагнитного воздействия, а также химического загрязнения при организации полетов на аэродромах государственной авиации, которые необходимо учитывать при разработке методики для установления границ седьмой подзоны ПАТ для данного типа аэродромов.

2. Шум

Выделение 7-й подзоны по уровню шумового воздействия на население ПАТ осуществляется по границам с учетом зоны действия допустимого шума при выполнении полетных заданий в соответствии с инструкцией по производству полетов на аэродромах государственной авиации [17, 18].

Согласно [9] при расчете границ уровня шума ПАТ учитываются ВС, которые

на 80% обеспечивают годовую загрузку летной деятельности аэродрома. Кардинальным отличием государственной авиации от гражданской являются типы ВС, что обусловлено обеспечением обороноспособности страны. В настоящее время государственная авиация имеет следующие типы ВС: истребители, истребители-бомбардировщики, фронтовые бомбардировщики, стратегические, военно-транспортные и вертолеты. В большинстве случаев каждый тип ВС базируется на отдельном аэродроме, что обусловлено спецификой учебно-боевой деятельности. Загруженность аэродромов государственной авиации нестационарная и зависит от предназначения авиационного подразделения: боевое дежурство, учебно-летная подготовка, летно-испытательная и др.

Организация полетов на аэродромах государственной авиации отличается от регламентированных процедур в гражданской авиации. Так, схемы вход-выход на аэродромах государственной авиации и схемы построения захода на посадку имеют свою специфику. В испытательных целях в районе аэродрома могут проводиться полеты на режимах работы двигателей отличных от дроссельных режимов работы двигателей на посадке. На аэродромах, выполняющих испытательные полеты, не существует жестких процедур взлета и захода на посадку. На этих аэродромах используются трассы для полетов не стационарного характера, которые зависят от оперативно-тактических задач на летную смену. В районе ПАТ могут быть зоны пилотирования, а над аэродромом предусмотрена зона для отработки демонстрационного пилотажа. Перечисленные особенности организации полетов надо учитывать при определении границ СЗЗ 7-й подзоны аэродромов государственной авиации [3, 11, 19, 20].

Для расчета границ 7-й подзоны аэродромов государственной авиации необходимо учитывать следующие факторы: акустические характеристики основных источников шума ВС, компоновка двигателей, траектория и скорость полета ВС, особенности распространения звука в атмосфере и вблизи поверхности земли, метеоусловия.

Основным источником генерации шума являются силовые установки ВС, которые включают: вентилятор, компрессор, реактивную струю с общей камерой смешения или отдельным выхлопом, турбину, внутренние источники шума, камеру сгорания. Кроме того, необходимо учитывать шум от планера. Уровень шума от каждого источника характеризуется спектральными компонентами в 24 третьоктавных частотных полосах и учитывается для ряда конкретных точек положения ВС на траектории полета. Необходимо учитывать и диаграмму направленности для каждого источника шума.

При расчете влияния компоновки двигателя на уровень шума на местности следует учитывать его расположение: на фюзеляже, над крылом, под крылом и смешанная компоновка. В зависимости от этого происходит экранирование шума. В каждом отдельном случае акустическая эффективность экранирования совершенно разная и в общем случае зависит от конкретного числа Френеля. Влияние компоновки реактивных струй может приводить как к ослаблению, так и усилению шума на местности.

Целесообразно учитывать при расчетах уровня шума на местности влияние скорости ВС. При обтекании ВС встречным потоком формируется шум, уровень которого зависит от скорости полета. Ее величина определяет уровень шума на местности.

Генерируемый ВС шум распространяется сферически, его интенсивность убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника. Ослабление уровня шума от источника до точки на местности (при расстояниях больше опорного) или усиление (при расстояниях меньше опорного) может быть выражено:

$$\Delta L = 10 \cdot Lg(R/R_{оп}) \text{ дБ}, \quad (1)$$

где $R_{оп}$ - некоторое фиксированное расстояние (в наших расчетах далее принято

$R_{\text{оп}} = 1000 \text{ м}$), R – расстояние от источника (ВС) до контрольной точки на местности.

При расчетах уровня шума от ВС, распространяющего в спокойной однородной атмосфере, следует учитывать поглощение звука, обусловленное вязкостью и зависящее только от частоты, а также внутримолекулярное затухание, которое зависит и от частоты, и от состояния атмосферы (температура, влажность, давление). Для учета такого рода поглощения звука имеются подробные таблицы и расчетные формулы. Другим фактором, влияющим на уровень шума на местности, является рефракция звука вблизи поверхности земли за счет наличия градиента скорости ветра и температуры в приземном слое атмосферы. Если звук распространяется против ветра, то на поверхности образуется зона акустической тени (фронт звуковой волны изгибается вверх), в противном случае, уровень шума может даже увеличиваться (при распространении по ветру). Помимо рефракции звуковой волны имеет место интерференция, когда уровень шума определяется взаимодействием прямой и отраженной от земли волны, а уровень отраженной волны – импедансом земной поверхности, который зависит от множества факторов (сезонность, грунт и т.д.). Благодаря интерференции спектр шума изменяется по сравнению с распространением в свободном поле. На изменение спектра влияет и доплеровское смещение частоты: при приближении ВС к наблюдателю частота слышимого звука уменьшается, оставаясь выше частоты излучения, а при удалении воспринимаемая частота становится меньше частоты излучения от неподвижного источника.

В методических рекомендациях [9] по определению границ СЗЗ аэродромов гражданской авиации имеется запрет (п. 1.1) на использование их для аэродромов государственной авиации. В первую очередь, это можно объяснить существенными различиями в летно-технических характеристиках эксплуатируемых типов ВС. Для подтверждения этого в таблице 1 приведены основные технические параметры, влияющие на образование авиационного шума при выполнении полета.

Таблица 1

Технические параметры, влияющие на генерацию авиационного шума при выполнении полета

Технические параметры	Типы воздушных судов				
	Гражданская авиация	Государственная авиация			
		ИА+ИБА	ФБА	ДА	ВТА
Тяговооруженность летательного аппарата (усл. ед.)	0.16 – 0,37	0.74 – 1,1	0.55 – 0,58	0.40 – 0,47	0.34 – 0,45
Контурность двигателей (усл.ед.)	4.4 – 8.5	0.5 – 0.59	0.53 – 0.57	1.4 – 1.45	4.0 – 4.5
Крейсерская скорость (км/ч)	700 – 900	>1000	900 – 1200	>800	600 – 900

Примечание (типы авиации): ИА - истребительная; ИБА - истребительно-бомбардировочная; ФБА - фронтовая бомбардировочная; ДА - дальняя; ВТА - военно-транспортная.

Тяговооружённость - отношение тяги ВС к весу ВС, точнее, силы тяги к силе тяжести. Это один из важнейших параметров, определяющих летно-технические характеристики ВС. Различают тяговооружённость как двигателя, так и летательного аппарата, во втором случае соотносят тягу от всех двигателей. От тяговооруженности зависят максимальная скорость ВС, время набора высоты (скороподъемность) и разгона

до заданной скорости, максимальная высота полета, длина разбега, а также его маневренные характеристики. Важной характеристикой самолета является стартовая тяговооруженность - отношение взлетной тяги силовой установки к его взлетному весу (см. табл. 1). Стартовая тяговооруженность истребителей и истребителей-бомбардировщиков самая высокая и составляла 0,74-1,1 усл. ед., а у военно-транспортных ВС – она минимальная (0,35-0,4 усл. ед.). Величина этого параметра практически всех типов ВС государственной авиации выше, чем у ВС гражданской авиации (0.16-0,37 усл. ед.). Тяговооруженность оказывает существенное влияние на шумность ВС, особенно при взлете, за счет большой мощности работы двигателя, использования форсажных режимов работы двигателей, быстрого набора скорости и высоты полета. Шум при взлете большинства ВС достигает максимальных значений и уменьшается пропорционально набору высоты полета.

У ВС гражданской авиации величина контурности двигателей существенно выше по сравнению с ВС государственной авиации. Степень двухконтурности - параметр турбореактивного двигателя (ТРД), показывающий отношение расхода воздуха через внешний контур двигателя к расходу воздуха через внутренний контур. Чем больше величина этого параметра, тем больший коэффициент полезного действия двигателя можно получить. ТРД обычно делятся на две категории: с высокой степенью двухконтурности (или турбовентиляторные) и ТРД с низкой степенью двухконтурности. Меньшая степень двухконтурности обеспечивает большую скорость реактивной струи, которая необходима для достижения высоких скоростей полёта. Она увеличивает удельный расход топлива. Большая степень двухконтурности обеспечивает меньшую скорость реактивной струи, истекающей из сопла. Это уменьшает удельный расход топлива, но также уменьшает максимальную скорость и увеличивает вес двигателя. Ещё одно преимущество ТРД перед реактивными двигателями с малой степенью двухконтурности заключается в том, что холодный воздух из внешнего контура, смешиваясь с горячими газами из турбины, снижает давление на выходе из сопла. Поэтому повышение контурности способствует уменьшению шумности двигателя за счет уменьшения скорости выброса газодинамических потоков из сопла и температуры реактивной струи, что снижает скорость расширения газовых потоков в атмосфере.

Из представленных выше данных следует, что ВС государственной авиации более шумные, поэтому при выборе критериев определения границ седьмой подзоны по уровню шума надо руководствоваться не только величиной $L_{\text{ЭКВ.}}$, но и максимальным уровнем шума ($L_{\text{Амакс.}}$) в соответствии с [3, 15]. В табл. 2 приведены уровни звука, которыми рекомендуем использовать при определении границ 7-й подзоны ПАТ.

Таблица 2

Уровни звука, которыми надо руководствоваться при определении границ 7-й подзоны ПАТ для аэродромов государственной авиации

Уровень звука	Дневное время (с 7.00 до 23.00)	Ночное время (с 23.00 до 7.00)
$L_{\text{ЭКВ.}}$, дБА	55	45
$L_{\text{Амакс.}}$, дБА	75	65

Из табл. 2 следует, что эксплуатации аэродромов государственной авиации на ПАТ эквивалентные ($L_{\text{АЭКВ.}}$) и максимальные ($L_{\text{Амакс.}}$) уровни авиационного шума не должны превышать значений в дневное время соответственно 55 и 75 дБА и в ночное время соответственно 45 и 65 дБА ночью. В дневное время допускается превышение $L_{\text{Амакс.}}$ на величину до 10 дБА при менее 10 пролетов в один день. При пролетах сверхзвуковых

самолетов превышение $L_{A\text{макс}}$ допускается на 10 дБА и $L_{A\text{экв}}$ – на 5 дБА в течение не более двух суток одной недели.

Ниже в качестве обоснования подхода для расчета границ СЗЗ по уровню шума приводим результаты исследований, выполненных на аэродром государственной авиации, на котором базируется смешанный тип ВС (ИА, ФБА, ВТА и др.). Измерения параметров авиационного шума на местности осуществлялись в соответствии с рекомендациями [15], для этой цели использовались поверенные шумомеры Brüel & Kjær Type 2250 с микрофонами 4193, обладающими круговой диаграммой направленности. Метеоусловия при проведении измерений составили: температура воздуха $230\text{С} \div 290\text{С}$; влажность – $(36 \div 61)\%$; атмосферное давление – $760,2 \div 761,0$ мм рт. ст.; скорость ветра – $(1 \div 3)$ м/с. При измерениях уровня шума использовали данные о типе ВС, его скорости и высоте пролета над измерительной точкой. Разнородные первичные результаты измерений были обработаны и приведены к одному расстоянию от источника шума (от ВС) до контрольной точки измерения, равному 1000 м в соответствии с выражением (1), где $\Delta L = L_{A\text{оп}} - L_{A\text{изм}}$, дБА.

В таблице 3 представлены усредненные значения нормируемых показателей авиационного шума на различных этапах полета ВС (взлет, пролет над аэродромом и посадка), расчет которых проведен к расстоянию 1000 м.

Таблица 3

Усредненные значения нормируемых показателей авиационного шума на местности (расчет на 1000 м)

Тип ВС	Средние значения, дБА					
	взлет		пролет		посадка	
	L_{ASmax}	$L_{A\text{экв}}$	L_{ASmax}	$L_{A\text{экв}}$	L_{ASmax}	$L_{A\text{экв}}$
Су-57	88,1	76,2	68,6	60,0	68,3	56,5
Су-25	84,4	73,8	80,2	67,9	-	-
Су-34	82,5	69,0	-	-	48,9	47,1
Ту-134	73,9	66,8	-	-	-	-
МиГ-31	73,9	65,4	81,9	70,5	51,2	49,3
МиГ-29	-	-	-	-	61,5	50,8
Су-35	76,4	65,3	70,6	60,3	53,5	50,1
Ми-8	63,8	53,5	55,3	50,2	56,0	50,5
АН-48	-	-	68,5	58,9	-	-
АН-26	-	-	67,7	55,9	-	-
АН-72	-	-	60,0	55,3	-	-

С учетом графика полетов аэродрома государственной авиации за полугодие был проведен расчет $L_{A\text{экв}}$ и $L_{A\text{макс}}$ для дневного и ночного периода времени проведен. В табл. 4 приведено общее количество вылетов ВС с аэродрома государственной авиации за этот период.

Таблица 4

Общее количество вылетов ВС с аэродрома государственной авиации за полугодие

Тип ВС	Кол-во вылетов	№ группы
Су-24	14	1
Су-25	60	3
Су-27	34	2
Су-30	54	2
Су-34	132	2
Су-35	15	2
Су-57	130	2
МиГ-29	2	2
МиГ-31	108	1
Ту-134	132	3
Ан-12	15	3
Ан-26	40	4
Ан-72	95	4
Ми-8	276	4
Итого вылетов	1107	

Из табл. 4 следует, что за полугодие анализируемого периода происходило 8,5 вылетов в сутки, в том числе ночных 1,3. Количество вылетов в разные месяцы и дни недели может существенно меняться, чёткого расписания вылетов на аэродромах государственной авиации нет. Небольшое количество вылетов, свидетельствует о том, что определяющим параметром, влияющим на размеры границ СЗЗ, будет величина максимального уровня звука для дневного и ночного времени. Для определения среднедневной и ночной акустической нагрузки целесообразно все типы ВС сгруппировать по группам, приблизительно равной акустической мощности. Используя данные табл. 1, предпринята попытка ранжировать усредненные данные нормируемых акустических показателей в зависимости от общей тяги (кгс). На рис. 1 представлен график распределения L_{ASmax} (дБА) в зависимости от общей тяги двигателей ВС (кгс).

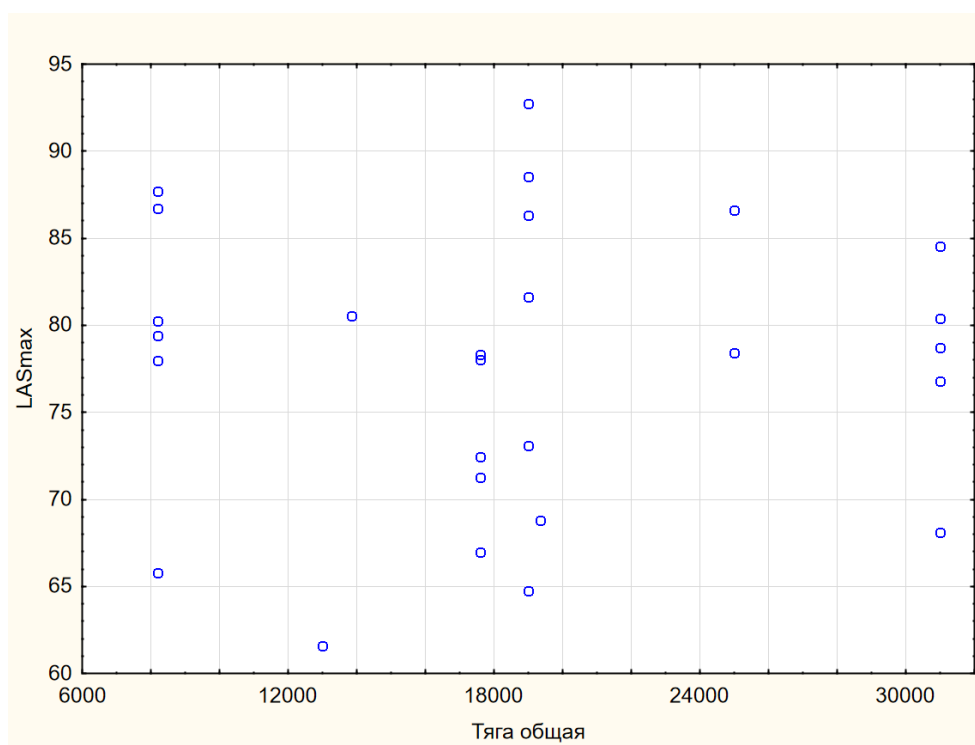


Рис. 1. Диаграмма рассеяния максимального уровня звука L_{ASmax} в зависимости от общей тяги двигателей ВС

Представленное распределение свидетельствует, что L_{ASmax} (а также и $L_{A_{ЭКВ}}$) от параметра тяги не зависит, коэффициент корреляции составил $r=0,02$. Методом экспертной оценки авиационными специалистами было предложено провести ранжирование ВС по уровню генерируемого шума. Оценку давали каждому типу ВС в относительных единицах по отношению к максимальной акустической мощности МиГ-31, которую оценили, как 1,0. Результаты представлены в табл. 5.

Таблица 5

Ранжирование ВС эксплуатируемых на аэродроме государственной авиации с помощью метода экспертной оценки

Ранжировка ВС (экспертная оценка)		№ Группы	Диапазон мощности	Поправка	
Тип ВС	Ранг			5	6
1	2	3	4	5	6
Ту-22	0,995	1	11%	0	0 дБ
Су-24	0,89				
Су-27	0,72				
Су-34	0,7	2	12%	0,677	-3 дБ
Су-30	0,69				
Су-57	0,68				
Су-35	0,67				
МиГ-29	0,6				
Ту-134	0,52	3	5%	0,497	-6 дБ
Ан-12	0,5				
Су-25	0,47				
Ан-26	0,37	4	11%	0,32	-10 дБ
Ан-72	0,34				
Ми-8	0,26				

Все типы ВС объединены в 4 группы (см. табл. 5). Величина ранга представлена в столбце 2 табл. 5. Критерием границы группы была взята разница между максимальным и минимальным значением ранга не более 12% (см. столбец 4). Для каждой группы рассчитано среднее значение ранга (см. столбец 5) и определена поправка к эквивалентному и максимальному уровню звука (см. столбец 6).

Далее, для каждой группы, с учетом поправки, приведенной в столбце 6 табл.5, рассчитаны эквивалентные и максимальные значения уровня звука, приведенные к 1000 м от ВС. Результаты расчетов приведены в табл. 6.

Таблица 6

Усредненные значения максимального и эквивалентного уровня звука на расстоянии 1000 м от ВС для всех групп, эксплуатируемых на аэродроме государственной авиации

Группа	L_{ASmax} , дБА	$L_{AЭКВ}$, дБА
1	81,9	70,5
2	78,9	67,5
3	75,9	64,5
4	71,9	60,5

На основании количества вылетов (см. табл. 4) и объединения ВС по группам (см. табл. 6) составлен среднедневной и средненочной график полетов ВС на аэродроме государственной авиации, который представлен в табл. 7.

Таблица 7

Рекомендуемый среднедневной и средненочной график полетов ВС на аэродроме государственной авиации

Кол-во вылетов ВС по группам		Вылет за день	Вылет за ночь
№ группы	Кол-во вылетов		
1	122	1	1
2	367	3	1
3	207	2	1
4	411	3	1
Всего:	1107	9	4

Итак, в среднем за день осуществляются полет одного ВС из 1-й группы, три полета ВС из группы 2 (см. табл.7), 2 полета ВС из группы 3 и три полета ВС из группы 4. Всего 9 среднедневных полетов. При ночных полетах летают по одному из каждой группы, то есть всего 4 полета. Поэтому величина 9 среднедневных была выбрана при установлении границ СЗЗ с учетом требований ГОСТ 22283-2014 [15].

Используя среднесуточный и средненочной график вылетов ВС всех 4-х групп на аэродроме, определили $L_{A_{ЭКВ}}$ в соответствии с уравнением:

$$L_{ЭКВ,Т,оп} = 10 \cdot Lg \left[\frac{1}{T} \left(\sum_{i=1}^{N_1} 10^{0.1 \cdot L_{A_{ЭКВ}гр1}} + \sum_{i=1}^{N_2} 10^{0.1 \cdot L_{A_{ЭКВ}гр2}} + \sum_{i=1}^{N_3} 10^{0.1 \cdot L_{A_{ЭКВ}гр3}} + \sum_{i=1}^{N_4} 10^{0.1 \cdot L_{A_{ЭКВ}гр4}} \right) \right] \quad (2)$$

где N_1, N_2, N_3, N_4 - количество вылетов ВС групп 1, 2, 3 и 4 соответственно (см. табл. 7), $L_{A_{ЭКВ}гр1}, L_{A_{ЭКВ}гр2}, L_{A_{ЭКВ}гр3}, L_{A_{ЭКВ}гр4}$ - усредненные значения эквивалентного уровня звука на расстоянии 1000 м от ВС для соответствующих групп (см. табл. 6), $T=50$ с.

Для расчета $L_{A_{ЭКВ}}$ в дневное время была определена сумма от пролета 9 ВС всех четырех групп с учетом длительности каждого пролета. По результатам измерений длительность шума составила 50 с (стандартное отклонение 19,4 с). В последующем определили $L_{A_{ЭКВ}}$ с учетом длительности дневного времени, то есть за 16 ч ($T_0= 57600$ с), используя уравнение:

$$L_{A_{ЭКВ}, день} = L_{A_{ЭКВ}, Т} + 10Lg(T/T_0) \text{ дБ}, \quad (3)$$

где T - суммарное время всех пролетов за день, $T_0= 28800$ с – продолжительность ночного времени при расчете эквивалентного уровня звука.

На основании выражения (1) рассчитали расстояния для дневного и ночного времени с учетом ПДУ $L_{A_{ЭКВ}}$ и $L_{A_{макс}}$ (см. табл. 2) для территории жилой застройки при пролете 9 ВС за день и 4 ВС за ночь. Для расчета безопасных расстояний по критерию не превышения $L_{A_{макс}}$ использованы результаты измерения при пролете МиГ-31. Высота полетов ВС составляет 1000 м над уровнем земли. Результаты расчетов безопасных расстояний приведены в табл. 8.

Таблица 8

Безопасные расстояния на территории жилой застройки при пролете ВС государственного аэродрома по критерию не превышения ПДУ эквивалентного и максимального звука в соответствии с требованиями законодательства

Безопасное расстояние от ВС, м	ПДУ по $L_{A_{\max}}$ (ГОСТ 22283-2014)		Безопасное расстояние от глиссады, м
	День	Ночь	
2213	75,0	-	1974
6998	-	65,0	6927
При менее 10 вылетов с превышением максимального уровня звука			
700	85	-	1974

Из табл. 8 следует, что безопасные расстояния от глиссады для $L_{A_{\max}}$ составляют 1974 м и 6927 м соответственно для дня и ночи. При количестве вылетов менее 10 безопасное расстояние для дневного времени будет соблюдено при высоте полета более 700 м, а для ночного времени – оно не изменится и составит 6927 м.

На основании результатов измерений и соответствующих расчетов на карту ПАТ наносят линии равных $L_{A_{\max}}$ и $L_{A_{\text{экв}}}$ (см. табл. 2), что будет соответствовать границе СЗЗ шумового воздействия. Не реже одного раза в год необходимо проводить проверку границ уровней звука. При выборе точек измерения надо исключить наличие препятствий для прохождения акустических волн. Требуется проводить измерение не менее трех раз в каждой точке за пятиминутный интервал времени.

Для обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия по уровню шума на ПАТ государственной авиации необходимо [21–25]:

- разработать методику определения границ 7-й подзоны по уровню шума ПАТ аэродромов государственной авиации;
- запретить полеты ночью ВС на режимах работы двигателей, при которых уровни звука превышают допустимые на ПАТ;
- использовать шумозащитные экраны, стеклопакеты в жилых помещениях и т.д.;
- организовать мониторинг уровня шума на ПАТ.

3. Электромагнитное воздействие

При определении 7-й подзоны электромагнитного воздействия на население ПАТ необходимо руководствоваться перечнем средств радиотехнического обеспечения полетов ВС и авиационной электросвязи, наличие которых определяется инструкцией по производству полетов в районе аэродрома государственной авиации. При расчете СЗЗ надо учитывать следующие факторы: место дислокации передающей антенны; диаграмма направленности передающей антенны, а также ее боковых лепестков; диаграмма сканирующей антенны с учетом горизонтальных и вертикальных углов наклона; высота расположения и подъема антенны; мощность станции; ландшафт прилегающей территории [26–31].

Граница СЗЗ электромагнитного воздействия определяется по уровню электромагнитного поля, который соответствует требованиям санитарных правил и норм с учетом методик расчета интенсивности электромагнитного излучения радиочастот [32–34]. ПДУ зависят от частотных характеристик источников излучения, которые приведены в СанПиН [35]. Для нормирования электромагнитного излучения используются величина плотности потока энергии Вт/м². В табл. 9 приведены ПДУ электромагнитной энергии

радиочастотного диапазона для территории жилой застройки и мест массового отдыха.

Таблица 9

ПДУ электромагнитной энергии радиочастотного диапазона для территории жилой застройки и мест массового отдыха

Диапазон частот	30 кГц-300 кГц	0,3 - 3 МГц	3-30 МГц	30-300 МГц	300МГц-300 ГГц
Предельно допустимые уровни ЭМИ РЧ	25,0 В/м	15,0 В/м	10,0 В/м	3,0 В/м	10,0 мкВт/см ² 25 мкВт/см ^{2*}

Примечание: * – для случаев облучения от антенн, работающих в режиме кругового обзора или сканирования.

Особенностью аэродромных радиотехнических средств (РТС) является наличие главного и боковых лепестков диаграммы направленности антенны, что необходимо учитывать при расчете границ СЗЗ [32, 36]. Для аэродромов государственной авиации характерно наличие большого количества РТС (от 10 шт. и более) различной мощности. Для расчета границ СЗЗ государственной авиации на начальном этапе надо провести систематизацию действующих РТС на территории аэродрома и вне его. Существенное влияния при определении СЗЗ оказывает ландшафт аэродрома и ПАТ. При наличии однотипных РТС (основные и резервные), расположенных рядом, в расчет берется одна РТС с усредненными координатами. Определение границы 7-й подзоны проводится по наиболее мощной РТС [4].

Как правило, наиболее мощные РТС работают практически с круговым обзором (до 360°) при узкой диаграмме направленности (от долей до единиц градусов) и высокой частоте импульсов (от 200 до 1000 шт.). Одновременное воздействие импульсов двух и более РТС в одной точке на ПАТ крайне низкая. Кроме того, надо учитывать наличие приводных радиостанций, которые расположены вне территории аэродрома в створе взлетно-посадочной полосы. Для них тоже должны быть определены СЗЗ, но в большинстве случаев площади этих зон незначительные.

Для подтверждения правильности расчета СЗЗ на ее границы в контрольных точках проводят измерения уровней электромагнитного поля в контрольных точках. При определении точек необходимо учитывать ландшафт и отсутствие препятствий, влияющих на распространение радиоволн. Измерения в выбранных точках необходимо проводить с соблюдением следующих условий: не менее 3 раз с определением величины максимальной напряженности и плотности потока энергии электромагнитного поля, за пятиминутный интервал, при работе ближайшей РТС с максимальной мощностью.

Таким образом, особенностями электромагнитного воздействия аэродромов государственной авиации являются:

- большое количество РТС,
- наличие мощных РТС,
- периодически внедрение новых РТС или их модификация,
- размещение РТС вне аэродромной территории.

Считаем, что на аэродромах государственной требуется ежегодное уточнение границы 7-й подзоны электромагнитного воздействия на население ПАТ. Критерием зон безопасности по этому фактору являются требования СанПин 2.1.2.2645-10 [37] и СанПин 2.1.8/2.2.4.2302-07 [38].

4. Химическое загрязнение

При определении границы 7-й подзоны по концентрации загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосферном воздухе осуществляется с учетом типов эксплуатации ВС на данном аэродроме и их тактико-технические данные, особенности организации полетов (при взлете, посадке и других летных операциях в районе аэродрома и ПАТ), графика полетов ВС (в дневное и ночное время), ландшафта и климатических параметров района дислокации аэродрома. Необходимо оценить загазованность ПАТ с составлением карты рассеивания ЗВ при выбросе их в атмосферу через сопло двигателей после проведения измерений вдоль стандартных маршрутов полета в зоне взлета и посадки ВС.

Формирование уровней концентраций ЗВ в ПАТ осуществляется под воздействием факторов, включающих интенсивность циклов «взлет–посадка», скорость при взлете и посадке, тип ВС, параметры взлетной полосы; факторов, влияющих на перенос и рассеивание ЗВ в пространстве: направление и скорость ветра, температура и влажность воздуха, состояние погоды и атмосферы, вид и высота близлежащей застройки, ширина ПАТ [39–43].

Анализ выбросов ЗВ в атмосферу проводится с учётом фонового загрязнения для веществ, уровень загрязнения которых на границе жилой или рекреационной зоны превышает 0,1 предельно допустимой концентрации (ПДК) согласно СанПиНу 2.1.6.1032-01, ГН 2.1.6.3492-17, ГН 2.2.5.3532-18 [44–46].

При взлете шлейф ЗВ перемещается за ВС с сохранением концентраций в конусе отработавших газов. Рассеивание по высоте конуса отработавших газов за счет высокой турбулентности струи заканчивается на расстоянии порядка 20 м от сопла двигателя. Замеры концентраций перпендикулярно оси взлетной полосы показали, что на расстоянии 50–55 м от кромки взлетной полосы наблюдаются фоновые концентрации ЗВ. Процесс рассеивания последних в атмосфере осуществляется за счет перемещения их вместе с потоками воздуха с учетом воздействия вертикальной составляющей диффузионной скорости. С увеличением скорости ветра увеличивается и расстояние, на которое они разносятся. В основном ПАТ загрязняются по направлению оси взлетной полосы [47].

Принято считать, что основным источником химического загрязнения на аэродроме является топливо, используемое для работы силовых установок ВС. В настоящее время в авиации используются два вида топлива: авиационный бензин и авиационный керосин. Предпочтение отдается последнему. Авиационные керосины это смесь парафиновых, нафтеновых и ароматических углеводородов с содержанием последних до 20–22%. Они обладают общетоксическим, наркотическим действием, а их пары вызывают раздражение слизистых оболочек глаз и верхних дыхательных путей. Токсическими свойствами обладают и продукты, образующиеся при сгорании авиационного керосина: окись углерода CO (угарный газ), окислы азота NO_x , углеводороды C_nH_{2n+2} , двуокись углерода (O_2). Наибольшее количество оксида углерода и углеводородных соединений в окружающую среду поступает при работе двигателей во время взлёта и при посадке, а в процессе полёта образуется максимальное количество оксидов азота. Для повышения октанового числа авиационного топлива используются антидетонаторы (тетроэтилсвинец, этилбромид и др.), которые имеют сильную токсичность. Это надо учитывать при организации исследований химического загрязнения воздуха и территории ПАТ.

На ВС государственной авиации для улучшения тактико-технических характеристик полета используются и другие виды топлива с различными добавками, которые могут иметь повышенную токсичность и агрессивность.

На аэродромах государственной авиации целенаправленно выделяются

специальные зоны с повышенным содержанием ЗВ:

- зона аварийного слива авиационного топлива и зона сброса топливных баков, которые требуют повышенного контроля концентрации ЗВ как на территории данной зоны, так и на прилегающей ПАТ;

- зона (полигон) применения оружия, поэтому территория может быть загрязнена взрывчатыми веществами и продуктами их взрыва.

Таким образом, на аэродромах гражданской авиации химическое загрязнение ПАТ имеет место по направлению оси взлетной полосы и площадь их невелика, которая перекрывается границами зоны шума. На аэродромах государственной авиации химическое загрязнение имеет более широкое распространение. Поэтому определение ЗВ атмосферного воздуха и ПАТ требует включения в документ, которым будет предусмотрено определение границы СЗЗ 7-й подзоны. В качестве критерия выброса ЗВ веществ в атмосферу на границе жилой или рекреационной зоны надо использоваться уровень концентрации химических вредных веществ для населения, который не должен превышает 0,1 ПДК [44–46].

Заклучение

При разработке методических рекомендаций по расчету границ СЗЗ гражданской авиации учитываются такие факторы как типы эксплуатируемых ВС и их тактико-технические данные, особенности организации полетов, ландшафт аэродрома, график полетов ВС (с учетом дневного и ночного периода суток) и др. В гражданской авиации создана база данных, в основу которой были положены многолетние широкомасштабные зарубежные и отечественные исследования, и разработано программное обеспечение. В государственной авиации в настоящее время этих данных нет. Поэтому считаем, что для расчета границ СЗЗ аэродромов государственной авиации целесообразно задачу упростить и использовать инженерные методические подходы с учетом интегральных и усредненных акустических характеристик ВС, так как решить оперативно аналогичную задачу достаточно трудоемко.

Из представленных выше данных видно, что в государственной авиации имеются специфические факторы, влияющие на уровень шума на местности. Предлагаем при определении СЗЗ шумового воздействия этих аэродромов в качестве основных критериальных параметров использовать максимальный и эквивалентный уровни звука. С помощью них можно построить линии равных уровней громкости для границы 7-й подзоны ПАТ. Кроме того, эти параметры надо использовать при выборе мероприятий по санитарно-эпидемиологическому благополучию населения по шуму.

При определении границ СЗЗ аэродромов государственной авиации, кроме шумового воздействия, необходимо проводить исследования электромагнитного воздействия и уровня химического загрязнения.

Наличие вредных факторов на аэродромах государственной авиации (шум, электромагнитное излучение, загрязняющие вещества) требует организации систематического контроля. Рекомендации по санитарно-эпидемиологическому благополучию населения, проживающего на ПАТ, должны разрабатываться для конкретного аэродрома государственной авиации и согласовываться с территориальной администрацией и филиалом Роспотребнадзора, то есть организациями в чьем ведомстве находятся территория аэродрома и прилегающая к нему территория.

Список литературы

1. Солдатов С.К., Зинкин В.Н., Богомолов А.В., и др. Фундаментальные и прикладные аспекты авиационной медицинской акустики. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. – 216 с.
2. Зинкин В.Н., Шешегов П.М. Современные проблемы шума в авиации // Проблемы безопасности полетов. – 2014. – № 5. – С. 3-25.
3. Драган С.П., Дроздов С.В., Солдатов С.К. и др. Обоснование методических подходов к определению границ санитарно-защитных зон приаэродромной территории по уровню шумового воздействия // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2021. – Т. 55, № 5. – С. 85-93.
4. Солдатов С.К., Зеленин А.Н., Драган С.П. и др. Методика определения зоны запрета размещения объектов на приаэродромных территориях по уровню электромагнитного воздействия на население и опыт ее применения // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2021. – Т. 55, № 6. – С. 75-81.
5. СанПиН 1.23685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
6. Зинкин В.Н., Богомолов А.В., Ахметзянов И.М., Шешегов П.М. Экологические аспекты безопасности жизнедеятельности населения, подвергающегося действию авиационного шума // Теоретическая и прикладная экология. – 2011. – № 3. – С. 97-101.
7. Зинкин В.Н., Богомолов А.В., Кукушкин Ю.А., Солдатов С.К. Медико-социальные аспекты экологической безопасности населения, подвергающегося действию авиационного шума // Экология промышленного производства. – 2011. – № 2. – С. 9-14.
8. Солдатов С.К., Зинкин В.Н., Кукушкин Ю.А. и др. Анализ антропоэкологической опасности шума, образующегося при заходе самолета на посадку // Экология промышленного производства. – 2013. – № 4 (84). – С. 76-81.
9. Методика установления (изменения) седьмой подзоны приаэродромной территории: Методические рекомендации МР 2.5/ 4.3.0258-21. – М., 2021. – 28 с.
10. Богомолов А.В., Зинкин В.Н., Драган С.П., Солдатов С.К. Антропоэкологические аспекты безопасности эксплуатации аэродромов, аэропортов и авиационных предприятий // Национальная безопасность / nota bene. – 2016. – № 1 (42). – С. 56-62.
11. Зинкин В.Н., Солдатов С.К., Драган С.П., Пирожков М.В. Моделирование аэродинамического при заходе самолета на посадку // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. – 2013. – № 11. – С. 53-60.
12. Зинкин В.Н., Солдатов С.К., Драган С.П. и др. Авиационный шум и проблемы безопасности полетов // Проблемы безопасности полетов. – 2013. – № 5. – С. 3-12.
13. ICAO Doc 9501 AN/929. Том 1. Методики сертификации воздушных судов по шуму.
14. Liu S., Sparrow V., Makino Y. Establishing Noise Standards for Civil Supersonic Aircraft: Status Report // ICAO Environmental Report. – 2013. – Pp. 73-79.
15. ГОСТ 22283-2014 Шум авиационный. Допустимые уровни шума на территории жилой застройки и методы его измерения.
16. Оценка риска здоровью населения от воздействия транспортного шума: Методические рекомендации МР 2.1.10. 0059-12.
17. Воздушный кодекс Российской Федерации от 19.03.1997 № 60-ФЗ (ред. от 02.07.2021).
18. Федеральные авиационные правила. Приказ Минтранса России от 12.01.2022 № 10.
19. Dragan S.P., Bogomolov A.V., Zinkin V.N. Methodical support of monitoring the acoustic safety of flight personnel // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Pp. 122-127. –

DOI: 10.1063/1.5121944.

20. Bogomolov A.V., Dragan S.P., Zinkin V.N., Alekhin M.D. Acoustic Factor Environmental Safety Monitoring Information System // Proceedings of 22nd International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM 2019). – SPb., 2019. – Pp. 215-218. – DOI: 10.1109/SCM.2019.8903729.

21. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом / Под ред. Н.И. Иванова. – М., 2008. – 424 с.

22. Картышев О.А. Системы контроля шума как средство предупреждения отклонения воздушных судов от установленных маршрутов в районе аэродрома // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2007. – № 123. – С. 125-135.

23. Картышев О.А., Николайкин Н.И. Критерии оценки авиационного шума для зонирования приаэродромной территории аэропортов и обоснования защитных мероприятий // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 30-40.

24. Зинкин В.Н., Рыженков С.П., Солдатов С.К. и др. Гигиеническая обстановка на территориях примыкающих к глиссаде аэродрома // Здоровье населения и среда обитания. – 2014. – № 6 (255). – С. 38-40.

25. Zaporozhets O., Tokarev V., Attenborough K. Aircraft Noise: Assessment, Prediction, and Control. – Abingdon: SPON Press, 2011. – 432 p.

26. Redlarski G., Lewczuk B., Żak A. et al. The influence of electromagnetic pollution on living organisms: historical trends and forecasting changes // Biomed. Res. Int. – 2015. – Pp. 1-18. – DOI: 10.1155/2015/234098.

27. Егоров В.В., Мусин Р.М., Тасейко О.В., Потылицына Е.Н. Негативное влияние радио и электрооборудования на здоровье технического персонала аэропорта // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2015. – Т. 2, № 11. – С. 32-33.

28. Kaszuba-Zwońska J., Gremba J., Gałdzińska-Calik B. et al. Electromagnetic field induced biological effects in humans // Przegl. Lek. – 2015. – Vol. 72, № 11. – Pp. 636-641.

29. Liao W., Nagai K., Wang J. An evaluation method of electromagnetic interference on bio-sensor used for wearable robot control // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2020. – Vol. 62, № 1. – Pp. 36-42. – DOI: 10.1109/TEMC.2019.2896974.

30. Надежкина Е.В., Тушанина О.В. Электромагнитное воздействие от ракетно-космической деятельности и авиационного комплекса // Проблемы региональной экологии. – 2019. – № 4. – С. 22-24.

31. Мусин Р.М., Потылицына Е.Н. Влияние радиоэлектрооборудования на здоровье технического персонала аэропорта // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2016. – Т. 1, № 12. – С. 877-879.

32. Шандала М.Г., Зуев В.Г., Ушаков И.Б., Попов В.И. Справочник по электромагнитной безопасности работающих и населения. – Воронеж, 1998. – 82 с.

33. Пальцев Ю.П., Походзей Л.В. Рубцова Н.Б. и др. Современные принципы и средства защиты работников от неблагоприятного воздействия электромагнитных полей радиочастотного диапазона // Гигиена и санитария. – 2017. – Т. 96, № 5. – С. 451-455.

34. Рубцова Н.Б., Токарский А.Ю., Перов С.Ю. Оптимизация принципов совершенствования защиты работающих и населения от электромагнитных полей различных частотных диапазонов // Медицина труда и промышленная экология. – 2017. – № 9. – С. 164-165.

35. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ). Санитарные правила и нормы.

36. Mou J. Research on the design of electromagnetic environment EMC evaluation system for aviation station // 11th Int. Conf. on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE). – Athens, Greece, 2020. – Pp. 272-275. – DOI: 10.1109/ICMAE50897.2020.9178897.
37. СанПиН 2.1.2.2645-10 Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях.
38. СанПиН 2.1.8/2.2.4.2302-07 Гигиенические требования к размещению и эксплуатации радиотехнических объектов.
39. Голубева А.О., Ларичкин В.В., Коротаева Т.А. Численный расчет рассеивания загрязняющих веществ от эксплуатации самолетов на прилегающих к аэропортам и аэродромам территориях // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2014. – № 1 (22). – С. 52-61.
40. Картышев О.А. Анализ методик расчета выбросов загрязняющих веществ двигателями воздушных судов гражданской авиации // Научный вестник Государственного научно-исследовательского института гражданской авиации. – 2011. – № 1 (312). – С. 102-107.
41. Большунов Ю.А., Мельников Б.Н., Николайкин Н.И. Оценка рисков здоровью населения и лётного состава гражданской авиации при воздействии шума и выбросов загрязняющих веществ // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2013. – № 192. – С. 63-72.
42. Картышев О.А., Медведев Ю.В. Расчет концентраций загрязняющих веществ от аэропортового комплекса // Безопасность в техносфере. – 2010. – № 2. – С. 6-9.
43. Дмитриева Т.М. Оценка выбросов в атмосферу загрязняющих веществ и парниковых газов самолетами гражданской авиации России // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 9. – С. 41-48.
44. СанПиН 2.1.6.1032-01 Гигиенические требования к обеспечению качества атмосферного воздуха населенных мест.
45. ГН 2.2.5.3532-18 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны".
46. ГН 2.1.6.3492-17 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений".
47. Картышев О.А. Метод расчета границ жилой застройки в районе аэропорта по критерию "выбросы загрязняющих веществ авиадвигателями" // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2007. – № 123. – С. 105-112.

References

1. Soldatov S.K., Zinkin V.N., Bogomolov A.V., et al. Fundamental and applied aspects of aviation medical acoustics. – M.: FIZMATLIT, 2019. – 216 p.
2. Zinkin V.N., Sheshegov P.M. Modern problems of noise in aviation // Problems of flight safety. – 2014. – No. 5. – pp. 3-25.
3. Dragan S.P., Drozdov S.V., Soldatov S.K., etc. Substantiation of methodological approaches to determining the boundaries of sanitary protection zones of the aerodrome territory by the level of noise exposure // Aerospace and environmental medicine. – 2021. – Vol. 55, No. 5. – Pp. 85-93.
4. Soldatov S.K., Zelenin A.N., Dragan S.P., etc. Methodology for determining the zone of prohibition of the placement of objects on aerodrome territories by the level of electromagnetic impact on the population and the experience of its application // Aerospace and environmental medicine. – 2021. – Vol. 55, No. 6. – Pp. 75-81.

5. SanPiN 1.23685-21 "Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans".
6. Zinkin V.N., Bogomolov A.V., Akhmetzyanov I.M., Sheshegov P.M. Ecological aspects of life safety of the population exposed to aviation noise // Theoretical and applied ecology. – 2011. – No.3. – Pp. 97-101.
7. Zinkin V.N., Bogomolov A.V., Kukushkin Yu.A., Soldatov S.K. Medical and social aspects of environmental safety of the population exposed to aviation noise // Ecology of industrial production. – 2011. – No.2. – Pp. 9-14.
8. Soldatov S.K., Zinkin V.N., Kukushkin Yu.A. et al. Analysis of the anthropoecological danger of noise generated during the landing of the aircraft // Ecology of industrial production. – 2013. – № 4 (84). – Pp. 76-81.
9. Methodology for establishing (changing) the seventh subzone of the aerodrome territory: Methodological recommendations of the MR 2.5/ 4.3.0258-21 . – M., 2021. – 28 p.
10. Bogomolov A.V., Zinkin V.N., Dragan S.P., Soldatov S.K. Anthropoecological aspects of the safety of the operation of airfields, airports and aviation enterprises // National Security / nota bene. – 2016. – № 1 (42). – Pp. 56-62.
11. Zinkin V.N., Soldatov S.K., Dragan S.P., Pirozhkov M.V. Modeling of aerodynamic during landing approach // Flight. All-Russian Scientific and Technical Journal. – 2013. – No. 11. – Pp. 53-60.
12. Zinkin V.N., Soldatov S.K., Dragan S.P., etc. Aviation noise and flight safety problems // Problems of flight safety. – 2013. – No.5. – Pp. 3-12.
13. ICAO Doc 9501 AN/929. Volume 1. Methods of aircraft noise certification.
14. Liu S., Sparrow V., Makino Y. Establishing Noise Standards for Civil Supersonic Aircraft: Status Report // ICAO Environmental Report. – 2013. – Pp. 73-79.
15. GOST 22283-2014 Aviation noise. Permissible noise levels in residential buildings and methods of its measurement.
16. Assessment of the risk to public health from exposure to traffic noise: Methodological recommendations MP 2.1.10. 0059-12.
17. The Air Code of the Russian Federation of 19.03.1997 No.60-FZ (ed. of 02.07.2021).
18. Federal Aviation Regulations. Order of the Ministry of Transport of Russia dated 12.01.2022 No.10.
19. Dragan S.P., Bogomolov A.V., Zinkin V.N. Methodological support of monitoring the acoustic safety of flight personnel // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Pp. 122-127. – DOI: 10.1063/1.5121944.
20. Bogomolov A.V., Dragan S.P., Zinkin V.N., Alekhin M.D. Acoustic Factor Environmental Safety Monitoring Information System // Proceedings of the 22nd International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM 2019). – SPb., 2019. – Pp. 215-218. – DOI: 10.1109/SCM.2019.8903729.
21. Engineering acoustics. Theory and practice of noise control / Edited by N.I. Ivanov. – M., 2008. – 424 p.
22. Kartyshev O.A. Noise control systems as a means of preventing aircraft deviation from established routes near the airfield // Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation. – 2007. – No. 123. – Pp. 125-135.
23. Kartyshev O.A., Nikolaikin N.I. Criteria for assessing aviation noise for zoning the aerodrome territory of airports and justification of protective measures // Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation. – 2017. – Vol. 20, No. 3. – Pp. 30-40.
24. Zinkin V.N., Ryzhenkov S.P., Soldatov S.K., etc. Hygienic situation in the territories

adjacent to the glide path of the airfield // Public health and habitat. – 2014. – № 6 (255). – Pp. 38-40.

25. Zaporozhets O., Tokarev V., Attenborough K. Aircraft Noise: Assessment, Prediction, and Control. – Abingdon: SPON Press, 2011. – 432 p.

26. Redlarski G., Lewczuk B., Żak A. et al. The influence of electromagnetic pollution on living organisms: historical trends and forecasting changes // Biomed. Res. Int. – 2015. – Pp. 1-18. – DOI: 10.1155/2015/234098.

27. Egorov V.V., Musin R.M., Taseyko O.V., Potylitsyna E.N. Negative influence of radio and electrical equipment for the health of airport technical personnel // Actual problems of aviation and cosmonautics. – 2015. – Vol. 2, No. 11. – Pp. 32-33.

28. Kaszuba-Zwońska J., Gremba J., Gałdzińska-Calik B. et al. Electromagnetic field induced biological effects in humans // Przegl. Lek. – 2015. – Vol. 72, № 11. – Pp. 636-641.

29. Liao W., Nagai K., Wang J. An evaluation method of electromagnetic interference on bio-sensor used for wearable robot control // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2020. – Vol. 62, № 1. – Pp. 36-42. – DOI: 10.1109/TEMC.2019.2896974.

30. Nadezhkina E.V., Tushanina O.V. Electromagnetic impact from rocket and space activities and aviation complex // Problems of regional ecology. – 2019. – No. 4. – pp. 22-24.

31. Musin R.M., Potylitsyna E.N. The influence of radio-electrical equipment on the health of airport technical personnel // Actual problems of aviation and cosmonautics. – 2016. – Vol. 1, No. 12. – Pp. 877-879.

32. Shandala M.G., Zuev V.G., Ushakov I.B., Popov V.I. Handbook on electromagnetic safety of workers and the public. – Voronezh, 1998. – 82 p.

33. Fingers Yu.P., Pokhodzey L.V. Rubtsova N.B. et al. Modern principles and means of protecting workers from the adverse effects of electromagnetic fields of the radio frequency range // Hygiene and sanitation. – 2017. – Vol. 96, No. 5. – Pp. 451-455.

34. Rubtsova N.B., Tokarsky A.Yu., Perov S.Yu. Optimization of the principles of improving the protection of workers and the population from electromagnetic fields of various frequency ranges // Labor medicine and industrial ecology. – 2017. – No. 9. – Pp. 164-165.

35. SanPiN 2.2.4/2.1.8.055-96 . Electromagnetic radiation of the radio frequency range (EMR RF). Sanitary rules and regulations.

36. Mou J. Research on the design of electromagnetic environment EMC evaluation system for aviation station // 11th Int. Conf. on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE). – Athens, Greece, 2020. – Pp. 272-275. – DOI: 10.1109/ICMAE50897.2020.9178897.

37. SanPiN 2.1.2.2645-10 Sanitary and epidemiological requirements for living conditions in residential buildings and premises.

38. SanPiN 2.1.8/2.2.4.2302-07 Hygienic requirements for the placement and operation of radio engineering facilities.

39. Golubeva A.O., Larichkin V.V., Korotaeva T.A. Numerical calculation of the dispersion of pollutants from aircraft operation in territories adjacent to airports and airfields // Reports of the Academy of Sciences of the Higher School of the Russian Federation. – 2014. – № 1 (22). – Pp. 52-61.

40. Kartyshev O.A. Analysis of methods for calculating emissions of pollutants by engines of civil aviation aircraft // Scientific Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation. – 2011. – № 1 (312). – Pp. 102-107.

41. Bolshunov Yu.A., Melnikov B.N., Nikolaikin N.I. Assessment of risks to public health and flight personnel of civil aviation under the influence of noise and emissions of pollutants // Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation. – 2013. – No. 192. – Pp. 63-72.

42. Kartyshev O.A., Medvedev Yu.V. Calculation of concentrations of pollutants from

the airport complex // Safety in the technosphere. – 2010. – No. 2. – Pp. 6-9.

43. Dmitrieva T.M. Assessment of emissions of pollutants and greenhouse gases into the atmosphere by Russian civil aviation aircraft // Meteorology and hydrology. – 2014. – No. 9. – Pp. 41-48.

44. SanPiN 2.1.6.1032-01 Hygienic requirements for ensuring the quality of atmospheric air in populated areas.

45. GN 2.2.5.3532-18 "Maximum permissible concentrations (MPC) of harmful substances in the air of the working area".

46. GN 2.1.6.3492-17 "Maximum permissible concentrations (MPC) of pollutants in the atmospheric air of urban and rural settlements".

47. Kartyshev O.A. Method of calculating the boundaries of residential development in the airport area according to the criterion "emissions of pollutants by aircraft engines" // Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation. – 2007. – No. 123. – Pp. 105-112.

УДК: 629.5.015.5
OECD: 01.03. AA

Экспериментальные исследования эффективности полосового вибропоглотителя с однотоочечным креплением

Кирпичников В.Ю.¹, Кошечев А.П.², Кудаев А.В.^{3*}
^{1,2} ФГУП «Крыловский государственный научный центр»
³ Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
^{1,2,3} г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

Объектом данной работы является пластина – элемент инженерной конструкции, расположенный между ее соседними подкреплениями. Цель работы - исследование эффективности вибропоглотителя в виде задемпфированной полосы с креплением вне ее геометрического центра. Измерены спектры вибрации пластины без вибропоглотителя и при его установке. Эффективность вибропоглотителя определена по разнице уровней вибрации при его отсутствии и наличии. Наличие вибропоглотителя приводит к уменьшению уровней вибрации в широком диапазоне низких и средних звуковых частот. Показана возможность существенного снижения вибрации пластин инженерных конструкций путем установки на них малогабаритных вибропоглотителей с большими потерями колебательной энергии. Приведены значения эффективности вибропоглотителя в узкополосных и третьоктавных полосах, полученные для нескольких мест его установки.

Ключевые слова: пластина, входная вибровозбудимость, резонансные частоты, вибропоглотитель, крепление вне геометрического центра, эффективность.

Experimental studies of the effectiveness of a strip vibration absorber with a single-point fastening

Kirpichnikov V.Yu.¹, Koshcheev A.P.², Kudaev A.V.^{3*}
^{1,2} Federal State Unitary Enterprise 'Krylovsky State Scientific Center'
³ Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov
^{1,2,3} St. Petersburg, Russia

Abstract

The object of this work is a plate - an element of an engineering structure located between its adjacent reinforcements. The purpose of the work is to study the effectiveness of a vibration absorber in the form of a damped strip with fastening outside its geometric center. The vibration spectra of the plate without vibration absorber and with its installation were measured. The effectiveness of the vibration absorber is determined by the difference in vibration levels in its absence and presence. The presence of a vibration absorber leads to a decrease in vibration levels in a wide range of low and medium sound frequencies. The possibility of a significant reduction in the vibration of plates of engineering structures by installing small-sized vibration absorbers with large losses of vibrational energy is shown. The efficiency values of the vibration absorber in narrow-band and one-third-octave bands, obtained for several places of its installation, are given.

Keywords: plate, input vibration excitability, resonant frequencies, vibration absorber, fastening outside the geometric center, efficiency.

*E-mail: ksiombarg1f@yandex.ru (Кудаев А.В.)

Введение

Одним из основных направлений улучшения акустических характеристик транспортных средств и оборудования является уменьшение уровней вибрации их корпусных и внутрикорпусных конструкций. Особенно актуальным это направление становится при повышенных уровнях вибрации и шумоизлучения конструкций в низкочастотном диапазоне и наличии в их частотных спектрах интенсивных тональных (дискретных) составляющих. Именно в этих случаях необходимы эффективные в широком диапазоне частот средства снижения вибрации.

Для уменьшения уровней низкочастотной вибрации и шумоизлучения пластин конструкций их поверхность (поверхности), как правило, облицовывают вибропоглощающими покрытиями. Наиболее широкое применение получили армированные вибропоглощающие покрытия (АВП), состоящие из диссипативного слоя вязкоупругого материала и армирующего слоя, которым является преимущественно металлическая пластина.

Применяемые АВП с диссипативным слоем, изготавливаемым обычно из резиновых или пластифицированных материалов, работоспособны в широкой полосе частот, однако их эффективность на низких частотах оказывается малой даже при относительной массе, достигающей 40-50% от массы демпфируемой конструкции [1]. При этом толщина АВП составляет не менее двух толщин обшивки демпфируемой конструкции.

Существенно меньшую массу и толщину при большей эффективности на низких частотах имеют АВП с диссипативным слоем из полимерной пленки на основе поливинилацетата, отличающимся наибольшим вибропоглощением по сравнению с существующими материалами [2].

При установке подобных покрытий с толщиной в два и более раз меньшей толщины пластины демпфируемой конструкции достигаются на низких частотах потери колебательной энергии с коэффициентом потерь η около 0,1. Однако дальнейшее увеличение толщины как диссипативного, так и армирующего слоев АВП к заметному повышению значений η не приводит [3].

Вместе с тем, при возбуждении таких конструкций, вызывающем появление в спектрах их вибрации, а, следовательно, и шумоизлучения, широкополосных резонансных максимумов, часто возникает необходимость более значительного уменьшения их уровней. Соответствующая задача может быть решена только путем дальнейшего повышения потерь колебательной энергии в конструкциях до значений η , существенно больших, чем при нанесении на них известных АВП. С этой целью могут быть использованы резонирующие (далее резонансные) пластинчатые или полосовые вибропоглотители (РПВ). Высокая эффективность в диапазоне низких частот, разработанных РПВ, устанавливаемых как на необлицованные, так и на облицованные армированным покрытием металлические пластинчатые конструкции, была подтверждена экспериментальными исследованиями, результаты которых приведены в работах [3-6].

Были испытаны, в частности, вибропоглотители двух типов. Каждый из вибропоглотителей содержал тонкую пластину из стали, толщина которой была существенно меньше толщины демпфируемой стальной пластины [4]. Вибропоглотитель первого типа приклеивался к демпфируемой пластине всей поверхностью посредством полимерной пленки толщиной 0,5 мм. РПВ второго типа содержит стальную пластинку, жестко точно закрепленную на демпфируемой пластине в своем геометрическом центре. Одна из поверхностей пластинки этого типа РПВ была облицована АВП на основе той же

полимерной пленки и более тонкого (примерно в 3-5 раз), чем демпфируемая пластинка, армирующего слоя.

На низших резонансных частотах пластины, в большинстве случаев, эффективность образцов РПВ второго типа значительно превосходит эффективность образцов первого типа с такой же площадью. Благодаря имеющемуся зазору пластина не ограничивает перемещения резонирующей пластинки РПВ второго типа, что способствует лучшему поглощению колебательной энергии.

Эффективность вибропоглопителей испытанных типов с размерами, соответствующими настройке их резонансной частоты с низшей изгибной формой колебаний на частоту повышенной вибрации пластины демпфируемой конструкции, оказалась существенно больше эффективности вибропоглопителей, имеющих примерно такие же размеры и настройку резонансной частоты с иными (поворотная, изгибно-крутильная) формами колебаний. При этом эффективность частотно настроенного вибропоглопителя, установленного в зоне пучности резонирующей формы изгибных колебаний демпфируемой пластины, существенно больше его эффективности при размещении в зоне узла той же формы.

Аналогичные выводы были сделаны на основе анализа результатов испытаний эффективности вибропоглопителей, резонирующим элементом которых являлись полосы – пластины с отношением длины к ширине, не меньшим чем 2,5.

Во всех случаях испытаний пластинчатых и полосовых вибропоглопителей второго типа их одиночное жесткое точечное крепление к демпфируемой пластине размещалось в геометрическом центре РПВ.

Целью настоящей работы являлись экспериментальные исследования эффективности полосового вибропоглопителя с креплением к демпфируемой пластине вне его геометрического центра. Особенности такого РПВ являются двукратное увеличение числа, по крайней мере, низших резонансных частот изгибных колебаний и по-видимому иной, в сравнении со случаем крепления РПВ в его геометрическом центре, характер взаимодействия изгибных процессов как в его неодинаковых участках между креплением и короткими кромками, так и в механической системе «вибропоглотитель - демпфируемая пластина». Оба отличительных фактора могут повлиять на эффективность вибропоглопителя.

1. Экспериментальная установка

Исследования эффективности РПВ с механическим креплением из винта и гаек выполнялись с использованием прямоугольной стальной пластины - типичного участка обшивки инженерной конструкции между ее соседними подкреплениями. Именно эти участки, обладающие лучшей вибровозбудимостью, создают на низших резонансных частотах их изгибных колебаний наибольшие уровни шумоизлучения конструкции. Размеры испытанной пластины в плане составляли 0,52x0,37 м, а ее толщина равнялась $1,5 \cdot 10^{-3}$ м. Кромки пластины закреплялись на раме из профилированных уголков.

Испытанный резонансный вибропоглотитель представлял собой облицованную с одной стороны армированным вибропоглощающим покрытием стальную полосу толщиной $0,56 \cdot 10^{-3}$ м с размерами в плане 0,19x0,06 м (рис. 1).

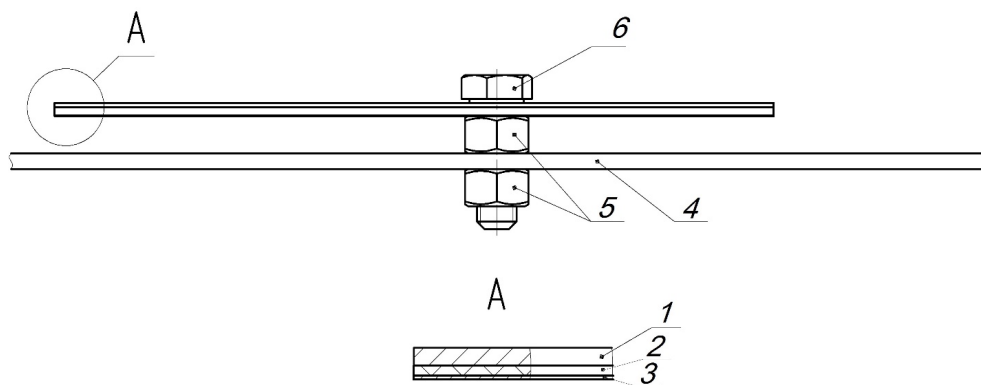


Рис. 1. Схема резонансного полосового вибропоглотителя:

1 – полоса; 2 – диссипативный слой; 3 – армирующий слой; 4 – демпфируемая пластина;
5 – гайка; 6 – болт

Диссипативным слоем АВП являлась полимерная пленка ВПС-2.5 из поливинилацетата толщиной $0,5 \cdot 10^{-3}$ м, а армирующим – стальная полоса толщиной $0,25 \cdot 10^{-3}$ м. Площадь покрытия составляла 85% площади стальной полосы, участки которой у крепления и у ее коротких кромок покрытием не облицовывались. Масса РПВ составляла без крепления 3,3% массы демпфируемой пластины. РПВ устанавливался на пластину с зазором относительно ее поверхности.

2. Результаты испытаний

Предварительно выполнялось определение вибрационных параметров стальной полосы и РПВ на ее основе с мало отличающейся длиной участков от крепления до коротких кромок: 90 и 100 мм. Эксперимент проводился с использованием электродинамического вибратора. Крепление полосы к имеющей резьбу головке (штоку) вибратора до и после облицовки ее АВП осуществлялось с помощью двух гаек.

Измерялись частотные спектры виброускорения головки вибратора – возбуждающего сигнала – и коротких кромок длинного и менее протяженного участков полосы при отсутствии АВП. Спектры содержали интенсивные максимумы с близкими частотами резонансных колебаний кромок участков полосы с мало отличающейся длиной.

После облицовки полосы армированным покрытием в спектрах вибрации у кромок был обнаружен лишь один широкополосный максимум с наибольшим уровнем на низшей резонансной частоте колебаний длинного (33 Гц) и короткого (38 Гц) участков вибропоглотителя, соответственно. Максимумы на последующих резонансных частотах колебаний участков в спектрах вибрации кромок РПВ практически отсутствовали.

Приведенные результаты свидетельствуют о больших потерях колебательной энергии в испытанном вибропоглотителе, обусловленных высокой эффективностью АВП и взаимодействием колебательных процессов в участках вибропоглотителя с отличающейся длиной.

Эффективность вибропоглотителя определялась при возбуждении демпфируемой пластины ударом с помощью малогабаритного вибромолотка, имеющего датчик силы. Измерялась входная вибровозбудимость пластины, под которой подразумевается уровень виброускорения A , м/с^2 , в точке действия силы F , выраженного в дБ относительно порогового значения 10^{-6} м/с^2 и соответствующего силе $F_0 = 1$ Н. Измерения входной вибровозбудимости ($20 \lg AF_0 / (F \cdot 10^{-6})$) на рисунках условно A/F , дБ) демпфируемой пластины выполнялись в следующих четырех точках: геометрический центр (ГЦ) (точка 1), пучность форм изгибных колебаний второй (точка 2) и третьей (точка 3)

резонансных частот, точка 4 на одинаковом расстоянии от ГЦ и одного из углов пластины.

Эффективность вибропоглотителя определялась превышением уровней A/F , дБ, при его отсутствии над измеренными в той же точке соответствующими уровнями при наличии устройства на пластине. Испытания проводились при креплении вибропоглотителя к пластине в ее геометрическом центре, а также в точках (условно), находящихся на одинаковом расстоянии от ГЦ и последовательно от точек 2, 3 и 4.

Измерения входной вибровозбудимости пластины выполнялись в третьоктавных и узкой ($\Delta f = 1$ Гц) полосах частот. Типичные третьоктавные спектры A/F , дБ, измеренные при отсутствии (кривая 1) и наличии (кривая 2) вибропоглотителя, приведены на рис. 2. Измерения выполнены в точке 3, соответствующей пучности третьей резонансной частоты пластины. Вибропоглотитель находился между точками 1 и 3. Обращаясь к рисунку, видим, что установка вибропоглотителя привела к значительному уменьшению третьоктавных уровней вибрации пластины в диапазоне низких и средних частот.

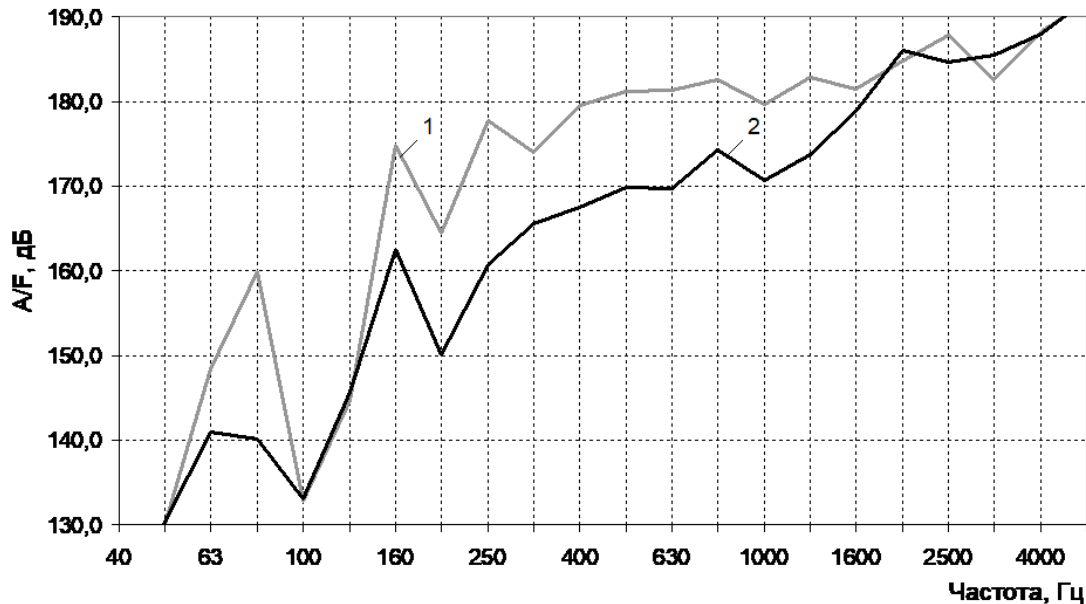


Рис. 2. Типичные третьоктавные спектры входной вибровозбудимости пластины при отсутствии (1) и наличии (2) вибропоглотителя

Наибольшие (до 20 дБ) величины снижения A/F зарегистрированы в полосах со среднегеометрическими частотами 80, 160, 200 и 250 Гц, содержащих максимумы вибрации пластины при ее возбуждении в точке 3 с резонансными частотами 72, 168, 185, 214 и 280 Гц (рис. 3).

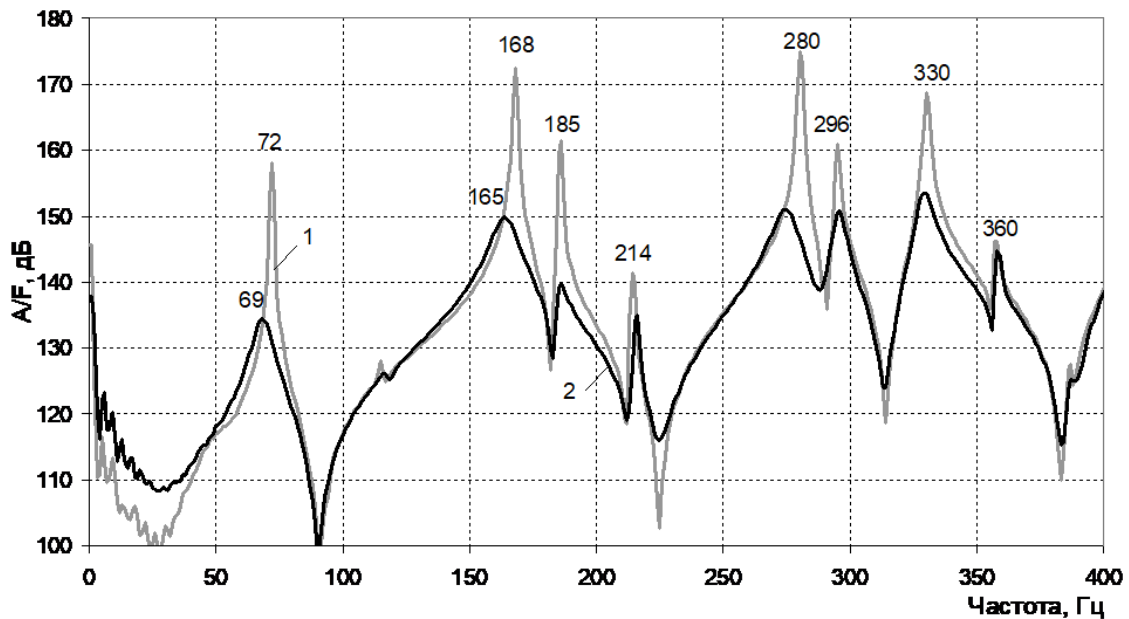


Рис. 3. Типичные узкополосные спектры входной вибровозбудимости пластины при отсутствии (1) и наличии (2) вибропоглотителя

Значения эффективности вибропоглотителя в третьоктавных полосах, полученные для каждого места его установки на пластину, были усреднены по четырем точкам ее возбуждения. Соответствующие значения эффективности вибропоглотителя приведены в нижеследующей таблице.

Таблица 1

Значения эффективности вибропоглотителя, дБ

Место установки	Среднегеометрические частоты третьоктавных полос, Гц																
	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
ГЦ пластины	0	9	19	0	4	2	10	6	4	8	2	8	5	4	5	0	0
Между ГЦ и т. 2	1	9	20	0	11	2	8	4	4	8	5	6	4	2	2	0	0
Между ГЦ и т. 3	0	8	19	0	4	7	9	12	3	8	7	9	4	5	6	1	0
Между ГЦ и т. 4	0	9	19	0	10	6	8	5	4	4	8	5	3	0	3	2	1
Средние значения	0	9	19	0	7	4	9	7	4	7	5	7	4	3	4	1	0

Обращаясь к таблице, видим, что независимо от места крепления вибропоглотителя его установка на пластину уменьшает уровни ее входной вибровозбудимости, усредненные по точкам измерения, в широком диапазоне частот, включающем кроме полосы 100 Гц (где отсутствует резонансный максимум) все третьоктавные полосы со среднегеометрической частотой от 63 до 1250 Гц. Наибольшая (19-20 дБ) эффективность вибропоглотителя зарегистрирована в полосе 80 Гц, в которую,

как ранее указывалось, попадает низшая резонансная частота (72 Гц) изгибных колебаний демпфируемой пластины. Отметим, что столь значительное снижение уровней вибрации пластины достигнуто с помощью частотно ненастроенного вибропоглотителя с низшей резонансной частотой его изгибных колебаний, значение которой примерно в 1,6 раза меньше значения указанной резонансной частоты колебаний пластины.

Заключение

В отличие от ранее испытанных РПВ с креплением в их ГЦ и высокой эффективностью только на частоте настройки, причем при условии крепления в зоне пучности соответствующей формы колебаний демпфируемой пластины, установка испытанного вибропоглотителя с относительной массой около 3% привела к уменьшению уровней ее вибрации в широком диапазоне частот с верхней границей, превосходящей значение низшей резонансной частоты вибропоглотителя более чем в 30 раз. Среднее значение эффективности вибропоглотителя по третьоктавным полосам 63, 80 и 125-1250 Гц равняется ~6 дБ.

Содержащиеся в статье результаты могут быть использованы при выборе размеров полосовых вибропоглотителей, предназначенных для эффективного виброгашения вибрации пластинчатых элементов корпусных и внутрикорпусных конструкций транспортных средств и оборудования различного функционального назначения в широком частотном диапазоне, включая низкие частоты.

Список литературы

1. Никифоров А.С. Акустическое проектирование судовых конструкций. Справочник. JL: Судостроение, 1990.
2. Алексеев С.А., Сятковский А.И. Вибродемпфирующие свойства полимерных пленок // Судостроение. 2015. Вып. 6. С. 45-47.
3. Кирпичников В.Ю., Кощев А.П., Петров А.А., Савенко В.В. О низкочастотном вибродемпфировании пластины с большими потерями колебательной энергии // Труды Крыловского ГНЦ. 2021. Т. 1. Вып. 395.
4. Кирпичников В.Ю. Вред и польза резонансных явлений в элементах судовых конструкций. СПб.: 2019.
5. Кирпичников В.Ю., Савенко В.В., Смольников В.Ю., Шлемов Ю.Ф. Разработка новых высокоэффективных средств вибродемпфирования судовых конструкций. Труды Крыловского ГНЦ. 2019. Вып. 1 (387) С. 167-174.
6. Кирпичников В.Ю., Сятковский А. И., Шлемов Ю.Ф. Высокоэффективные средства низкочастотного вибродемпфирования с упругим элементом из полимерной пленки // Судостроение. 2020. Вып. 1. С. 44-47.

References

1. Nikiforov A.S. Acoustic design of ship structures. Directory. JL: Shipbuilding, 1990.
2. Alekseev S.A., Syatkovsky A.I. Vibro-damping properties of polymer films // Shipbuilding. 2015. No. 6. S. 45-47.
3. Kirpichnikov V.Yu., Koshcheev A.P., Petrov A.A., Savenko V.V. On low-frequency vibration damping of a plate with large losses of vibrational energy // Proceedings of the Krylov State Research Center. 2021. Vol. 1. No. 395.

4. Kirpichnikov V.Yu. Harm and benefit of resonant phenomena in the elements of ship structures. St. Petersburg: 2019.

5. Kirpichnikov V.Yu., Savenko V.V., Smolnikov V.Yu., Shlemov Yu.F. Development of new highly effective means of vibration damping of ship structures. Proceedings of the Krylovsky SSC. 2019. No. 1 (387) S. 167-174.

6. Kirpichnikov V.Yu., Syatkovsky A.I., Shlemov Yu.F. Highly effective means of low-frequency vibration damping with an elastic element made of a polymer film // Shipbuilding. 2020. No. 1. S. 44-47.

УДК: 534.32
OECD: 1.03.AA

Основные подходы к экспериментальным исследованиям шума винтовых летательных аппаратов самолетного типа. Обзор

Мошков П.А.

К.т.н, ведущий инженер-конструктор, Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет), г. Москва, РФ

Аннотация

В статье рассмотрены основные подходы к исследованиям шума винтовых летательных аппаратов самолетного типа. Описаны методы проведения испытаний поршневых двигателей, винтовых движителей и малоразмерных беспилотных воздушных судов в лабораторных условиях. Рассмотрены методики проведения летных сертификационных испытаний легких винтовых самолетов и доводочных испытаний беспилотных воздушных судов. Показано, что акустические характеристики маломасштабных воздушных винтов, экспериментально полученные в модельных экспериментах, могут быть использованы для валидации численных методов расчета шума воздушных винтов. Описаны современные программно-аппаратные средства визуализации звуковых полей. Рассмотрена проблема влияния отражения звука на измеряемые уровни звукового давления в неподготовленных для проведения акустических испытаний помещениях, в частности, аэродинамических трубах с открытой рабочей частью.

Ключевые слова: шум воздушного винта, шум двигателя, акустические испытания, шум на местности, легкий винтовой самолет, беспилотное воздушное судно, аэроакустика.

The main approaches to experimental studies of the noise of propeller-driven fixed-wing aircraft. Review

Moshkov P.A.

PhD, leading engineer-designer, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Abstract

The article discusses the main approaches to noise studies of propeller-driven fixed wing aircrafts. The methods of testing piston engines, propellers and small-sized unmanned aerial vehicles in laboratory conditions are described. The methods of conducting in-flight certification tests of light propeller-driven aircraft and development tests of unmanned aerial vehicles are considered. It is shown that the acoustic characteristics of small-scale propellers, experimentally obtained in model experiments, can be used to validate numerical methods for calculating the propeller noise. Modern hardware and software tools for visualizing sound fields are described. The problem of the influence of sound reflection on the measured sound pressure levels in rooms unprepared for acoustic testing, in particular, open-jet wind tunnels, is considered.

Keywords: *propeller noise, engine noise, acoustics tests, community noise, light propeller-driven aircraft, unmanned aerial vehicle, aeroacoustics.*

Введение

Актуальность проблемы обеспечения акустического проектирования винтовых летательных аппаратов (ЛА) самолетного типа, т.е. с учетом требуемых акустических характеристик не вызывает сомнения [1, 2]. С одной стороны, необходимо обеспечить акустическую сертификацию и конкурентные уровни шума на местности проектируемых легких винтовых самолетов (ЛВС) [3]. С другой стороны, необходимо обеспечение живучести винтовых беспилотных воздушных судов (БВС) самолетного типа за счет, в том числе, низкой степени акустической заметности [4, 5].

В рамках процесса акустического проектирования выполняются экспериментальные исследования шума винтовых движителей и поршневых двигателей, а также летные акустические сертификационные и доводочные испытания ЛВС и БВС самолетного типа, соответственно.

Исследования аэроакустических характеристик малоразмерных БВС выполняют как на специализированных установках, так и в условиях открытой местности в рамках наземных и летных испытаний [5, 6].

Специализированными установками для проведения модельных испытаний винтовых движителей могут быть заглушенные, полузаглушенные камеры [7–9] и аэродинамические трубы с заглушенной рабочей частью [10]. Размеры и характеристики установки ограничивают возможности проведения испытаний различных источников шума.

Целью работы является обобщение основных подходов к экспериментальным исследованиям шума винтовых движителей, поршневых двигателей, винтомоторных силовых установок и винтовых ЛА самолетного типа в целом, выполняемым на различных этапах акустического проектирования.

1. Об акустических испытаниях поршневых двигателей

Акустические испытания поршневых двигателей выполняют в соответствии с ГОСТ Р 53838-2010 [11]:

- в заглушенной камере с отражающим полом (полузаглушенной камере);
- в испытательных помещениях (со звукопоглощающими облицовками стен и потолка и без них);
- на открытом испытательном стенде;
- в условиях открытой местности (на аэродроме) в составе силовой установки ЛА.

Объем испытательного помещения без звукопоглощающих облицовок должен быть не менее 200 м³. Для оценки свойств звукового поля и учета влияния отраженного звука в испытательном помещении перед измерением шума двигателя определяют значение коэффициента акустических условий помещения согласно ГОСТ Р ИСО 3744-2013 [12]. В качестве нагрузки при испытаниях используются электро-, гидротормоз или воздушный винт.

В соответствии с ГОСТ Р 53838-2010 [11] при измерениях в полузаглушенной камере координаты задают из условия равномерного по площади размещения точек измерений по измерительной поверхности и минимизации интерференционных эффектов звуковых волн, излученных источником шума и отраженных от звукоотражающей плоскости.

Строят огибающий параллелепипед – воображаемую поверхность, представляющую собой прямоугольный параллелепипед наименьших размеров, полностью вмещающий источник шума и опирающийся на одну звукоотражающую плоскость. Выступающие части источника шума, про которые известно, что они не

дают заметного вклада в шум, допускается не включать в огибающий параллелепипед. Измерительная поверхность служит местом размещения точек измерений, охватывает огибающий параллелепипед и опирается на звукоотражающую плоскость. Для измерительной поверхности в виде параллелепипеда точки измерения выбирают в соответствии с рис. 1.

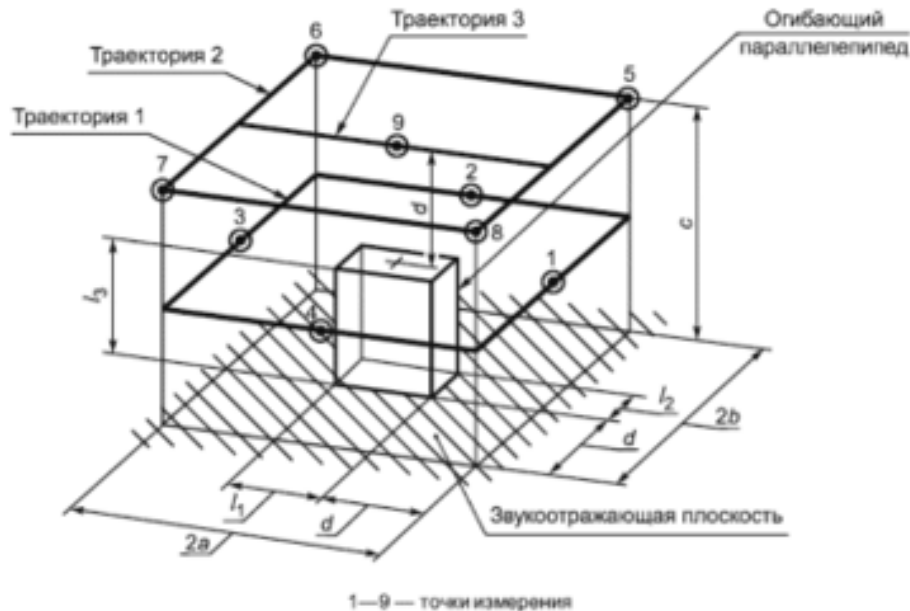


Рис. 1. Пример измерительной поверхности и положений (траекторий) микрофонов

Акустические испытания поршневого двигателя могут выполняться в условиях открытой местности в составе силовой установки легкомоторных самолетов. При этом измерительные точки, как правило, располагают на дуге окружности радиусом более 5-ти диаметров воздушного винта. Микрофоны при этом располагают на уровне земной поверхности или на высоте 7 мм выше металлической плиты.

В частности, во время испытаний легкомоторных самолетов АН-2, МАИ-223М, МАИ-890У, МАИ-890, F30 измерялось звуковое давление в 12-ти контрольных точках, расположенных на дуге окружности радиусом 30 метров и с шагом 15° [13–15]. Центр дуги совпадал с проекцией втулки винта на земную поверхность. Направление 0° соответствовало излучению в переднюю полусферу в плоскости, проходящей через ось винта, а направление 90° соответствовало направлению излучения в плоскости диска винта. Измерительные микрофоны располагались на уровне земной поверхности согласно схеме, представленной на рис. 2, с учетом возможного влияния ветра на направленность и спектр акустического излучения от силовой установки самолета. Рассмотренная на рис. 2 схема расположения контрольных точек предполагает, что звуковое поле источника симметрично относительно оси винта (коленвала).

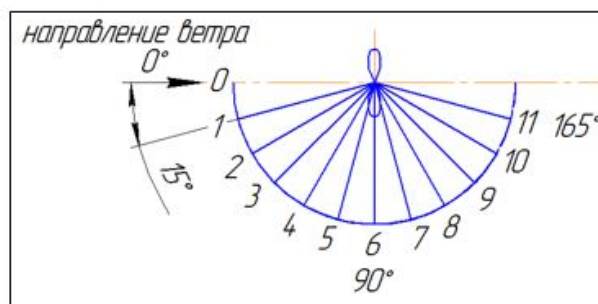


Рис. 2. Схема расположения точек измерения шума на дуге окружности радиусом 30 м. при испытаниях легкомоторных самолетов типа АН-2, МАИ-223М, МАИ-890У, МАИ-890, F30 [13–15]

2. Испытания винтовых движителей и малоразмерных беспилотных воздушных судов

Испытания натурных и модельных винтовых движителей и малоразмерных БВС выполняют в заглушенных камерах в соответствии с ГОСТ ISO 3745-2014 [7].

Центр полусферической измерительной поверхности должен находиться на полу камеры и совпадать с вертикальной проекцией акустического центра испытуемого источника шума, если тот известен, или, если неизвестен, с вертикальной проекцией геометрического центра источника шума.

В частности, при акустических испытаниях малоразмерного БВС Птеро-G0 измерительные точки располагались на уровне оси коленвала (воздушного винта) на окружности радиусом 2 метра. Диапазон измерений соответствовал азимутальным углам от 30 до 135° с шагом 15° относительно оси коленвала двигателя (рис. 3) [16–17]. При необходимости шаг установки микрофонов может быть меньше, а диапазон углов наблюдения расширен.

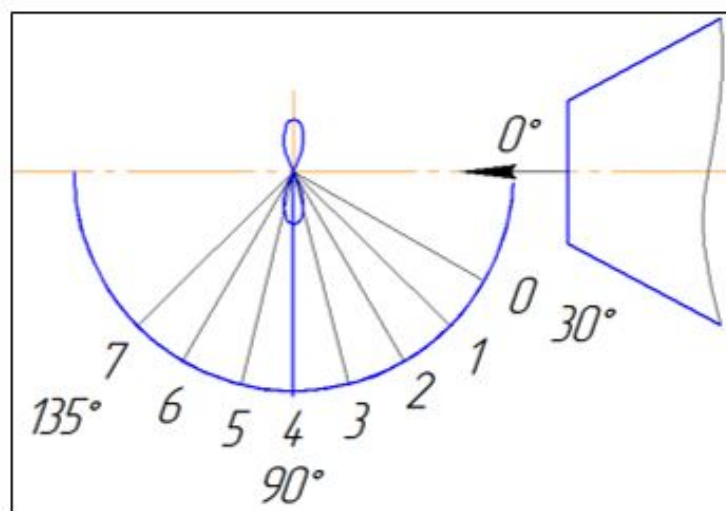


Рис. 3. Пример расположения точек измерения шума на дуге окружности радиусом 2 метра в заглушенной камере АК-2 при испытаниях БВС Птеро-G0 [16–17]

3. Испытания винтовых летательных аппаратов самолетного типа в условиях открытой местности

Испытания натуральных ЛВС и БВС на завершающих этапах проектирования проводят в условиях открытой местности, при этом подстилающей поверхностью может быть скошенная трава, бетонные плиты, асфальт и т.д. Контрольные точки располагают на значительном отдалении от сооружений аэродрома. Измерения выполняют при благоприятных метеоусловиях, чтобы уровни фонового шума, определяемые источниками природного и техногенного происхождения [18], были на 10–15 дБ ниже уровней шума ЛА в исследуемом частотном диапазоне. Как правило, это слышимый диапазон частот 20–10000 Гц (в третьоктавных полосах частот). При выполнении летных испытаний обязательно вблизи контрольных измерительных точек осуществляется регистрация параметров атмосферы.

Летные сертификационные испытания ЛВС выполняют согласно рекомендованной ИКАО методике испытаний [3]. Контрольной точкой измерения шума в данном случае является точка на продолжении осевой линии взлетно-посадочной полосы, расположенная на расстоянии 2500 м от начала разбега самолета при выполнении взлета (рис. 4).



Рис. 4. Типичные профили при испытаниях (с имитацией взлета) и в исходных условиях, регламентируемых Главой 10 стандарта ИКАО

При этом на земле устанавливается микрофон в развернутом положении (свободного поля диаметром 12,7 мм) с защитной сеткой так, чтобы диафрагма микрофона находилась на 7 мм выше и параллельно круглой металлической плите. Микрофон устанавливается на расстоянии, равном $3/4$ от центра до края плиты по радиусу перпендикулярно линии полета испытываемого самолета. Примеры установки микрофона представлены на рис. 5.



Рис. 5. Общий вид измерительного микрофона при выполнении сертификационных испытаний

Летные доводочные испытания винтовых БВС самолетного типа выполняют, как правило, в рамках горизонтальных пролетов над контрольной точкой на минимально допустимых согласно требованиям безопасности полетов высотах, как правило, 80–100 м, при этом измерительные микрофоны устанавливают аналогичным способом (рис. 5). При этом рассматривается весь диапазон крейсерских режимов полета БВС.

4. О пересчете результатов модельных испытаний на натурные условия

При выполнении модельных испытаний [19] возникает вопрос пересчета результатов измерений на натуральный объект, как при оценке шума изолированных винтовых движителей, так и при оценке установочных эффектов в реальных компоновках ЛА.

В работе [20] были выполнены испытания одной модели воздушного винта, но разного масштаба на двух различных установках. Воздушный винт модели APiAN-INF, испытанный в заглушенной камере АК-2 (ЦАГИ) имел диаметр 30 см, а винт, испытанный в аэродинамической трубе с заглушенной рабочей частью DNW-LLF (Национальная аэрокосмическая лаборатория Нидерландов (NLR)), имел диаметр 50 см.

Результаты измерений были приведены к одному расстоянию. Сравнение характеристик направленности первой гармоники шума вращения винта, полученных в DNW-LLF и АК-2 при относительной поступи (J) 1,4 и скорости набегающего потока (V) 40 м/с, представлены на рис. 6. Наблюдается отклонение измеряемых уровней звукового давления на двух экспериментальных установках. Наибольшее отклонение наблюдается в направлении 60° и составляет 4 дБ.

Относительная поступь винта определяется согласно соотношению:

$$J = \frac{V}{nd} \quad (1)$$

где V – скорость набегающего потока, м/с; n – частота вращения винта, об/с; d – диаметр винта, м.

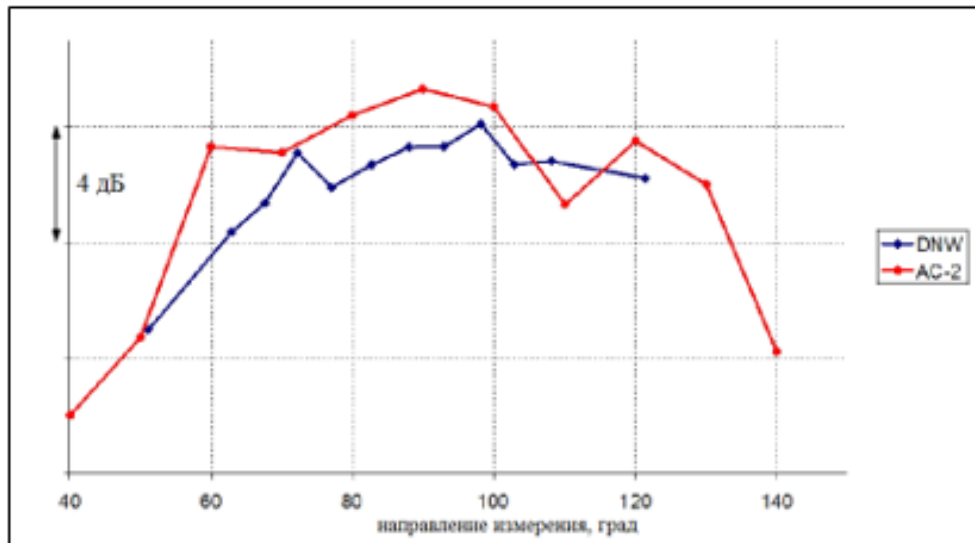


Рис. 6. Сравнение диаграмм направленности 1-й гармоники шума модельного винта ARIAN-INF, полученных при измерениях в DNW-LLF и АК-2 (относительная поступь винта 1,4, скорость набегающего потока 40 м/с) [20]

Полученные результаты свидетельствуют об удовлетворительном согласовании диаграмм направленности, полученных в разномасштабных экспериментах, но тем не менее данные полученные на маломасштабной установке АК-2 могут быть использованы для валидации расчетных методов при оценке шума винтовых движителей. Валидированное на результатах модельных экспериментов программное обеспечение используется при оценке шума натуральных винтов на различных этапах проектирования.

5. Об оценке влияния отражений на измеряемые уровни звукового давления

В настоящее время вопрос возможности определения акустических характеристик воздушных винтов и БВС в аэродинамических трубах с открытой и незаглушенной рабочей частью является открытым. С одной стороны, в таких трубах возможно получение качественных аэродинамических результатов в натуральных условиях, в то время как возможности заглушенных камер ограничиваются модельными экспериментами и экспериментами с малоразмерными БВС. С другой стороны, возникает вопрос возможности использования результатов акустических измерений для верификации и валидации расчетных методов и качественного описания структуры звукового поля исследуемого объекта. Решает данную проблему введение в эксплуатацию специальных аэроакустических установок, позволяющих выполнять крупномасштабные исследования различных типов винтовых движителей, но в настоящее время в Российской Федерации такие установки отсутствуют.

С другой стороны, в технической акустике широко распространены исследования на основе измерений в неподготовленных условиях, и для приведения результатов к условиям свободного поля используются корректирующие функции [12].

Одним из методов, позволяющих определить влияние паразитных отражений на измеряемые уровни шума, является корреляционный метод М-последовательностей (метод последовательностей максимальной длины или MLS-эксперимент) [21–24]. В его основе лежит синтезированный квазишумовой сигнал, автокорреляционная функция которого близка к дельта-функции. Основной целью исследования методом

М-последовательности является получение импульсного отклика системы. Для этого используется всенаправленный источник звука, два микрофона для измерения объемной скорости, приемные микрофоны и алгоритмы пост-обработки сигналов. Импульсный отклик позволяет с высокой точностью определить и идентифицировать вклады в измеряемый сигнал от различных рассеивающих и отражающих конструктивных элементов исследуемой системы.

В качестве примера, рассмотрим результаты исследования аэродинамической трубы (АДТ) Т-1К (КНИТУ-КАИ). Поскольку конструкция АДТ Т-1К допускает возможность проведения измерений как с поднятыми, так и с опущенными створками. «Конфигурация № 1» обозначает, что при измерениях левая по потоку створка опущена, правая по потоку створка поднята. Для данной конфигурации АДТ Т-1К на рис. 7 представлен нормированный импульсный отклик для микрофона, расположенного вблизи торцевой стенки рабочей части и диффузора. Анализ представленной зависимости демонстрирует, что импульсный отклик характеризуется наличием нескольких ярко выраженных импульсов, соответствующих отражениям от различных элементов конструкции рабочей части АДТ Т-1К, причем амплитуды отраженных импульсов почти в 10 раз ниже амплитуды импульса прямого сигнала. Анализ геометрии установки, выполненный с помощью непосредственного измерения расстояний, позволяет сделать вывод, что импульсы на расстоянии 4,1–4,4 м соответствуют отражению от напольного меламинового покрытия. Можно видеть, что амплитуда прямого сигнала в 6–6,5 раз больше амплитуды отраженных сигналов и отражения не могут ни качественно, ни количественно влиять на измерения в рассмотренной контрольной точке.

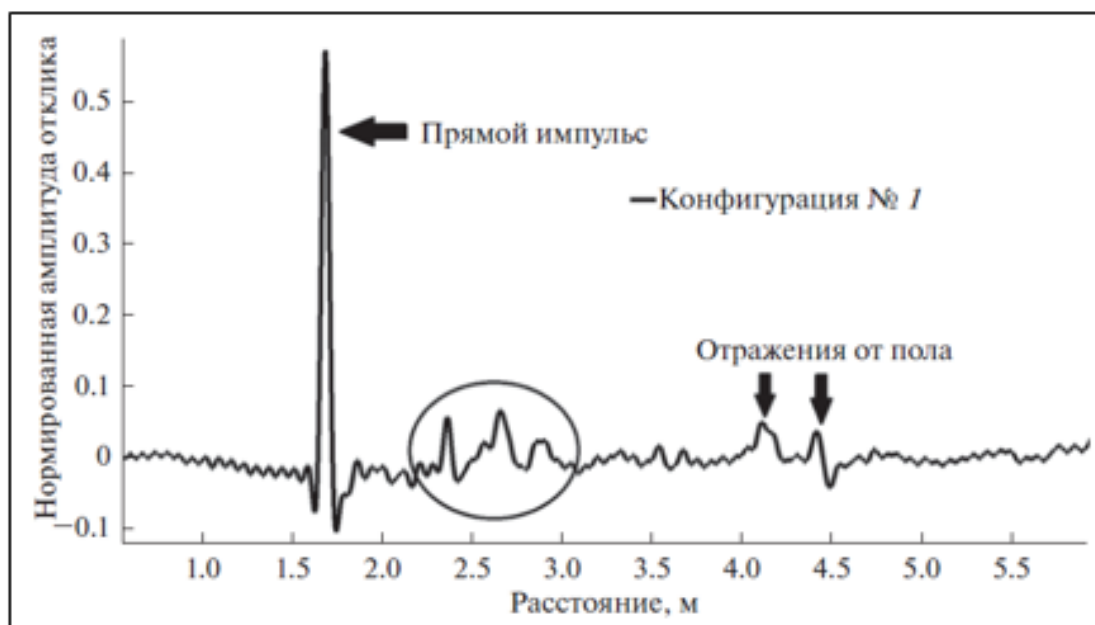


Рис. 7. Экспериментальный импульсный отклик при измерениях в АДТ Т-1К [21]

Таким образом, наличие множественных отражений звука в заданной точке пространства в АДТ не может обеспечить получения качественных данных о спектральных и интегральных характеристиках испытываемого источника.

В тоже время существует необходимость определения тональных частот в спектре излучения для определения спектрального портрета ЛА в случае сложной ситуации при наличии комбинационных гармоник, например:

- шум мультикоптеров,

- шум биротативных винтовентиляторов,
- шум винта в кольце, закрепленном при помощи пилонов, и/или при наличии рулей направления и высоты в кольце,
- шум составных винтов (со смещенными плоскостями вращения, т.е., например, 4-х лопастной винт, собранный фактически из двух 2-х лопастных винтов),
- шум поршневых двигателей в зависимости от способа организации выхлопа, числа цилиндров и других факторов и т.д.

При измерениях шума в АДТ с открытой рабочей частью в нескольких точках, расположенных на линии параллельной оси АДТ, как представлено на рис. 8 [25], может быть определена звуковая мощность источника шума [26] (W) согласно выражению, которое учитывает влияние числа Маха набегающего потока [25]:

$$W = \frac{2\pi l_1^2}{\rho_0 c_0} \int_0^\pi (1 - M_0 \cos \theta_e)^2 \frac{\overline{p'^2}(l_1, \theta_g)}{\sin \theta_e} d\theta_e \quad (2)$$

где l_1 – расстояние от осевой линии источника до линии расположения микрофонов (в данном случае 12 м), ρ_0 – плотность воздуха, c_0 – скорость звука, M_0 – число Маха набегающего потока в АДТ, θ_g – направление измерения, $\theta_e = \theta_g - \sin^{-1}(M_0 \sin \theta_g)$ – направление излучения, $\overline{p'^2}(l_1, \theta_g)$ – осредненное по времени среднеквадратичное значение уровня звукового давления в направлении измерения.



Рис. 8. Схема проведения эксперимента в АДТ для оценки уровня звуковой мощности источника (в данном случае «открытого ротора»)

Уровень звуковой мощности определяется согласно выражению:

$$L_W = 10 \lg \left(\frac{W}{W_0} \right), \quad (3)$$

где W_0 – пороговое значение звуковой мощности, 10^{-12} Вт.

Акустический КПД силовой установки может быть оценен согласно выражению:

$$\eta_{\text{ак}} = \frac{W_{\text{СУ}}}{N_e} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $W_{\text{СУ}}$ – суммарная мощность акустического излучения СУ, N_e – эффективная (располагаемая) мощность СУ.

На основе измеренных уровней звуковой мощности можно оценивать зависимость мощности отдельных составляющих шума от режима работы силовой установки и выполнять параметрические исследования по оценке влияния различных параметров, в частности, законцовки и числа лопастей винта [27, 28], глушителя шума выхлопа ДВС и т.д.

6. Современные программно-аппаратные средства визуализации звуковых полей

В настоящее время для исследования звуковых полей источников шума аэродинамического типа широко применяются плоские микрофонные решетки [29]. Сигналы записываются параллельно со всех измерительных каналов решетки и затем обрабатываются с применением различных алгоритмов, называемых в общем случае бимформингом (beamforming). В работе [30] представлено 14 различных алгоритмов бимформинга, которые могут быть использованы для решения различных задач – исследование пролетного шума ЛА, шума обтекания планера в АДТ, шума двигателя на открытом стенде, определение модального состава шума вентилятора двигателя и т.д. Крупные научные центры самостоятельно разрабатывают собственные алгоритмы бимформинга для получения качественных результатов при локализации сложных некомпактных источников в заданных условиях проведения эксперимента [31].

Точность локализации источников шума зависит от числа микрофонов и правильности выбора алгоритма обработки сигналов, а диапазон рабочих частот микрофонной решетки характеризуется ее диаметром, плотностью расположения микрофонов и используемым алгоритмом постобработки. Результатом локализации источника являются шумовые карты, полученные в заданной плоскости для уровней звукового давления в узких, третьоктавных, октавных полосах частот и для суммарного по спектру излучения в различных единицах измерения (дБ, дБА, Вт/м² и т.д.).

В рамках проблемы шума на местности винтовых летательных аппаратов самолетного типа микрофонные решетки применяются в следующих экспериментах:

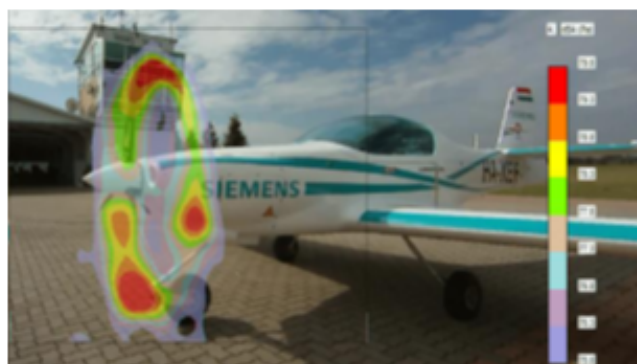
- Исследование звукового поля силовой установки ЛА в статических условиях [32]. Выполняются для верификации и валидации численных расчетных методов;
- Исследование источников шума натуральных и модельных ЛА, винтовых движителей и элементов планера в лабораторных условиях (заглушенных камерах и АДТ) [33–38]. Также выполняются для верификации и валидации численных расчетных методов оценки шума отдельных источников;
- Летный эксперимент по локализации и ранжированию по интенсивности источников шума ЛА [39–44]. Выполняется для определения относительного вклада основных источников в общее звуковое поле ЛА.

Для этих трех случаев рассмотрим примеры применения плоских микрофонных решеток и алгоритмов бимформинга.

Для самолета с электродвигателем, установленным вместо ДВС, был выполнен эксперимент по визуализации звукового поля воздушного винта в статических условиях [32]. В эксперименте использовалась плоская микрофонная решетка Simcenter Sound Camera (частотный диапазон 50–20000 Гц, диаметр 1,5 м, 117 микрофонов). Общий вид решетки представлен на рис. 9а, а результаты визуализации звукового поля (для суммарного взвешенного по шкале А стандартного шумомера уровня звукового давления) с контрастом 4 дБА представлены на рис. 9б. Правильность выбора алгоритма при обработке результатов измерений подтверждается локализацией источников шума воздушного винта в плоскости его вращения.



а) Плоская микрофонная решетка



б) Результаты локализации источников шума с контрастом 4 дБА

Рис. 9. Применение плоской микрофонной решетки Simcenter Sound Camera для исследования шума воздушных винтов в статических условиях

Пример использования метода стандартного бимформинга при исследовании шума воздушного винта в АДТ представлен на рис. 10 [38]. Результаты получены для третьоктавных полос частот 4 и 8 кГц для изолированного винта (рис. 10 а и в) и при работе винта в следе за пилоном (рис. 10 б и г). Результаты представлены в нормализованном виде с контрастом 10 дБ.

Можно видеть существенное увеличение уровней шума при работе винта в следе за пилоном. Причем и для изолированной и установленной конфигураций винта звуковое поле является несимметричным относительно оси винта. Возможно, что данный эффект связан с низкой скоростью набегающего потока в эксперименте.

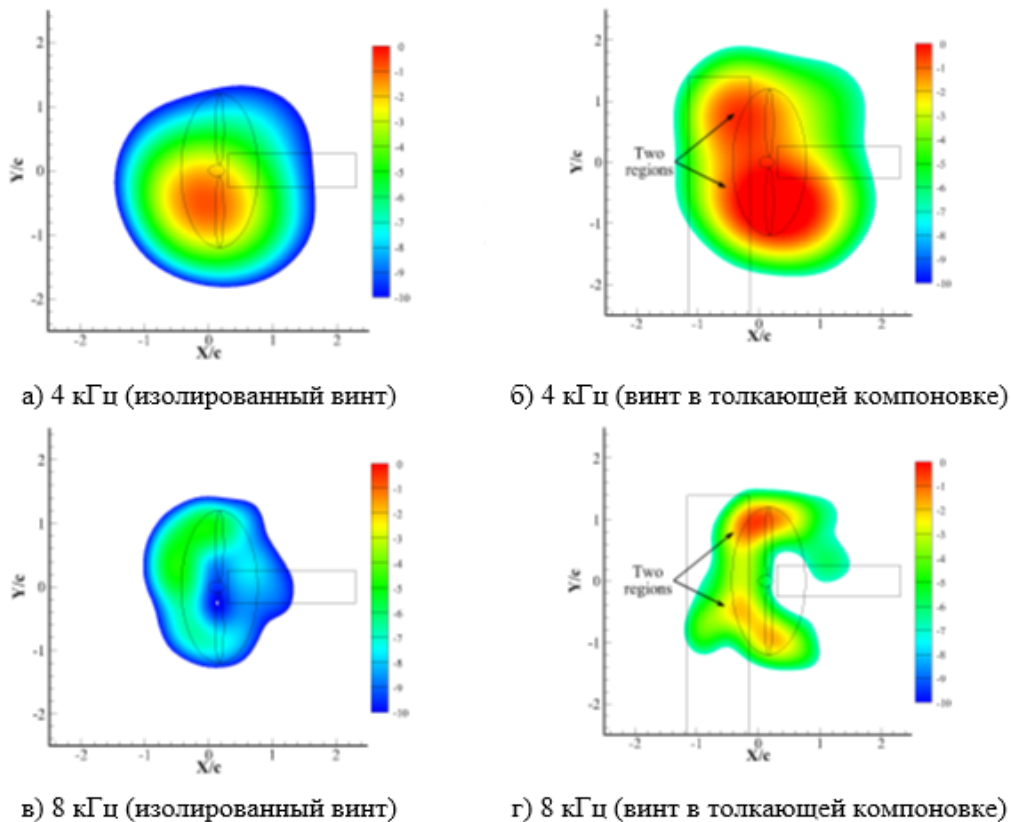
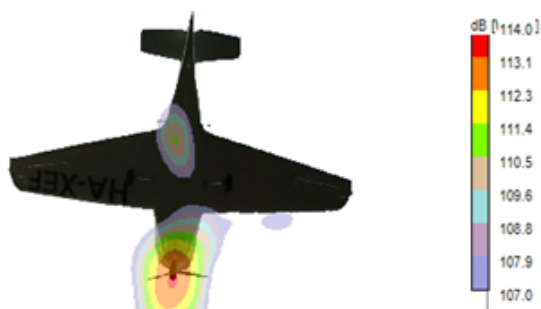


Рис. 10. Карты локализации источников шума, полученные методом стандартного бимформинга, в третьоктавных полосах частот 4 и 8 кГц для изолированного воздушного винта (а) и (в) и винта, работающего в следе от пилона (б) и (г) ($n=3000$ об/мин, $V=5$ м/с) [38]

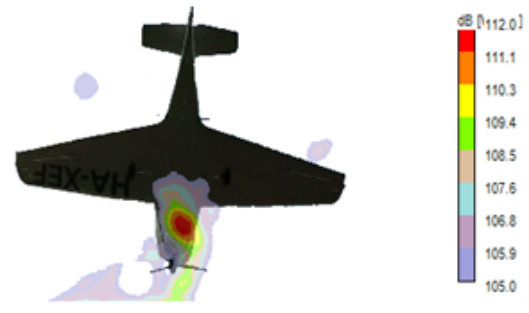
Пример локализации источников шума легкого винтового самолета в летном эксперименте рассмотрен на рис. 11 [44]. На рис. 11 а представлена плоская наземная 100-микрофонная решетка диаметром 10 м в конфигурации 5-ти конечной звезды. На рис. 11 также представлены карты локализации источников шума суммарного среднечастотного излучения в области частот 200–800 Гц для самолета с электродвигателем (рис.11 б) и с поршневым двигателем (рис. 11 в). Можно видеть, что воздушный винт является доминирующим источником шума, когда в состав силовой установки входит электродвигатель, в то время как для самолета с поршневым двигателем доминирующий источник расположен со стороны выхлопа. Карты локализации источников шума для суммарного высокочастотного шума в области частот 800–1200 Гц для самолета с электро- и поршневым двигателями представлены на рис 11 г и д, соответственно. Для самолета с ДВС доминирующими источниками являются воздушный винт и выхлоп двигателя, в то время как для самолета с электродвигателем источник повышенного шума локализуется в зоне передней опоры шасси.



а) плоская наземная 100-микрофонная решетка диаметром 10 м в конфигурации 5-ти конечной звезды



б) частотный диапазон 200–800 Гц, в составе СУ электродвигатель



в) частотный диапазон 200–800 Гц, в составе СУ поршневой двигатель



г) частотный диапазон 800–1200 Гц, в составе СУ электродвигатель



д) частотный диапазон 800–1200 Гц, в составе СУ поршневой двигатель

Рис. 11. Микрофонная решетка (а) и карты локализации источников шума (б), (в), (г), (д), полученные в летном эксперименте для ЛВС Magnus Fusion 212 с электродвигателем (слева) и поршневым двигателем (справа) (высота полета – 15,2 м, скорость – 129,6 км/ч) [44]

Заключение

Рассмотрены основные подходы к экспериментальным исследованиям звуковых полей винтовых движителей, поршневых двигателей и винтовых летательных аппаратов самолетного типа в целом. Представлены методики проведения летных сертификационных и доводочных акустических испытаний ЛВС и БВС, соответственно. Рассмотрена проблема влияния отражений на измеряемые уровни звукового давления при выполнении исследований звуковых полей в неподготовленных помещениях. Описаны современные программно-аппаратные средства визуализации звуковых полей и представлены примеры использования многомикрофонных решеток и алгоритмов бимформинга при решении задачи локализации и ранжирования по интенсивности

основных источников шума. Представленные методики акустических испытаний могут использоваться на различных этапах проектирования винтовых летательных аппаратов самолетного типа.

Список литературы

1. Дмитриев В.Г., Самохин В.Ф., Мошков П.А. Акустика легких винтовых самолетов // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2022. № 3. С. 3–12.
2. Мошков П.А., Самохин В.Ф. Проблемы проектирования легких винтовых самолетов с учетом требований по шуму на местности // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 1. С. 19–34.
3. Environmental Protection. Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation, Montreal. Canada. ICAO. 2011. Vol. 1 Aircraft Noise. 227 p.
4. Мошков П.А. Исследование слышимости и маскировки шума винтового беспилотного воздушного судна фоном окружающей среды // Noise Theory and Practice. 2021. Т. 7. № 2 (24). С. 28–38.
5. Мошков П.А., Самохин В.Ф. Исследование влияния зазора между толкающим воздушным винтом и крылом на уровень шума легкого самолета на местности // Ученые записки ЦАГИ. 2016. Т. 47. № 6. С. 55–60.
6. 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.
7. ГОСТ ISO 3745-2014 Акустика. Определение уровней звуковой мощности и звуковой энергии источников шума по звуковому давлению. Точные методы для заглушенных и полузаглушенных камер. – М.: Стандартинформ, 2015.
8. Копьев В.Ф., Пальчиковский В.В., Беляев И.В., Берсенев Ю.В., Макашов С.Ю., Храмцов И.В., Корин И.А., Сорокин Е.В., Кустов О.Ю. Создание заглушенной установки для аэроакустических экспериментов и исследование ее акустических характеристик // Акустический журнал. 2017. Т. 63. № 1. С. 114–126.
9. Беляев И.В., Голубев А.Ю., Зверев А.Я., Макашов С.Ю., Пальчиковский В.В., Соболев А.Ф., Черных В.В. Экспериментальное исследование звукопоглощения акустических клиньев для заглушенных камер // Акустический журнал. 2015. Т. 61. № 5. С. 636–644.
10. Boxwell D.A., Schmitz F. H., Splettstoesser W.R., Schultz K.J. Helicopter model rotor-blade vortex interaction impulsive noise: Scalability and parametric variations // Journal of the American Helicopter Society. 1987. Vol. 32. No. 1, pp. 3–12.
11. ГОСТ Р 53838-2010. Двигатели автомобильные. Допустимые уровни шума и методы измерения. – М.: Стандартинформ. 2010. – 18 с.
12. ГОСТ Р ИСО 3744-2013. Акустика. Определение уровней звуковой мощности и звуковой энергии источников шума по звуковому давлению. Технический метод в существенно свободном звуковом поле над звукоотражающей плоскостью. – М.: Стандартинформ, 2014. – 60 с.
13. Мошков П.А. Акустические характеристики авиационных поршневых двигателей // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2020. № 4. С. 11–16.
14. Мошков П.А., Самохин В.Ф. Экспериментальное определение роли поршневого двигателя в суммарном шуме силовой установки легкого винтового самолета // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 2. С. 50–61.

15. Мошков П.А. Исследование шума авиационного двухтактного двухцилиндрового поршневого двигателя // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2021. Т. 25. № 2 (92). С. 48–55.
16. Мошков П.А. Исследование шума обтекания крыла беспилотного воздушного судна // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2021. № 2. С. 63–69.
17. Беляев И.В., Валиев А.В., Мошков П.А., Остриков Н.Н. Исследование акустических характеристик беспилотного летательного аппарата "Птеро-G0" в заглушенной камере АК-2 // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 4. С. 52–62.
18. Moshkov P. Ambient noise: problem and study in the framework of UAV aeroacoustics // Akustika. 2021. Vol. 41. pp. 16–21. DOI: 10.36336/akustika/20214116
19. Moshkov P. On the recalculation of the results of laboratory and static tests of propeller-driven power plants on with flight conditions // Proceedings of the 2022 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM). 2022. DOI: 10.1109/DVM55487.2022.9930927
20. Belyaev I.V., Kopiev V.F., Pankratov I.V., Skvortsov R.A., Titarev V.A., Zaytsev M.Y. Comparison of rotor noise measurement results in largescale and small-scale anechoic facilities // 21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2016. AIAA Paper No. 2015–2986. DOI: 10.2514/6.2015-2986
21. Пахов В.В., Файзуллин К.В., Денисов С.Л. Об измерении акустических характеристик модели несущего вертолетного винта в аэродинамической трубе // Акустический журнал. 2020. Т. 66. № 1. С. 46–57.
22. Шанин А.В., Валяев В.Ю. Метод последовательностей максимальной длины в акустическом эксперименте // Акустический журнал. 2011. Т. 57. № 3. С. 420–425.
23. Копьев В.Ф., Зайцев М.Ю., Остриков Н.Н., Денисов С.Л., Макашов С.Ю., Аникин В.А., Громов В.В. Об определении акустических характеристик моделей несущих вертолетных винтов на открытом стенде // Акустический журнал. 2016. Т. 62. № 6. С. 725–730.
24. Денисов С.Л., Зайцев М.Ю., Макашов С.Ю. Приложение MLS-эксперимента для идентификации и оценки возможности снижения нежелательных отражений при проведении экспериментов в аэроакустике // В книге: Тезисы докладов пятой открытой всероссийской (XVII научно-технической) конференции по аэроакустике. ЦАГИ. 2017. С. 142.
25. Sree D. Far-Field Acoustic Power Level and Performance Analyses of F31/A31 Open Rotor Model at Simulated Scaled Takeoff, Nominal Takeoff, and Approach Conditions. Technical Report I. NASA/ CR-2015-218716. 2015. 34 p.
26. ГОСТ 30457-97 (ИСО 9614-1-93) Акустика. Определение уровней звуковой мощности источников шума на основе интенсивности звука. Измерение в дискретных точках. Технический метод. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. –15 с.
27. Самохин В.Ф., Шпаковский А.А., Анимица В.А. Исследование акустических характеристик моделей несущего винта в АДТ Т-104 // В сборнике: Материалы XXIII научно-технической конференции по аэродинамике. – М.: ЦАГИ. 2012. С. 179–180.
28. Егоров С.В., Панкратов И.В., Самохин В.Ф., Шпаковский А.А. О влиянии формы концевой части лопасти на шум несущего винта вертолета // В сборнике: Материалы XXIV научно-технической конференции по аэродинамике. материалы конференции. – М.: ЦАГИ. 2013. С. 127–128.
29. Dougherty R.P. Beamforming in acoustic testing // Aeroacoustic Measurements. Springer, Berlin, Heidelberg. 2002. pp. 62–97.

30. Merino-Martínez R., Sijtsma P., Snellen M. et al. A review of acoustic imaging methods using phased microphone arrays // CEAS Aeronautical Journal. 2019. Vol. 10. No. 1. pp. 197–230 DOI:10.1007/s13272-019-00383-4
31. Бычков О.П., Демьянов М.А., Фараносов Г.А. Локализация дипольных источников шума плоскими микрофонными решетками // Акустический журнал. 2019. Т. 65. № 5. С. 675–687.
32. Hallez R., Gass, Colangeli C. Assessment of noise characteristics of innovative aerial vehicles // QUIET DRONES International e-Symposium on UAV/UAS Noise. 2020. 10 p.
33. Spehr C., Ahlefeldt T. Comparison of microphone array measurements in the closed test section of LSWT and ETW // CEAS Aeronaut J. 2019. Vol. 10. pp. 267–285. DOI: 10.1007/s13272-019-00386-1
34. Oerlemans S., Broersma L., Sijtsma P. Quantification of airframe noise using microphone arrays in open and closed wind tunnels // International Journal of Aeroacoustics. 2007. Vol. 6. No. 4. pp. 309–333.
35. Копьев В.Ф., Зайцев М.Ю., Беляев И.В. Исследование шума обтекания крупномасштабной модели крыла с механизацией // Акустический журнал. 2016. Т. 62. № 1. С. 95–105.
36. Di Marco A., Camussi R., Burghignoli L. et al. Aerodynamic and aeroacoustic investigation of an innovative regional turboprop scaled model: numerical simulations and experiments // CEAS Aeronautical Journal. 2020. Vol 11. pp. 575–590. DOI: 10.1007/s13272-020-00437-y
37. Dougherty R.P. Functional Beamforming for Aeroacoustic Source Distributions // 20th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2014. AIAA Paper No.2014-3066. DOI:10.2514/6.2014-3066
38. Peng B. The Noise Generated by a Propeller in Non-uniform Flow. PhD Thesis. Hong Kong. 2019. 89 p.
39. Stoker R., Guo Y., Streett C., Burnside N. Airframe noise source locations of a 777 aircraft in flight and comparisons with past model-scale tests // 9th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit. 2003. AIAA Paper No. 2003-3232. DOI: 10.2514/6.2003-2332
40. Pott-Pollenske M., Dobrzynski W., Buchholz H., Guérin S., Saueressig G., Finke U. Airframe noise characteristics from flyover measurements and prediction // 12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (27th AIAA Aeroacoustics Conference). 2006. AIAA Paper No. 2006-2567. DOI: 10.2514/6.2003-2567
41. Zaytsev M.Yu, Kopiev V.F., Velichko S.A., Belyaev I.V. Fly-over noise source localization during acoustic flight tests of advanced passenger aircraft // 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2019. AIAA Paper No. 2019-2426. DOI: 10.2514/6.2019-2426
42. Merino-Martinez R., Snellen M., Simons D.G. Functional Beamforming Applied to Imaging of Flyover Noise on Landing Aircraft // Journal of Aircraft. 2016. Vol. 53. No. 6. pp. 1–14. DOI: 10.2514/1.C033691
43. Camier, C., Padois, T., Provencher, J., Gauthier, P.-A., Berry, A., Blais, J.F., Patenaude-Dufour, M., Lapointe, R.: Fly-over source localization on civil aircraft // 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2013. AIAA Paper No. 2013-2261. DOI: 10.2514/6.2013-2261
44. Hallez R., Colangeli C., Cuenca J., Ryck L.D. Impact of electric propulsion on aircraft noise – all-electric light aircrafts case study // 2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium. 2018. DOI: 10.2514/6.2018-4982

1. Dmitriev V.G., Samokhin V.F., Moshkov P.A. Acoustics of Light Propeller-Driven Aircraft // *Polyot*. – 2022. – № 3. – pp. 3–12.
2. Moshkov P.A., Samokhin V.F. Problems of light propeller-driven airplane design with regard to community noise requirements // *Aerospace MAI Journal*. – 2021. – Vol. 28. – № 1. – pp. 19–34.
3. Environmental Protection. Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation, Montreal. Canada. ICAO. – 2011. – Vol. 1 Aircraft Noise. – 227 p.
4. Moshkov P.A. Study of the audibility and masking of the propeller-driven unmanned aerial vehicle noise by ambient noise // *Noise Theory and Practice*. – 2021. – Vol. 7. – № 2 (24). – pp. 28–38.
5. Moshkov P.A., Samokhin V.F. Study of the effect of the spacing between the pusher propeller and the wing on the community noise level of a light aircraft // *TsAGI Science Journal*. – 2016. – Vol. 47. – № 6. – pp. 55–60.
6. Samokhin V.F., Moshkov P.A. Study of acoustic characteristics of the Vilga-35A light propeller-driven aircraft in level flight modes // *Aerospace MAI Journal*. – 2014. – Vol. 21. – № 2. – pp. 55–65.
7. ISO 3745-2014 Acoustics. Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure. Precision methods for anechoic rooms and hemi-anechoic rooms. – 2015.
8. Kopiev V.F., Palchikovskiy V.V., Belyaev I.V., Bersenev Y.V., Khramtsov I.V., Korin I.A., Sorokin E.V., Kustov O.Y., Makashov S.Y. Construction of an anechoic chamber for aeroacoustic experiments and examination of its acoustic parameters // *Acoustical physics*. – 2017. – Vol. 63. – № 1. pp. 113–124.
9. Belyaev I.V., Golubev A.Y., Zverev A.Y., Makashov S.Y., Sobolev A.F., Chernykh V.V., Palchikovskiy V.V. Experimental investigation of sound absorption of acoustic wedges for anechoic chambers // *Acoustical physics*. – 2015. – Vol. 61. – № 5. – pp. 636–644.
10. Boxwell D.A., Schmitz F. H., Splettstoesser W.R., Schultz K.J. Helicopter model rotor-blade vortex interaction impulsive noise: Scalability and parametric variations // *Journal of the American Helicopter Society*. – 1987. – Vol. 32. – No. 1. – pp. 3–12.
11. GOST R 53838-2010. Automobile engines. Noise exposure limits and measurement techniques. – 2010.
12. ISO 3744-2013. Acoustics. Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure. Engineering method for an essentially free field over a reflecting plane. – 2014.
13. Moshkov P.A. Acoustic characteristics of aircraft piston engines // *Russian Aeronautics*. – 2020. – Vol. 63. – № 4. – pp. 568–574.
14. Moshkov P.A., Samokhin V.F. Experimental determination of piston engine share in the light propeller aircraft power plant total noise // *Aerospace MAI Journal*. – 2016. – Vol. 23. – № 2. – pp. 50–61.
15. Moshkov P.A. Study of the noise of an aircraft two-stroke two-cylinder piston engine // *Vestnik UGATU*. – 2021. – Vol. 25. – № 2 (92). – pp. 48–55.
16. Moshkov P.A. Study of the wing noise of an unmanned aerial vehicle // *Russian Aeronautics*. 2021. – Vol. 64. – № 2. – pp. 240–247.
17. Belyaev I. V., Valiev A. V., Moshkov P. A., Ostrikov N. N. Studying the PTERO-G0 unmanned flying vehicles acoustic characteristics in AK-2 anechoic chamber // *Aerospace MAI Journal*. – 2017. – Vol. 24. – № 4. – pp. 52–62.
18. Moshkov P. Ambient noise: problem and study in the framework of UAV aeroacoustics // *Akustika*. – 2021. – Vol. 41. – pp. 16–21. DOI: 10.36336/akustika/20214116
19. Moshkov P. On the recalculation of the results of laboratory and static tests

of propeller-driven power plants on with flight conditions // Proceedings of the 2022 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM). – 2022. DOI: 10.1109/DVM55487.2022.9930927

20. Belyaev I.V., Kopiev V.F., Pankratov I.V., Skvortsov R.A., Titarev V.A., Zaytsev M.Y. Comparison of rotor noise measurement results in largescale and small-scale anechoic facilities // 21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. – 2016. AIAA Paper No. 2015–2986. DOI: 10.2514/6.2015-2986

21. Pakhov V.V., Fayzullin K.V., Denisov S.L. Measuring the acoustic characteristics of a helicopter rotormodel in a wind tunnel // Acoustical physics. – 2020. – Vol. 66. – № 1. – pp. 44–55.

22. Shanin A.V., Valyaev V.Y. Method of the maximum length sequences in a diffraction experiment // Acoustical physics. – 2011. – Vol. 57. – № 3. – pp. 427–431.

23. Kop'ev V.F., Zaitsev M.Y., Ostrikov N.N., Denisov S.L., Makashov S.Y., Anikin V.A., Gromov V.V. On determining the acoustic properties of main helicopter rotor models on an open test bench // Acoustical physics. – 2016. – Vol. 62. – № 6. – pp. 741–746.

24. Denisov S.L., Zaitsev M.Yu., Makashov S.Yu. Application of the MLS experiment for identification and evaluation of the possibility of reducing unwanted reflections during experiments in aeroacoustics // In the book: Abstracts of the fifth open All-Russian (XVII Scientific and Technical) Conference on Aeroacoustics. TSAGI. – 2017. – p. 142.

25. Sree D. Far-Field Acoustic Power Level and Performance Analyses of F31/A31 Open Rotor Model at Simulated Scaled Takeoff, Nominal Takeoff, and Approach Conditions. Technical Report I. NASA/ CR-2015-218716. – 2015. – 34 p.

26. ISO 9614-1-93 Acoustics. Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity. Measurement at discrete points. Engineering method. – 1999.

27. Samokhin V.F., Shpakovsky A.A., Animitsa V.A. Investigation of acoustic characteristics of rotor models in ADT T-104 // In the collection: Materials of the XXIII Scientific and Technical Conference on Aerodynamics. Moscow. TsAGI. – 2012. – pp. 179–180.

28. Egorov S.V., Pankratov I.V., Samokhin V.F., Shpakovsky A.A. On the influence of the shape of the end part of the blade on the noise of the helicopter rotor // In the collection: Materials of the XXIV Scientific and Technical Conference on aerodynamics. Materials of the conference. Moscow. TsAGI. – 2013. – pp. 127–128.

29. Dougherty R.P. Beamforming in acoustic testing // Aeroacoustic Measurements. Springer. Berlin. Heidelberg. – 2002. – pp. 62–97.

30. Merino-Martínez R., Sijtsma P., Snellen M. et al. A review of acoustic imaging methods using phased microphone arrays // CEAS Aeronautical Journal. – 2019. – Vol. 10. – No. 1. – pp. 197–230 DOI:10.1007/s13272-019-00383-4

31. Bychkov O.P., Demyanov M.A., Faranosov G.A. Localization of dipole noise sources using planar microphone arrays // Acoustical physics. – 2019. – Vol. 65. – № 5. – pp. 567–577.

32. Hallez R., Gass, Colangeli C. Assessment of noise characteristics of innovative aerial vehicles // QUIET DRONES International e-Symposium on UAV/UAS Noise. – 2020. – 10 p.

33. Spehr C., Ahlefeldt T. Comparison of microphone array measurements in the closed test section of LSWT and ETW // CEAS Aeronaut J. – 2019. – Vol. 10. – pp. 267–285. DOI: 10.1007/s13272-019-00386-1

34. Oerlemans S., Broersma L., Sijtsma P. Quantification of airframe noise using microphone arrays in open and closed wind tunnels // International Journal of Aeroacoustics. – 2007. – Vol. 6. – №. 4. – pp. 309–333.

35. Kopiev V.F., Zaytsev M.Y., Belyaev I.V. Investigation of airframe noise for a large-scale wing model with high-lift devices // Acoustical physics. – 2016. – Vol. 62. – № 1. – pp. 97–107.

-
36. Di Marco A., Camussi R., Burghignoli L. et al. Aerodynamic and aeroacoustic investigation of an innovative regional turboprop scaled model: numerical simulations and experiments // CEAS Aeronautical Journal. – 2020. – Vol. 11. – pp. 575–590. DOI: 10.1007/s13272-020-00437-y
37. Dougherty R.P. Functional Beamforming for Aeroacoustic Source Distributions // 20th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. – 2014. AIAA Paper No.2014-3066. DOI:10.2514/6.2014-3066
38. Peng B. The Noise Generated by a Propeller in Non-uniform Flow. PhD Thesis. Hong Kong. – 2019. – 89 p.
39. Stoker R., Guo Y., Streett C., Burnside N. Airframe noise source locations of a 777 aircraft in flight and comparisons with past model-scale tests // 9th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit. – 2003. AIAA Paper No. 2003-3232. DOI: 10.2514/6.2003-2332
40. Pott-Pollenske M., Dobrzynski W., Buchholz H., Guérin S., Saueressig G., Finke U. Airframe noise characteristics from flyover measurements and prediction // 12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (27th AIAA Aeroacoustics Conference). – 2006. AIAA Paper No. 2006-2567. DOI: 10.2514/6.2003-2567
41. Zaytsev M.Yu, Kopiev V.F., Velichko S.A., Belyaev I.V. Fly-over noise source localization during acoustic flight tests of advanced passenger aircraft // 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. – 2019. AIAA Paper No. 2019-2426. DOI: 10.2514/6.2019-2426
42. Merino-Martinez R., Snellen M., Simons D.G. Functional Beamforming Applied to Imaging of Flyover Noise on Landing Aircraft // Journal of Aircraft. – 2016. – Vol. 53. – No. 6. – pp. 1–14. DOI: 10.2514/1.C033691
43. Camier, C., Padois, T., Provencher, J., Gauthier, P.-A., Berry, A., Blais, J.F., Patenaude-Dufour, M., Lapointe, R.: Fly-over source localization on civil aircraft // 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. – 2013. AIAA Paper No. 2013-2261. DOI: 10.2514/6.2013-2261
44. Hallez R., Colangeli C., Cuenca J., Ryck L.D. Impact of electric propulsion on aircraft noise – all-electric light aircrafts case study // 2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium. – 2018. DOI: 10.2514/6.2018-4982

УДК: 625.098
OECD: 2.03

Вертолетный шум и его особенности: механизмы образования, последовательность обработки акустических сигналов, гигиеническая оценка и защита

Зинкин В.Н.^{1*}, Драган С.П.², Дроздов С.В.³, Харитонов В.В.⁴

¹ Д.м.н., профессор консультант Волгоградский государственный медицинский университет,
г. Волгоград, РФ

² Д.т.н., заведующий отделом

³ Старший научный сотрудник

⁴ К.т.н., доцент Филиала «Взлёт» Московского авиационного института (государственного технического университета), г. Ахтубинск, РФ
^{2,3} ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА г. Москва, РФ

Аннотация

Основными источниками шума вертолета МИ-8 являются турбовальные двигатели, трансмиссия и винты. Шумы отличаются по механизму их образования, что создает основу для формирования сложного акустического сигнала. Вертолетный шум имеет свои «специфические» особенности, которые создают трудности для гигиенической оценки на рабочих местах внутри вертолета. Необходимо соблюдать определенную методическую последовательность при обработке параметров вертолетного шума. Условия труда внутри вертолета по шуму соответствуют вредным (класс 3.1-3.4), а по инфразвуку – допустимому (класс 2) и вредному (класс 3.1-3.2). Наличие на рабочих местах вертолетных экипажей совокупности вредных факторов в виде шума, инфразвука и общей вибрации надо рассматривать как риск их здоровью. Уровни шума на рабочих местах в вертолете превышают нормативные значения, что требует использования средств индивидуальной защиты. Существующие защитные шлемы у экипажей вертолетов не обеспечивают достаточную акустическую безопасность, что требует их совершенствования.

Ключевые слова: вертолет, шум, инфразвук, класс условий труда, риск здоровью, средства защиты.

Helicopter noise and its features: mechanisms of formation, sequence of acoustic signal processing, hygienic assessment and protection

Zinkin V.N.^{1*}, Dragan S.P.², Drozdov S.V.³, Kharitonov V.V.⁴

¹ M.D., professor consultant Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia

² DSc, head of the Department

³ Senior researcher department

^{2,3} of the A.I. Burnazyan Federal State Budgetary Research Center FMBA, Moscow, Russia

⁴ PhD, associate Professor Branch 'Vzlet' of the Moscow Aviation Institute (State Technical University), Akhtubinsk, Russia

Abstract

The main noise sources of the MI-8 helicopter are turboshaft engines, transmission and propellers. Noises differ in the mechanism of their formation, which creates the basis for the formation of a complex

acoustic signal. Helicopter noise has its own "specific" features that create difficulties for hygienic assessment at workplaces inside the helicopter. It is necessary to observe certain methodical sequence when processing helicopter noise parameters. The working conditions inside the helicopter correspond to harmful noise (class 3.1-3.4), and according to infrasound - permissible (class 2) and harmful (class 3.1-3.2). The presence of a combination of harmful factors in the form of noise, infrasound and general vibration in the workplaces of helicopter crews should be considered as risk to their health. Noise levels at workplaces in the helicopter exceed the regulatory values, which requires the use of personal protective equipment. The existing protective helmets of helicopter crews do not provide sufficient acoustic safety, which requires their improvement.

Keywords: *helicopter, noise, infrasound, class of working conditions, health risk, protective equipment.*

Введение

Одной из особенностей современной авиации является большое количество источников шума. Основным источником шума являются силовые установки воздушных судов (ВС). Систематическое действие шума как вредного фактора на авиационных специалистов в процессе их профессиональной деятельности приводит к развитию у них шумовой патологии. Наличие источников высокоинтенсивного шума требует гигиенического контроля рабочих мест авиационных специалистов [1-4].

Вертолеты относятся к одному из самых массовых видов ВС. Наличие на борту вертолета нескольких источников генерации шума, отличающихся механизмом образования, обуславливают специфические особенности вертолетного шума. Сложный спектральный состав шума требует правильности его регистрации, последовательности обработки и оценки полученных параметров [5-7].

Представление о механизмах образования шума внутри вертолета позволит разработать технические способы его снижения, предупредит вредное действие на работоспособность экипажа, уменьшит риск заболеваний, что будет способствовать безопасности полетов [8-10].

Защитные шлемы (ЗШ) у членов экипажа вертолета предназначены для защиты головы от механических воздействий, а также для обеспечения связи внутри вертолета и с руководителями полетов. Кроме того, они снижают вредное действие шума на орган слуха и вероятность развития профессиональной тугоухости [11-13].

Цель работы: изучить акустические особенности шума на рабочих местах персонала вертолета Ми-8, механизмы его образования, обосновать последовательность его обработки, дать оценку условиям труда и эффективности средств защиты.

1. Методы исследования

В качестве объекта исследований был выбран центральный салон МИ-8, в котором проводили акустические измерения при работе силовой установки в наземных условиях в различных режимах ее работы (запуск, «малый газ» и «правая коррекция»). Измерения проводили цифровым шумомером SVAN-945A (анализатор спектра 1 класса) и микрофоном типа GRAS 40AZ в соответствии с СанПиНом 2.2.4.3359-16, 1.2.3685-21 [14, 15] и СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [16]. Шесть микрофонов, расположенные на стойках на высоте 1,2 м от поверхности пола, разместили рядом с откидными креслами вдоль обоих бортов центрального отсека (по тексту это точки 1-6).

Обработку результатов акустических измерений проводили, руководствуясь положениями [14-16]. Для гигиенической оценки акустической обстановки по шуму

использовали эквивалентный уровень звука ($L_{A_{\text{ЭКВ}}}$, дБА); максимальный уровень звука (УЗ) по шкале "А", измеренные с временными коррекциями "медленно" - S ($L_{SA \text{ max}}$, дБА) и "импульс" - I ($L_{iA \text{ max}}$, дБА) и пиковый УЗ по шкале "С" (Пик С, дБС), а для инфразвука (ИЗ) – эквивалентные уровни звукового давления (УЗД) за рабочую смену в октавных полосах частот 2, 4, 8, 16 Гц - $L_{p,1/1,eq,8h}$, дБ; эквивалентный общий уровень ИЗ за рабочую смену ($L_{p,ZI,eq,8h}$, дБ) и максимальный общий уровень ИЗ, измеренный с временной коррекцией S (медленно). Анализ спектра акустических сигналов проводили по линейной шкале в октавных и 1/3 октавных частотных полосах.

В наземных условиях была проведена регистрация акустических параметров шумомером внутри транспортного отсека вертолета при работе силовой установки в режимах запуск, «малый газ» и «правая коррекция». Обработку акустических сигналов проводили в определенной последовательности. В начале определили УЗД в инфра- и звуковом диапазонах и рассчитали параметры, рекомендуемые [14-16]. На основании их анализа была дана гигиеническая оценка акустической обстановки и условий труда на рабочих местах в вертолете [17].

2. Результаты измерений акустических параметров в центральном отсеке вертолета МИ-8 при работе силовой установки в различных режимах

Установлено, что при работе силовой установки в режиме «запуск двигателя» УЗД в точке 1 внутри отсека изменялись от 75,1 до 90,6 дБ в октавных полосах от 31,5 до 8000 Гц. Наличие акустических колебаний во всем звуковом диапазоне указывало на широкополосный характер шума. Наиболее высокие УЗД зарегистрированы в октавной полосе 500 Гц (88,3 дБ) и 1000 Гц (90,6 дБ) с превышением предельно допустимого уровня (ПДУ) на 1-6 дБ.

В режиме «малый газ» (мощность работы двигателя 68–71%) УЗД в точках 1 и 6 находился в диапазоне от 74,6 до 89,4 дБ на всех регистрируемых частотах, что свидетельствовало о наличии широкополосного шума. Максимум спектра приходится на область низких (500 Гц) и средних (1000-2000 Гц) частот с превышением ПДУ на 1-3 дБ. Различие УЗД между точками 1 и 6 практически отсутствует. Как видно, увеличение мощности силовой установки с 18 % (при запуске двигателя) до 71 % (режим «малый газ») не сопровождалось увеличением интенсивности шума.

На рисунке 1 представлена гистограмма УЗД шума в отсеке вертолета при работе силовой установки в режиме «правой коррекции» (мощность работы двигателя 83-84 %).

На рисунке цветом обозначены точки измерения 1-6 и ПДУ - предельно допустимые уровни УЗД в октавных полосах частот.

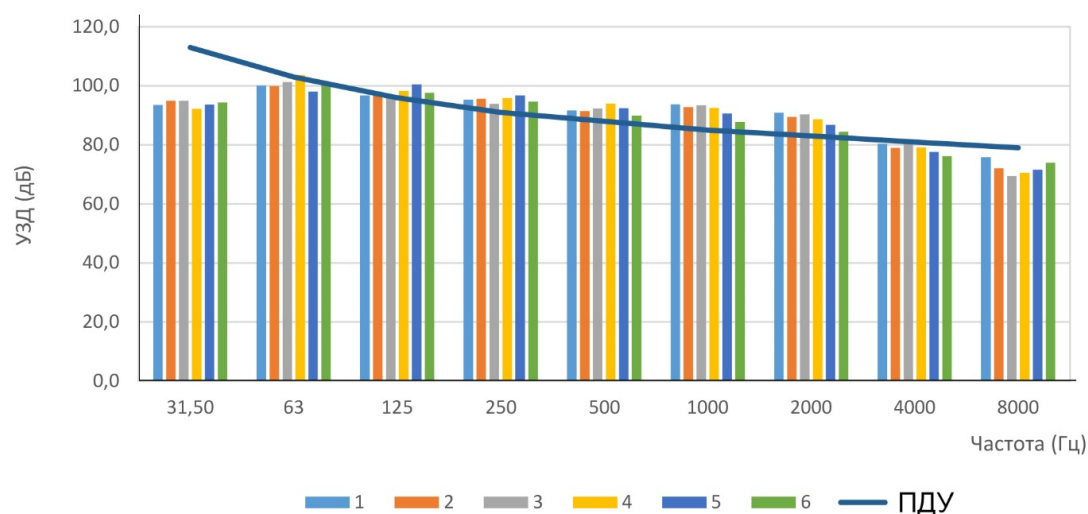


Рис. 1. Уровни звукового давления звука в отсеке вертолета Ми-8 при работе силовой установки в режиме «правой коррекции»

Из рис. 1 следует, в режиме «правой коррекции» в отсеке вертолета имеется шум во всех точках, УЗД которого колеблется от 70,6 дБ до 103,7 дБ во всем частотном диапазоне, тем самым указывая на наличие широкополосного интенсивного шума. Наиболее высокие УЗД (свыше 90 дБ) приходятся на частоты 31,5-2000 Гц, а минимальные - 8000 Гц (ниже 80 дБ). Максимальная мощность спектра приходится на область низких и средних частот. В точке 1 УЗД достиг наибольших величин практически во всем диапазоне частот. УЗД в октавных полосах от 63 Гц до 2000 Гц превышают ПДУ на 1-9 дБ. В остальных октавных полосах УЗД в норме. Разница УЗД в точках измерения изменяется в октавах от 2 до 6 дБ.

Из вышеизложенного следует, что в центральном отсеке вертолета образуется широкополосный шум при всех режимах работы силовой установки. Причиной его образования является работа турбин за счет выброса нагретых воздушных потоков. Наибольших значений УЗД достигает на максимуме мощности работы турбин в режиме «правой коррекции». При снижении мощности работы турбин интенсивность шума существенно уменьшается (на 3-10 дБ), особенно в области низких частот. Зависимость интенсивности шума от мощности работы силовой установки вертолета прямо указывает на газодинамическую природу генерации шума внутри вертолета.

Установлено, что при работе силовой установки на режиме «малый газ» и «запуск» в центральном отсеке образуется ИЗ во всех октавных полосах от 2 до 16 Гц, то есть он имеет широкополосный характер. Наибольших величин УЗД достиг в области 8 и 16 Гц (94 и 90 дБ соответственно), но не превышает ПДУ. Увеличение мощности работы турбин с 18 % (запуск двигателя) до 71 % (режим «малый газ») практически не сопровождается увеличением интенсивности ИЗ (по аналогии с шумом).

На рис. 2 представлена гистограмма УЗД инфразвука в отсеке вертолета при работе силовой установки в режиме «правой коррекции» (мощность работы двигателя 83-84 %).

На рисунке цветом обозначены точки 1 - 6 и ПДУ УЗД в октавных полосах частот в средствах транспорта в соответствии с [15].

Из рис. 2 следует, что в этом режиме во всех исследуемых точках центрального

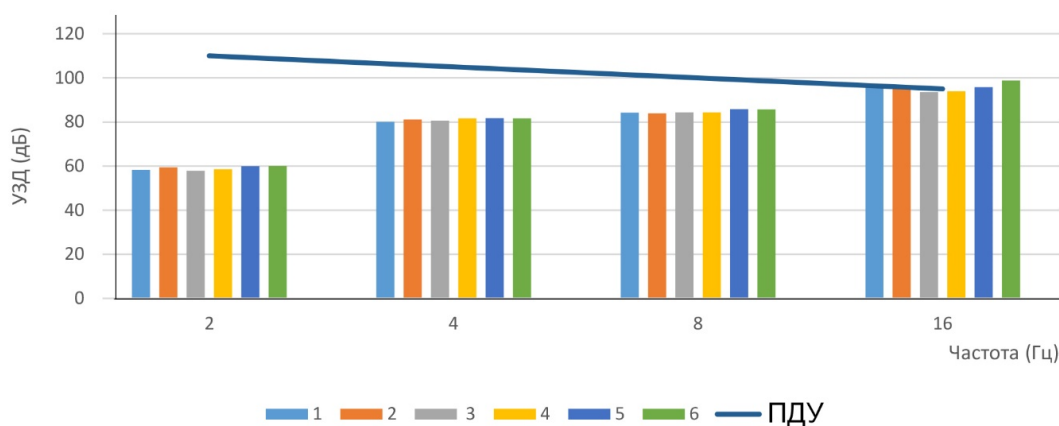


Рис. 2. Уровни звукового давления инфразвука в отсеке вертолета Ми-8 при работе силовой установки в режиме «правой коррекции»

отсека вертолета имеется ИЗ, УЗД которого изменялся от 57,9 до 98,8 дБ. Наибольшей величины он достиг в октавной полосе 16 Гц (98,8 дБ), а минимальный - 2 Гц (57,9 дБ). Превышение ПДУ (на 3,8 дБ) выявлено только в октавной полосе 16 Гц. Полученные результаты показывают, что ИЗ в центральном отсеке независимо от режима работы двигателя широкополосный. Наибольших величин он достигает на максимуме мощности работы турбин, то есть в режиме «правой коррекции», а при снижении мощности интенсивность ИЗ существенно уменьшается (на 8 дБ).

Итак, при работе двигателей вертолета в отсеке имеет место интенсивный широкополосный шум, который можно охарактеризовать как низко-среднечастотный. Особенностью этого шума является наличие в спектре широкополосного ИЗ. Шум превышает ПДУ до 8 дБ, поэтому он является интенсивным и сверхнормативным. Его формирование начинается с запуска двигателя, длительность которого не превышает 5 мин. В режим «малый газ» силовая установка вертолета работает не более 2 мин. Режим «правой коррекции» длится от 2,5 до 4 ч, то есть личный состав, находящийся на борту вертолета, практически весь период полета (95% от общего времени полета) подвергается интенсивному шуму, превышающий ПДУ. Изменение УЗД в отсеке не превышает 5 дБА, то есть вертолетный шум можно охарактеризовать как постоянный.

Таким образом, вертолетный шум на рабочих местах имеет следующие характеристики: широкополосный, постоянный, интенсивный, наличие инфразвуковой составляющей. Наличие максимумом в области низких (63-250 Гц) и средних частот (500-1000 Гц) позволяет вертолетный шум отнести к низко-среднечастотному шуму. Широкополосный спектр шума указывает на газодинамическое происхождение в результате работы турбин, которые расположены в верхней части по центру фюзеляжа. Подтверждается это следующим:

- снижение мощности турбин приводит к уменьшению шума в центральном отсеке;
- широкополосность в звуковом и инфразвуковом диапазонах обусловлена истечением из сопла турбин высокоскоростных нагретых газовых потоков.

3. Гигиеническая оценка акустической обстановки внутри вертолета МИ-8

Как было показано выше, персонал вертолета подвергается влиянию шума в основном во время полета, поэтому параметры «режима правой коррекции» необходимо использовать для расчета нормируемых акустических параметров для рабочих мест внутри отсеков вертолета (см. табл. 1).

Таблица 1

Гигиенические параметры шума внутри вертолета при работе силовой установки в режиме «правой коррекции»

Точка измерения	Нормируемые акустические параметры			
	$L_{A_{ЭКВ}}$, дБА	L_{SA} max, дБА	L_{iA} max, дБА	Пик С, дБС
1	97,4	99,4	105,5	118,3
2	96,5	97,7	103,4	117,3
3	97,0	99,5	105,3	118,2
4	96,8	97,4	103,7	118,9
5	95,5	96	102,3	117,3
6	93,0	93,6	98,0	117,2
ПДУ	80	110	125	137

Примечание : Жирным шрифтом выделены значения, превышающие ПДУ [15].

Из табл. 1 следует, что при летной смене 8 ч $L_{A_{ЭКВ}}$ во всех точках центрального салона выше ПДУ (80 дБА) на 13,0-17,4 дБА. При снижении полетного времени до 2,5 ч величина $L_{A_{ЭКВ}}$ увеличится приблизительно до 95 дБА и практически будет соответствовать фактической величине $L_{A_{ЭКВ}}$ в салоне вертолета (93-97,4 дБА). Поэтому полетное время свыше 2,5 ч будет превышать безопасное время, а личный состав будет подвергаться сверхнормативному действию шума, что требует использования средства индивидуальной защиты (СИЗ) от шума [15, 16].

Шум в центральном отсеке вертолета не является импульсным. Это следует из того, что максимальные уровни звука в точках 1-6, зарегистрированные с временной коррекцией S (93,6-99,5 дБА) и I (98,0-105,5 дБА), не превышают ПДУ соответственно 110 дБА и 125 дБА [15, 16], разница между этими параметрами не превышает 7 дБА, а пиковые УЗ ниже ПДУ 137 дБС (см. табл.1).

Проверка вертолетного шума на соответствие его тональному шуму [14, 15] показала наличие в спектре тонов, что объясняется наличием винтов. Несущий винт вращается с частотой 178–186 оборотов/минуту в режиме работы двигателя «правой коррекции», то есть с частотой около 3 Гц. Наличие у него пяти лопастей способствует образованию тонального шума с частотой 15-16 Гц (это первая гармоника) и последующих: второй - тон с частотой 32 Гц, третьей - 48 Гц, четвертой - 68 Гц (64 Гц), шестой - 97 Гц (96 Гц), седьмой - 111 Гц (112 Гц) и десятой - 166 Гц (160 Гц). В скобках указана расчетная частота гармоники. Причиной колебания частоты гармоник может быть девиация вращения несущего винта от 178 до 186 оборотов/минуту. Кроме того, вращение хвостового винта (частота вращения винта \sim 1190 оборотов/минуту и наличие 3 лопастей) может оказывать влияние на образование тоновых сигналов внутри вертолета.

Необходимо рассмотреть в качестве механизма формирования тонального сигнала возможность формирования резонанса в центральном отсеке вертолета. Этот феномен

возникает из-за того, что фюзеляж вертолета находится в поле действия интенсивного акустического поля с наличием в спектре низких частот и ИЗ, длина волн которых соизмерима с геометрическими размерами салонов.

В соответствии с требованиями [14, 15] был проведен анализ 1/3 октавный анализ зарегистрированных сигналов внутри вертолета, что позволило утверждать о наличии тонального шума на частотах 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100 и 125 Гц в точках 1-6. УЗД находился в диапазоне от 85,3 дБ (точка 5) до 103,7 дБ (точка 4). Выявлено превышение уровня в 1/3-октавных полос с центральными частотами 25 и 32 Гц в точке 2, а также - 50 Гц и 63 Гц в точке 4 над соседними частотами более чем на 10 дБ. Полученные результаты позволяют утверждать, что тональный шум присутствует в центральном отсеке вертолета, а основной причиной его образования является вращение винтов.

Считаем, что необходимо продолжить исследования механизмов образования тонов внутри вертолета для поиска оптимальных путей их снижения. Кроме предложенных выше методов, регистрацию вертолетного шума надо проводить одновременно снаружи и внутри с обязательной временной синхронизацией шумомеров снаружи и внутри вертолета при наличии данных о частоте вращения винтов. Это позволит определить природу тонов при спектральном анализе акустических сигналов.

Выше было показано, что максимум спектральной плотности вертолетного шума находится в диапазоне низких частот. При регистрации такого низкочастотного шума шумомером с использованием шкалы «А» за счет фильтров снижается УЗД на низких частотах, то есть интенсивность ($L_{Aэкв}$) акустического сигнала будет занижена. Поэтому она не соответствует реальному действию шума на человека, так как не учитываются биологические эффекты присущие ИЗ и низкочастотным колебаниям [18–21].

В табл. 2 приведены параметры ИЗ, которые были измерены в отсеке вертолета для гигиенической оценки условий труда согласно [14-16]. Дополнительно в ней имеется общий УЗД ($L_{УЗД}$), который измеряется по линейной шкале в диапазоне от 2-8000 Гц, то есть с учетом низкочастотного и инфразвукового диапазонов вертолетного шума.

Таблица 2

Гигиенические параметры инфразвука в отсеке вертолета при работе силовой установки в режиме «правой коррекции»

Точки измерения	УЗД (дБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами (Гц)				$L_{p,ZI,eq}$, дБ ($L_{инфр}$)	L_S max, дБ	$L_{УЗД}$ дБ Лин
	2	4	8	16			
1	58,2	80,1	84,3	95,9	98,5	107,5	105,1
2	59,4	81,2	83,9	95,8	98,9	106,4	105,1
3	57,9	80,5	84,4	93,6	97,1	107,3	105,4
4	58,6	81,6	84,4	93,9	97,8	107,7	106,6
5	59,9	81,7	85,8	95,8	98,4	107,3	105,3
6	60,0	81,6	85,7	98,8	102,2	108,0	105,6
ПДУ*	100	95	90	85	100	120	-

Примечание : жирным шрифтом выделены величины, превышающие ПДУ.

Как следует из табл. 2, величина УЗД инфразвука в октавных полосах 2, 4, 8 Гц во всех точках отсека ниже ПДУ. Превышение последнего на 8,6-13,8 дБ выявлено только в октавной полосе с частотой 16 Гц во всех точках. Не выявлено превышения общего УЗД ИЗ ($L_{p,ZI,eq}$) и максимального УЗД (L_S max), кроме точки 6, в которой $L_{инфр}$ превысил норму на 2,2 дБ. Изменение УЗД в точках 1-6 отсека в октавном диапазоне ИЗ

не превышает 1,5 дБ. Поэтому инфразвуковой шум на рабочих местах в вертолете можно характеризовать как широкополосный и равномерный.

Сравнение величины $L_{УЗД}$ (105,1-106,6 дБ Лин) (см. табл. 2) с величиной $L_{АЭКВ}$ (93,0-97,4 дБА) (см. табл. 1) показывает превышение первого параметра над вторым на 10 дБ. На основании данного критерия можно утверждать, что максимум спектральной плотности вертолетного шума приходится на диапазон ИЗ и/или низких частот. Это указывает на необходимость проведения измерения УЗД не только в звуковом диапазоне, но и в инфразвуковом и регистрации сигнала для последующего спектрального анализа.

Сравнение параметра $L_{УЗД}$ (дБ Лин) с величиной параметра $L_{p,ZI,eq}$, показывает его превышение на 3-9 дБ (см. табл. 2). Первый показывает акустическую нагрузку на человека не только в звуковом диапазоне, но и в инфразвуковом.

Таким образом, спектральный анализ вертолетного шума позволил проанализировать характер шума внутри салона. Показано, что широкополосный шум сочетается с интенсивными тонами, механизм образования которых связан с работой винтов. При определении $L_{АЭКВ}$ тонального шума в салоне вертолета надо учитывать поправку k_i (5 дБ при $L_{p,Aeq,T_i} > 75$ дБА) [14, 15]. Присутствие в спектре вертолетного шума инфразвуковой компоненты показывает необходимость регистрации с последующей гигиенической оценкой как шума, так и ИЗ. Необходимо учитывать, что наличие в вертолетном шуме акустических колебаний звукового и инфразвукового диапазонов будет приводить к сочетанию и кумуляции вредных эффектов, присущих шуму и ИЗ [22–24].

4. Оценка условий труда на рабочих местах вертолета Ми-8

Профессиональная деятельность летного состава протекает в условиях действия комплекса вредных и опасных факторов, что создает трудности при оценке условий труда. Установлено, что профессиональная деятельность экипажей ВС соответствует вредному классу напряженного труда (класс 3.2) [3, 25], а по показателям вредности и опасности факторов производственной среды - вредным (класс 3.1-3.4) и опасному (класс 4) классам условиям труда (КУТ), то есть она происходит в условиях высокого риска развития профессиональных заболеваний. Установлено, что среди вредных факторов у авиационных специалистов доминирует шум [1, 26].

На основании результатов акустических измерений и рекомендаций [17] определен КУТ для переднего и центрального отсеков МИ-8 (см. табл. 3).

Таблица 3

Классы условий труда по шуму и инфразвуку на различных рабочих местах внутри вертолета Ми-8

Место измерения	Шум ($L_{АЭКВ}$ дБА)				Инфразвук ($L_{p,ZI,eq}$, дБ)			
	Уровень	ПДУ	Δ (дБ)	КУТ	Уровень	ПДУ	Δ (дБ)	КУТ
Центральный отсек	98-102	80	18-22	3.3-3.4	97-102	100	2	3.1
Кабина экипажа	98-102	80	18-22	3.3-3.4	97-102	95*	2-7	3.1-3.2

Примечание : Δ – превышение фактической величины над ПДУ; * - ПДУ на рабочих местах «различной степени интеллектуально-эмоциональной напряженности» [15, 16].

В табл. 3 $L_{A_{экв}}$ (с учетом поправки K_i) находится в пределах 98-102 дБ в различных точках центрального отсека и Δ составит 18-22 дБ. Такая величина превышения ПДУ шума будет соответствовать вредному КУТ (класс 3.3–3.4). Для ИЗ превышения ПДУ составило 2 дБ и это соответствует вредному КУТ (класс 3.1).

Несмотря на отсутствие измерений акустических параметров в кабине вертолета, можно дать оценку рабочих мест в кабине экипажа, которая представляет собой передний отсек фюзеляжа вертолета. Размеры переднего отсека (объем около 9 м³) меньше центрального (объем около 23 м³), и они разделены тонкой перегородкой, не обладающей звукоизоляцией. Близкие параметры салонов вертолета, одни и те же источники шума позволяют прогнозировать, что акустическая обстановка в обоих отсеках вертолета будет близкая. Поэтому можно прогнозировать, что экипаж вертолета будет подвергаться вредному действию шума и ИЗ, как и личный состав центрального отсека. Δ по шуму составит 18-22 дБ и будет соответствовать КУТ вредному (классу 3.3-3.4). Для оценки КУТ по ИЗ была использована величина ПДУ 95 дБ, которая согласно [15, 16] является величиной для рабочих мест «различной степени интеллектуально-эмоциональной напряженности». Как было показано выше, профессиональная деятельность экипажей ВС соответствует вредному классу напряженного труда (класс 3.2). Поэтому считаем целесообразным для экипажей вертолетов в качестве ПДУ применять величину 95 дБ. В этом случае величина Δ составит 2-7 дБ, что соответствует КУТ по ИЗ вредному (классу 3.1-3.2). Из представленных выше данных, следует, что КУТ внутри отсеков вертолета по шуму и ИЗ соответствуют вредному классу. Поэтому профессиональная деятельность экипажей вертолетов во вредных условиях труда представляет высокий риск их здоровью [27-30].

5. Защита экипажа от вредного действия вертолетного шума

Приведенные выше результаты измерений показывают, что личный состав вертолетов подвергается действию шума, превышающего допустимую величину, что, согласно санитарным правилам требует применение СИЗ от шума [15, 16]. Интенсивный характер вертолетного шума и наличие в его спектре низких и инфразвуковых частот предполагают, что противошумы должны перекрыть поступления шума в орган слуха не только воздушным путем, но и костным [11, 31, 32].

В настоящее время на снабжении армейской авиации (вертолеты) в качестве СИЗ от шума используются ЗШ (тип ЗШ-17В, ЗШ-7В и др). Их звукоизоляция (до 30-40 дБ) эффективна на высоких частотах (6000-8000 Гц), а в области на низких частотах (125-500 Гц) она недостаточна, так как не превышает 5 дБ. Поэтому ЗШ в области средних и высоких частот звукового диапазона снизят акустическую нагрузку на орган слуха летного экипажа до нормативных значений. Недостаточная эффективность ЗШ в области низких частот не обеспечит защиту от их неблагоприятного действия низкочастотной компоненты вертолетного шума. Поэтому у персонала имеется достаточно высокий риск развития тугоухости (специфическое действие шума). Кроме того, наличие интенсивного ИЗ и общей вибрации будут способствовать усилению риска вредного влияния вертолетного шума не только на орган слух, но и другие органы и системы (легкие, органы кровообращения, нервная система, орган зрения, опорно-двигательный аппарат). Риск развития у личного состава вертолетов специфической и неспецифической патологии как следствие действия вредных факторов труда и трудовой деятельности требует проведения комплекса лечебно-профилактических мероприятий, включающих периодические медицинские осмотры, диспансерное наблюдение и стационарного обследования с последующей врачебной экспертизы, и допуска к полетам [9, 33].

Недостаточная защита ЗШ в области низких частот является одной из причин

негативного влияние вертолетного шума на речь и восприятие информации летным экипажем в виде помехового и маскирующего действия. Это обусловлено тем, что частотный диапазон речи человека находится в области низких и средних частот (250-2000 Гц) и совпадает с максимумом спектра вертолетного шума. Для устранения этого недостатка и улучшения качества восприятия речевых сигналов необходимо использовать гарнитуру, которая способна осуществлять передачу звука не воздушным путем, а костным. Модификация гарнитуры обеспечит речевой контакт на оптимальном уровне при действии вертолетного шума [34-36].

Заключение

Наличие нескольких источников шума при эксплуатации вертолетов обуславливает сложный механизм его образования внутри салонов. Работа турбин сопровождается генерацией газодинамического шума, работа трансмиссии формирует механический шум, а работа винтов - винтовой шум. Наличие всех источников шума в верхней части фюзеляжа, в свою очередь, способствует образованию структурного шума, который практически без ослабления проводится во все отсеки вертолета. Последние имеют замкнутый объем, что создает условия для резонанса.

Шум, который образуется при работе силовой установки внутри вертолета, можно охарактеризовать как интенсивный и сверхнормативный (свыше 100 дБ); постоянный; широкополосный с инфразвуковой составляющей; низко- и среднечастотный (максимум спектральной энергии находится в диапазоне от 500 до 2000 Гц); неравномерный; с наличием в спектре дискретных тонов. Совокупность таких особенностей позволяет классифицировать такой шум как «вертолетный шум», который имеет существенные отличия от шумов других типов ВС [3, 7].

Сложный характер вертолетного шума затрудняет его оценку. Наличие только октавного анализа не позволит выявить все параметры, присущие этому шуму. Поэтому необходима регистрация акустического сигнала для обработки его на последующих этапах с использованием специальных программ. Обязательным элементом является спектральный анализ в октавном и 1/3-октавном диапазонах, а также определение линейного спектра. Наличие винтового шума, резонансов и низких частот надо рассматривать как причину формирования тональных сигналов. При выявлении в спектре шума тональных сигналов необходимо использовать поправку в 5 дБ для гигиенического нормирования. Получение истинной картины акустического поля внутри вертолета необходимо для выбора технических решений борьбы с шумом внутри вертолета, что требует соблюдения методики и последовательности обработки вертолетного шума.

Низкочастотный характер спектра шума и наличие инфразвуковой составляющей обуславливают проведения измерений по линейной шкале. Данный подход позволяет более объективно оценивать действие вертолетного шума на человека и определить пути борьбы с его негативными последствиями.

Вертолетный шум в силу своих особенностей создает профессиональный риск здоровью экипажей и развития у них шумовой и инфразвуковой патологии. Уровни шума и ИЗ внутри вертолета Ми-8 превышают ПДУ, что требует использования СИЗ на рабочих местах, которые способны надежно перекрывать воздушный и костный пути поступления акустических колебаний в орган слуха. Существующие табельные ЗШ для экипажей вертолетов не обеспечивают эффективную защиту органа слуха от низких и инфразвуковых частот, поэтому требуется их усовершенствование [37, 38].

Считаем, что представленные результаты исследования акустической обстановки внутри вертолета МИ-8 и рекомендации по профилактике имеют значение и для других

типов вертолетов, используемых в государственной авиации и народном хозяйстве.

Список литературы

1. Зинкин В.Н., Шешегов П.М. Современные проблемы шума в авиации // Проблемы безопасности полетов. - 2014. - № 5. - С. 3-25.
2. Жданько И.М., Зинкин В.Н., Солдатов С.К. и др. Фундаментальные и прикладные аспекты профилактики неблагоприятного действия авиационного шума // Авиакосмическая и экологическая медицина. - 2014. - Т. 48, № 4. - С. 5-16.
3. Солдатов С.К., Зинкин В.Н., Богомоллов А.В. и др. Фундаментальные и прикладные аспекты авиационной медицинской акустики. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. - 216 с.
4. Zhdanko I.M., Zinkin V.N., Soldatov S.K. et al. Fundamental and applied aspects of preventing the adverse effects of aviation noise // Human Physiology. - 2016. - Vol. 42, No. 7. - Pp. 705-714.
5. Вертолеты // Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник / Н.И. Иванов. - 3-е изд. перераб и доп. - М.: Логос, 2013. - С. 387-388.
6. Стоянович И.С. Измерение шума и вибрации в кабине вертолета Ми-8 // Vojnotehnicki glasnik / Military technical courier. - 2016. - Т. 64, № 1. - С. 176-195.
7. Харитонов В.А., Мищенко А.А., Пирожков М.В. и др. Методические подходы для оценки акустической обстановки внутри вертолета Ми-8 // Проблемы безопасности полетов. - 2020. - № 10. - С. 39-59.
8. Зинкин В.Н., Солдатов С.К., Шешегов П.М. и др. Шум как фактор риска снижения работоспособности и профессиональной надежности авиационных специалистов // Проблемы безопасности полетов. - 2014. - № 8. - С.3-28.
9. Зинкин В.Н., Шешегов П.М. Авиационный шум: риск нарушения здоровья человека и меры профилактики // Защита от повышенного шума и вибрации: Сборник докладов VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. - СПб., 2017. - С. 493-522.
10. Зинкин В.Н., Шешегов П.М. Механизмы действия авиационного шума на профессиональную работоспособность и надежность // Noise Theory and Practice. Scientific Journal. - 2021. - Т.7, № 2. - С. 165-182.
11. Харитонов В.В., Шешегов П.М., Зинкин В.Н. Оценка эффективности средств индивидуальной защиты головы в армейской авиации и пути их совершенствования // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. - 2022. - № 1. - С. 80-91.
12. Шешегов П.М., Зинкин В.Н., Харитонов В.А. Шум и инфразвук: ведущие вредные факторы на рабочих местах экипажей армейской авиации // Проблемы безопасности полетов. - 2020. - № 12. - С. 21-39.
13. Зинкин В.Н., Богомоллов А.В., Россельс А.В., Еремин Г.И. Акустическая эффективность средств индивидуальной защиты от низкочастотного шума и инфразвука // Безопасность в техносфере. - 2013. - Т. 2, № 1. - С. 64-69.
14. СанПиН 2.2.4.3359-16 Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах.
15. Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.562-96 "Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки".
16. Санитарные нормы СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормы и требования и обеспечение безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания".
17. Р 2.2.2006-05. Руководство, по гигиенической оценке, факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда.

18. Иванов Н.И., Зинкин В.Н., Сливина Л.П. Биомеханические механизмы действия низкочастотных акустических колебаний // Российский журнал биомеханики. - 2020. - № 2. - С. 216-231.
19. Зинкин В.Н., Свидовый В.И., Ахметзянов И.М. Неблагоприятное влияние низкочастотных акустических колебаний на органы дыхания // Профилактическая и клиническая медицина. - 2011. - № 3. - С. 280-284.
20. Zinkin V., Vasilyeva I., Bespalov V., Osetrov A. High-intensity low-frequency acoustic vibrations have the critical effect on the lung // J. Akustika. - 2019. - Vol.32. - Pp. 5-9.
21. Сливина Л.П., Куклин Д.А., Матвеев П.В. и др. Инфразвук и низкочастотный шум как вредные производственные факторы // Безопасность труда в промышленности. - 2020. - № 2. - С. 24-30.
22. Зинкин В.Н., Ахметзянов И.М., Драган С.П., Богомоллов А.В. Особенности сочетанного действия шума и инфразвука // Безопасность жизнедеятельности. - 2011. - № 9 (129). - С. 2-10.
23. Ахметзянов И.М., Зинкин В.Н., Петреев И.В., Драган С.П. Гигиеническая оценка сочетанного воздействия шума и инфразвука на организм военнослужащих // Военно-медицинский журнал. - 2011. - № 11. - С. 44-51.
24. Свидовый В.И., Зинкин В.Н., Солдатов С.К., Кукушкин Ю.А. Особенности условий труда и заболеваемости инженерно-технического состава авиации // Вестник Санкт-Петербургской государственной медицинской академии им. И.И. Мечникова. - 2006. - Т. 7, № 2. - С. 46-48.
25. Люцкий К.М., Зинкин В.Н., Афанасьев Р.В., Деллалов Н.Н. Влияние профессиональных факторов на заболеваемость летного и инженерно-технического состава военно-транспортной авиации // Военно-медицинский журнал. - 2008. - Т. 329, № 9. - С. 50-52.
26. Шешегов П.М., Сливина Л.П., Зинкин В.Н. Значение авиационного шума в риске развития профессиональной патологии у летно-подъемного состава Военно-воздушных сил // Медицина труда и промышленная экология. - 2020. - Т. 60, № 4. - С. 268-274.
27. Профессиональные заболевания ЛОР-органов: руководство / В.Б. Панкова, И.Н. Федина; под общ. ред. И.В. Бухтиярова, Н.А. Дайхеса. - М.: ГЭОТАР-Медиа, 2021. - 544 с.
28. Зинкин В.Н., Сливина Л.П. Риск развития нейросенсорной тугоухости у работников авиаремонтных заводов, подвергающихся воздействию шума // Безопасность труда в промышленности. - 2018. - № 1. - С. 66-71.
29. Зинкин В.Н., Солдатов С.К., Шешегов П.М. Особенности патологического действия авиационного шума на орган слуха инженерно-технического состава авиации // Вестник оториноларингология. - 2007. - № 6. - С. 25-29.
30. Шешегов П.М., Зинкин В.Н., Сливина Л.П. Авиационный шум как ведущий фактор, влияющий на заболеваемость и профессиональные риски у инженерно-авиационного состава // Авиакосмическая и экологическая медицина. - 2018. - Т. 52, № 3. - С. 62-68.
31. Зинкин В.Н., Шешегов П.М., Сливина Л.П. Обоснование выбора средств индивидуальной защиты для инженерно-авиационных специалистов государственной авиации // Безопасность труда в промышленности. - 2020. - № 7. - С. 54-59.
32. Зинкин В.Н., Богомоллов А.В., Ерёмин Г.И., Драган С.П. Технология исследования акустической эффективности средств защиты от низкочастотного шума и инфразвука // Мир измерений. - 2011. - № 10. - С. 40-45.

33. Зинкин В.Н., Шешегов П.М. Проблемы экспертизы воздействия высокоинтенсивного шума на специалистов Военно-воздушных сил // Военно-медицинский журнал. - 2012. - Т.333, № 1. - С. 45-50.
34. Шешегов П.М., Зинкин В.Н. Костная проводимость и ее возможности // Защита от повышенного шума и вибрации: сборник докладов VII Всероссийской конференции с международным участием. - 2019. - С. 765-780.
35. Шешегов П.М., Жданько И.М., Филатов В.Н., Зинкин В.Н. Костная проводимость звука и ее возможности для скрытой передачи речевой информации // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. - 2019. - № 9-10 (135-136). - С. 111-119.
36. Зинкин В.Н., Шешегов П.М. Технология исследования звукопоглощающей способности материалов на основе тональной аудиометрии // Медицинская техника. - 2014. - № 4 (286). - С. 43-47.
37. Шешегов П.М., Зинкин В.Н., Сливина Л.П. Авиационный шум: особенности формирования и профилактики нейросенсорной тугоухости у авиационных специалистов Военно-воздушных сил // Авиакосмическая и экологическая медицина. - 2019. - Т. 53, № 3. - С. 49-56.
38. Зинкин В.Н., Миронов В.Г., Солдатов С.К., Шешегов П.М. Особенности патологического действия авиационного шума на орган слуха инженерно-технического состава авиации // Российская оториноларингология. - 2007. - № 6 (31). - С. 69-74.

References

1. Zinkin V.N., Sheshegov P.M. Modern problems of noise in aviation // Problems of flight safety. - 2014. v No. 5. - Pp. 3-25.
2. Zhdanko I.M., Zinkin V.N., Soldatov S.K. et al. Fundamental and applied aspects of prevention of the adverse effects of aviation noise // Aerospace and environmental medicine. - 2014. - Vol. 48, No. 4. - Pp. 5-16.
3. Soldatov S.K., Zinkin V.N., Bogomolov A.V. and others. Fundamental and applied aspects of aviation medical acoustics. - M.: FIZMATLIT, 2019. - 216 p.
4. Zhdanko I.M., Zinkin V.N., Soldatov S.K. et al. Fundamental and applied aspects of preventing the adverse effects of aviation noise // Human Physiology. - 2016. - Vol. 42, No. 7. - Pp. 705-714.
5. Helicopters // Engineering acoustics. Theory and practice of noise control: textbook / N.I. Ivanov. 3rd ed. pererab and add. - M.: Logos, 2013. - Pp. 387-388.
6. Stoyanovich I.S. Measurement of noise and vibration in the cockpit of the Mi-8 helicopter // Vojnotehncki glasnik / Military technical courier. - 2016. - Vol. 64, No. 1. - Pp. 176-195.
7. Kharitonov V.A., Mishchenko A.A., Pirozhkov M.V. et al. Methodological approaches for assessing the acoustic situation inside the Mi-8 helicopter // Problems of flight safety. - 2020. - No. 10. - Pp. 39-59.
8. Zinkin V.N., Soldatov S.K., Sheshegov P.M. et al. Noise as a risk factor for reducing the efficiency and professional reliability of aviation specialists // Problems of flight safety. - 2014. - No. 8. - Pp.3-28.
9. Zinkin V.N., Sheshegov P.M. Aviation noise: the risk of human health disorders and preventive measures // Protection from increased noise and vibration: Collection of reports of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation. - SPb., 2017. - Pp. 493-522.

10. Zinkin V.N., Sheshegov P.M. Mechanisms of action of aviation noise on professional efficiency and reliability // *Noise Theory and Practice. Scientific Journal.* - 2021. - Vol. 7, No. 2. - Pp. 165-182.
11. Kharitonov V.V., Sheshegov P.M., Zinkin V.N. Evaluation of the effectiveness of head personal protective equipment in army aviation and ways to improve them // *Measurement. Monitoring. Management. Control.* - 2022. - No. 1. - Pp. 80-91.
12. Sheshegov P.M., Zinkin V.N., Kharitonov V.A. Noise and infrasound: leading harmful factors in the workplaces of army aviation crews // *Problems of flight safety.* - 2020. - No. 12. - Pp. 21-39.
13. Zinkin V.N., Bogomolov A.V., Rossels A.V., Eremin G.I. Acoustic effectiveness of personal protective equipment against low-frequency noise and infrasound // *Security in the technosphere.* - 2013. - Vol. 2, No. 1. - Pp. 64-69.
14. SanPiN 2.2.4.3359-16 Sanitary and epidemiological requirements for physical factors in the workplace.
15. Sanitary standards of SS 2.2.4/2.1.8.562-96 "Noise in workplaces, in residential, public buildings and on the territory of residential development."
16. Sanitary norms of SanPiN 1.2.3685-21 "Hygienic norms and requirements and ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans".
17. P 2.2.2006-05. Guidelines for the hygienic assessment of factors of the working environment and the labor process. Criteria and classification of working conditions.
18. Ivanov N.I., Zinkin V.N., Slivina L.P. Biomechanical mechanisms of action of low-frequency acoustic vibrations // *Russian Journal of Biomechanics.* - 2020. - No. 2. - Pp. 216-231.
19. Zinkin V.N., Svidovoy V.I., Akhmetzyanov I.M. Adverse effect of low-frequency acoustic vibrations on respiratory organs // *Preventive and clinical medicine.* - 2011. - No. 3. - Pp. 280-284.
20. Zinkin V., Vasilyeva I., Bepalov V., Osetrov A. High-intensity low-frequency acoustic vibrations have the critical effect on the lung // *J. Akustika.* - 2019. - Vol.32. - Pp. 5-9.
21. Slivina L.P., Kuklin D.A., Matveev P.V. et al. Infrasound and low-frequency noise as harmful production factors // *Occupational safety in industry.* - 2020. - No. 2. - Pp. 24-30.
22. Zinkin V.N., Akhmetzyanov I.M., Dragan S.P., Bogomolov A.V. Features of the combined effect of noise and infrasound // *Life safety.* - 2011. - No. (129). - Pp. 2-10.
23. Akhmetzyanov I.M., Zinkin V.N., Petreev I.V., Dragan S.P. Hygienic assessment of the combined effects of noise and infrasound on the body of military personnel // *Military Medical Journal.* - 2011. - No. 11. - Pp. 44-51.
24. Svidovoy V.I., Zinkin V.N., Soldatov S.K., Kukushkin Yu.A. Features of working conditions and morbidity of engineering and technical personnel of aviation // *Bulletin of the St. Petersburg State Medical Academy named after I.I. Mechnikov.* - 2006. - Vol. 7, No. 2. - Pp. 46-48.
25. Lyutsky K.M., Zinkin V.N., Afanasyev R.V., Dellalov N.N. The influence of professional factors on the morbidity of flight and engineering personnel of military transport aviation // *Military Medical Journal.* - 2008. - Vol. 329, No. 9. - Pp. 50-52.
26. Sheshegov P.M., Slivina L.P., Zinkin V.N. The importance of aviation noise in the risk of developing occupational pathology in the Air Force flight crew // *Occupational medicine and industrial ecology.* - 2020. - Vol. 60, No. 4. - Pp. 268-274.
27. Occupational diseases of ENT organs: manual / V.B. Pankova, I.N. Fedina; under the general editorship of I.V. Bukhtiyarov, N.A. Daikhesa. - M.: GEOTAR-Media, 2021. - 544 p.

-
28. Zinkin V.N., Slivina L.P. The risk of developing sensorineural hearing loss in workers of aircraft repair plants exposed to noise // Occupational safety in industry. - 2018. - No. 1. - Pp. 66-71.
29. Zinkin V.N., Soldatov S.K., Sheshegov P.M. Features of the pathological effect of aviation noise on the hearing organ of the engineering and technical staff of aviation // Bulletin of otorhinolaryngology. - 2007. - No. 6. - Pp. 25-29.
30. Sheshegov P.M., Zinkin V.N., Slivina L.P. Aviation noise as a leading factor affecting morbidity and occupational risks in engineering aviation personnel // Aerospace and environmental medicine. - 2018. - Vol. 52, No. 3. - Pp. 62-68.
31. Zinkin V.N., Sheshegov P.M., Slivina L.P. Justification of the choice of personal protective equipment for engineering and aviation specialists of state aviation // Occupational safety in industry. - 2020. - No. 7. - Pp. 54-59.
32. Zinkin V.N., Bogomolov A.V., Eremin G.I., Dragan S.P. Technology of research of acoustic efficiency of means of protection against low-frequency noise and infrasound // The World of Measurements. - 2011. - No. 10. - Pp. 40-45.
33. Zinkin V.N., Sheshegov P.M. Problems of examination of the impact of high-intensity noise on specialists of the Air Force // Military Medical Journal. - 2012. - Vol.333, No. 1. - Pp. 45-50.
34. Sheshegov P.M., Zinkin V.N. Bone conduction and its capabilities // Protection from increased noise and vibration: collection of reports of the VII All-Russian Conference with international participation. - 2019. - Pp. 765-780.
35. Sheshegov P.M., Zhdanko I.M., Filatov V.N., Zinkin V.N. Bone conduction of sound and its possibilities for the hidden transmission of speech information // Issues of defense technology. Series 16: Technical means of countering terrorism. - 2019. - No. 9-10 (135-136). - Pp. 111-119.
36. Zinkin V.N., Sheshegov P.M. Technology for studying the sound-absorbing ability of materials based on tonal audiometry // Medical equipment. - 2014. - No. (286). - Pp. 43-47.
37. Sheshegov P.M., Zinkin V.N., Slivina L.P. Aviation noise: features of formation and prevention of sensorineural hearing loss in aviation specialists of the Air Force // Aerospace and environmental medicine. - 2019. - Vol. 53, No. 3. - Pp. 49-56.
38. Zinkin B.N., Mironov V.G., Soldatov S.K., Sheshegov P.M. Features of the pathological effect of aviation noise on the hearing organ of the engineering and technical staff of aviation // Russian otorhinolaryngology. - 2007. - No. (31). - Pp. 69-74.

УДК: 534.32
OECD: 1.03.AA

Об экранировании шума винтомоторных силовых установок элементами планера

Мошков П.А.

К.т.н, ведущий инженер-конструктор, Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет), г. Москва, РФ

Аннотация

При интеграции винтомоторной силовой установки в компоновке летательного аппарата могут появляться аэроакустические эффекты, которые могут приводить как к снижению, так и к увеличению общего уровня шума летательного аппарата на местности. Одним из перспективных методов снижения шума на местности является экранирование шума силовой установкой элементами планера. В работе рассмотрено современное состояние данного вопроса на основе анализа доступных публикаций. Использование в экспериментах точечных всенаправленных источников шума приводит к завышению оценки снижения шума воздушного за счет экранирования. Показано, что эффект снижения шума воздушного винта за счет экранирования может быть нивелирован аэродинамической интерференцией винт-крыло. При проектировании винтовых летательных аппаратов самолетного типа, в первую очередь, необходимо ориентироваться на хорошо изученные технологии снижения шума как изолированных источников, так и установочных эффектов.

Ключевые слова: воздушный винт, шум воздушного винта, шум двигателя, экранирование шума, шум на местности, технологии снижения шума, аэроакустика.

About noise shielding of propeller-driven power plants by airframe elements

Moshkov P.A.

PhD, leading engineer-designer, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Abstract

When integrating a propeller-driven power plant in the layout of an aircraft, aeroacoustics effects may appear, which can lead to both a decrease and an increase in the overall community noise level of the aircraft. One of the promising methods of community noise reduction is noise shielding by the power plant with airframe elements. The paper considers the current state of this issue based on the analysis of available publications. The use of point omnidirectional noise sources in experiments leads to an overestimation of the air noise reduction due to shielding. It is shown that the effect of reducing the noise of the propeller due to shielding can be offset by aerodynamic interference of the propeller-wing. When designing propeller-driven fixed-wing aircraft, first of all, it is necessary to focus on well-studied noise reduction technologies for both isolated sources and installation effects.

Keywords: *propeller, propeller noise, engine noise, noise shielding, community noise, noise reduction technologies, aeroacoustics.*

Введение

Проблема снижения шума на местности винтовых летательных аппаратов самолетного типа является актуальной как для легких винтовых самолетов (ЛВС) [1], так и для винтовых беспилотных воздушных судов (БВС) самолетного типа [2]. Предельно допустимые уровни шума на местности ЛВС нормируются в соответствии со стандартом ИКАО [3, 4]. Международных норм, регламентирующих предельно допустимые уровни шума на местности винтовых БВС самолетного типа, в настоящее время не разработано, и низкие уровни шума таких аппаратов являются, в первую очередь, их конкурентным преимуществом [5]. Для дальнейшего снижения шума винтовых летательных аппаратов рассматриваются новые аэродинамические компоновки, обеспечивающие, так называемый, эффект экранирования шума силовой установки элементами планера [6].

Первоначально проблемой экранирования шума силовой установки элементами планера начали заниматься с целью поиска эффективного способа снижения шума реактивной струи двигателя. Этим вопросам было посвящено значительное количество исследований [7–9]. Считалось, что за счет рассеяния шума струи на элементах планера можно добиться существенного снижения шума летательного аппарата (ЛА) на местности. Выполненные в последнее время расчетные [10, 11] и экспериментальные исследования [12, 13] показали, что реальная эффективность экранирования существенно ниже заявленных ранее значений, но тем не менее снижение шума на местности при помощи эффекта экранирования потенциально возможно, хотя и является сложной многофакторной задачей, существенно зависящей от типа силовой установки и аэродинамической компоновки воздушного судна.

Целью работы является анализ проблемы экранирования шума винтомоторных силовых установок элементами планера.

1. Анализ работ по проблеме экранирования шума винтомоторных силовых установок

В работе [14] при исследовании экранирования шума малоразмерного винта было установлено, что тональному и широкополосному шуму свойственны различные типы экранирования. Экранирование тонального шума носит нерегулярный характер и может привести как к снижению шума тональных гармоник, так и к его усилению в зависимости от номера гармоники, угла наблюдения и расстояния между экраном и законцовкой винта. В отличие от тонального шума, экранирование широкополосного шума имеет достаточно высокую эффективность, которая слабо зависит от расстояния между экраном и законцовкой винта. Было показано, что эффект экранирования существенным образом зависит от характеристик источника звука. При использовании реального винта, который является некомпактным источником [15], аэродинамическая интерференция винта и крыла приводит к дополнительному излучению звука и эффект экранирования в таком случае становится несущественным.

В эксперименте [16] шум воздушного винта БВС Skywalker X8 (рис. 1) моделировался точечным вращающимся источником шума. На рис. 2 представлено сравнение характеристик направленности первой и второй гармоник шума винта (SPL – уровень звукового давления гармоники) при наличии и отсутствии экранирующей поверхности. Для первой гармоники шума вращения винта эффект снижения шума за счет наличия экранирующей поверхности достигает 13 дБ в задней полусфере в направлении 130° . Для второй гармоники наибольший эффект наблюдается в плоскости вращения винта (90°) и достигает 15 дБ.

Отметим также, что в работе [16] шум воздушного винта моделировался при помощи вращающегося источника. При работе реального винта в следе, а также вблизи экранирующей поверхности эффект экранирования может быть существенно меньшим за счет аэродинамической интерференции «винт-турбулентный след за фюзеляжем» и «винт-экранирующая поверхность». В работе [16] также не отмечено расстояние, для которого получены графики на рис. 2.



Рис. 1. BVC Skywalker X8 без экранирующей (а) и с экранирующей (б) поверхностями [16]

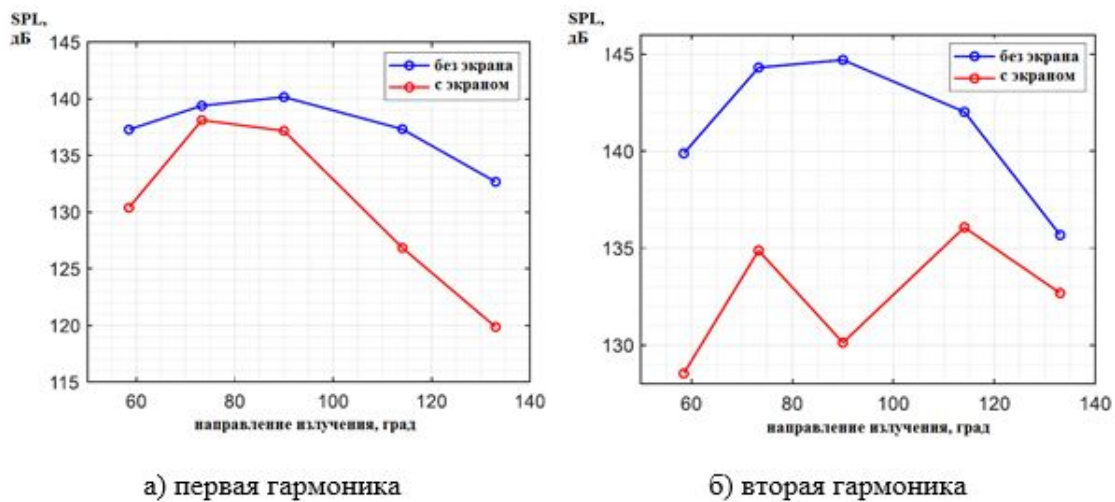


Рис. 2. Характеристики направленности первых двух гармоник шума винта при наличии и отсутствии экранирующей поверхности [16]

В работах [17, 18] представлены результаты исследования эффективности экранирования точечного настроенного источника и реального воздушного винта крылом. В эксперименте использовалось крыло с хордой 24,5 см и длиной 123 см с аэродинамическим профилем НАСА34-008А. Было рассмотрено три режима работы воздушного винта Airscrew E-MA1260T (рис. 3) в статических условиях, характеризующихся различной частотой вращения (n) 4400, 7000 и 7600 об/мин. Привод воздушного винта осуществлялся с помощью электродвигателя Kontronik PYRO 700-45. В качестве

точечного настроенного источника шума использовался миниатюрный всенаправленный источник QindW, разработанный компанией Qsources (рис. 3). При испытаниях генерировался белый шум в диапазоне частот 500-6300 Гц.

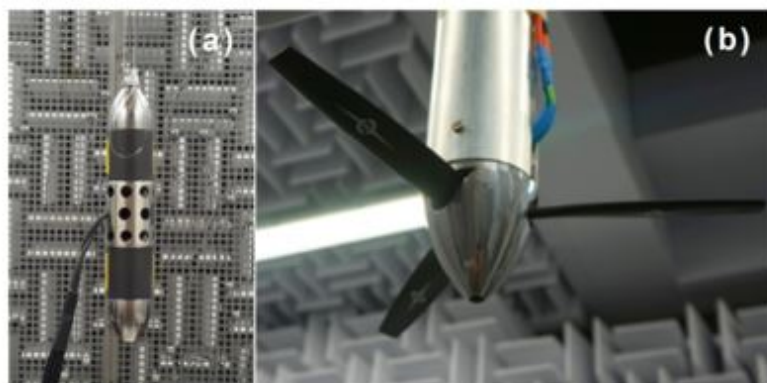


Рис. 3. Всенаправленный источник шума (а) и воздушный винт (б), используемые в эксперименте [17, 18]

Схема проведения данного эксперимента рассмотрена на рис. 4. Измерения уровней звукового давления выполнялись с применением 64-х микрофонной решетки 40РН ССР (TU Delft).



Рис. 4. Схема проведения эксперимента при исследовании экранирования шума воздушного винта крылом [17, 18]

Результаты оценки влияния экранирующей поверхности на суммарные уровни шума (OASPL), измеряемые в различных контрольных точках микрофонной решетки, представлены на рис. 5. Эффективность экранирования оценивается как разность суммарных уровней звукового давления, измеренных на микрофонах решетки с координатами (x, y) при работе винта или источника без экранирующей поверхности и при ее установке. Минус на цветовой шкале указывает на снижение шума при наличии экранирующей поверхности. Координата $y = 0$ соответствует плоскости вращения винта или центру источника шума и микрофонной решетки.

Можно видеть, что только при пониженном режиме работы винта ($n=4400$ об/мин) в статических условиях наблюдается снижение суммарного уровня шума винта на величину до 3,7 дБ (рис. 5а), при этом в некоторых точках наблюдается увеличение суммарного уровня шума до 0,9 дБ. При частотах вращения воздушного винта 7000 и

7600 об/мин не наблюдается снижения уровней звукового давления за счет экранирования шума винта крылом (рис. 5 б и в), в некоторых контрольных точках наблюдается увеличение суммарных уровней шума винта на величину до 3 дБ.

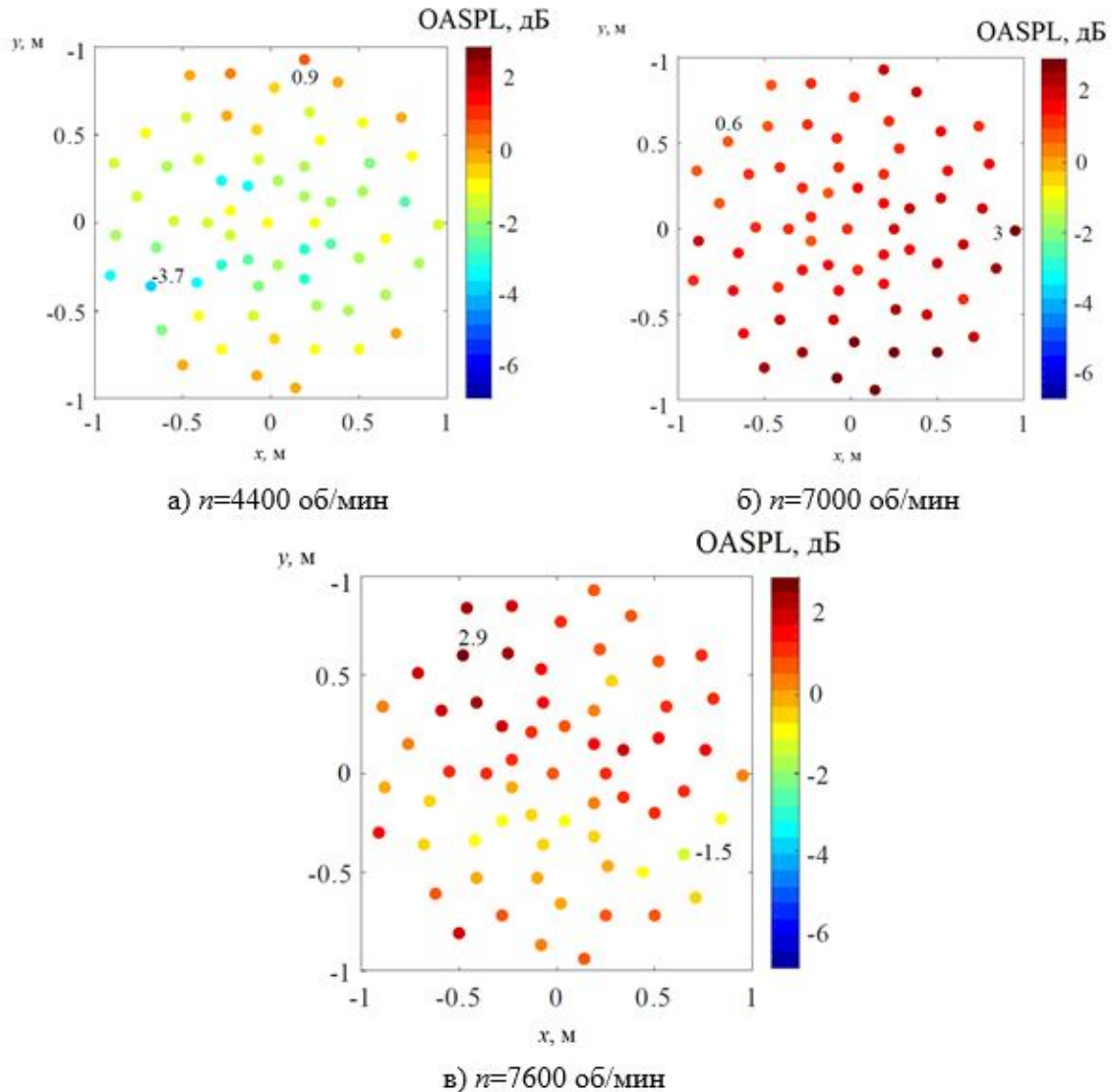


Рис. 5. Экспериментально полученные оценки влияния экранирования шума винта крылом на суммарные уровни звукового давления (OASPL) при работе винта в статических условиях (расстояние между крылом и винтом 0,9 м) [18]

При расположении вместо воздушного винта настроенного источника шума можно наблюдать снижение шума на величину до 6 дБ за счет экранирования (рис. 6).

Дополнительно в работе [18] было показано, что на эффективность экранирования шума винта, расположенного над крылом, существенным образом влияет форма передней кромки крыла.

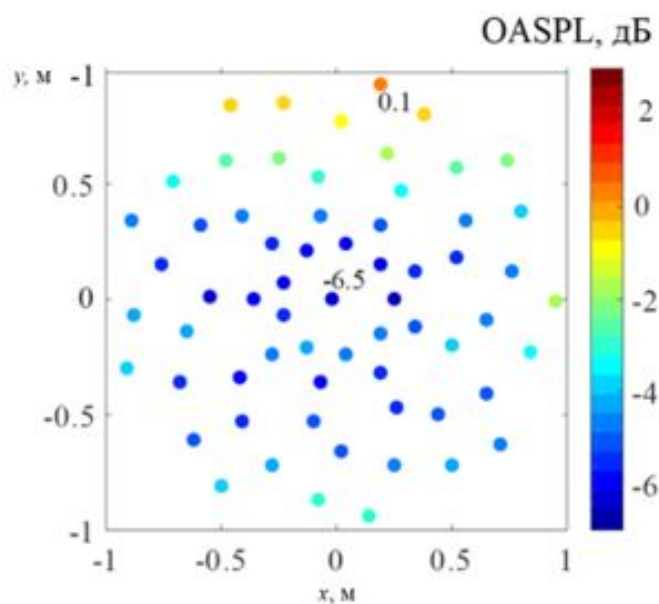


Рис. 6. Экспериментально полученные оценки эффективности экранирования шума генерируемого всенаправленным источником (OASPL) (расстояние между крылом и всенаправленным источником звука 0,9 м) [18]

2. О расчете экранирования шума винтомоторных СУ элементами планера

Среди расчетных методов, применяемых в настоящее время для учета эффекта экранирования при оценке шума на местности, отметим: геометрическая теория дифракции [19, 20], метод трассировки лучей [21] (ray tracing method), метод граничных элементов (boundary element method – BEM), метод эквивалентного источника (equivalent source method), методы Френеля и Кирхгофа и полуэмпирический метод барьерного экранирования (barrier shielding method – BSM) [22, 23].

При выполнении расчетных и экспериментальных исследований экранирования шума винтомоторных силовых установок элементами планера целесообразно получать следующие оценки:

- Зависимости суммарного уровня шума и отдельных тональных и широкополосных составляющих излучения воздушного винта и поршневого двигателя от угла наблюдения (диаграммы направленности) для различных положений экрана относительно элементов силовой установки для различных режимов полета;
- Оценка уровней пролетного шума ЛА в специализированном программном обеспечении [24–28] с учетом рассеяния шума силовой установки на элементах планера.

Заключение

Одним из перспективных методов снижения шума ЛВС и БВС на местности является экранирование шума винтомоторной СУ элементами планера. Параметрических зависимостей, описывающих влияние различных параметров, в первую очередь, относительных геометрических размеров, на снижение шума за счет эффекта экранирования в настоящее время в литературе не представлено.

На основе анализа доступных публикаций можно констатировать, что эффект экранирования существенным образом зависит от характеристик источника звука. При использовании реального винта, который является некомпактным источником,

аэродинамическая интерференция винта и крыла приводит к дополнительному излучению звука, что существенным образом снижает эффективность экранирования шума винта, демонстрируемую при использовании расчетов и экспериментов с использованием точечных источников звука.

В настоящее время вопросы экранирования акустического излучения винтовых движителей и поршневых двигателей являются малоизученными и требуют значительного количества специальных расчетных и экспериментальных исследований. При проведении экспериментов с заменой реального воздушного винта источником шума можно получить завышенные оценки снижения шума за счет экранирования.

Поэтому при проектировании винтовых ЛА самолетного типа, в первую очередь, следует учитывать хорошо изученные технологии снижения шума, как в источнике (воздушный винт, двигатель и планер), так и при интеграции силовой установки в компоновке ЛА [29].

Список литературы

1. Дмитриев В.Г., Самохин В.Ф., Мошков П.А. Акустика легких винтовых самолетов // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2022. № 3. С. 3-12.
2. Мошков П.А. Исследование слышимости и маскировки шума винтового беспилотного воздушного судна фоном окружающей среды // Noise Theory and Practice. 2021. Т. 7. № 2 (24). С. 28-38.
3. Environmental Protection. Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation, Montreal. Canada. ICAO. 2011. Vol. 1 Aircraft Noise. 227 p.
4. Moshkov P., Samokhin V., Yakovlev A. About the community noise problem of the light propeller aircraft, Akustika. 2019. Vol. 34. pp. 68–73.
5. Moshkov P., Samokhin V., Yakovlev A., Bolun C. The problems of selecting the power plant for light propeller-driven aircraft and unmanned aerial vehicle taking into account the requirements for community noise // Akustika. 2021. Vol. 39. pp. 164–169.
6. Moshkov P., Samokhin V., Yakovlev A. Engine-propeller power plant aircraft community noise reduction key methods // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12. No. S9. pp. 8601–8606.
7. Von Glahn U., Groesbeck D., Reshotko M. Geometry considerations for jet noise shielding with CTOL engine-over-the-wing concept // 7th Fluid and Plasma Dynamics Conference. 1974. AIAA Paper 74–568. DOI: 10.2514/6.1974-568
8. Von Glahn U., Groesbeck D., Wagner J. Wing shielding of highvelocity jet and shock-associated noise with cold and hot flow jets // 3rd Aeroacoustics Conference. 1976. AIAA Paper 76-547. DOI: 10.2514/6.1976-547
9. Maekawa Z. Noise Reduction by Screens // Journal of Applied Acoustics. 1968. Vol. 1. pp. 157–173.
10. Papamoschou D. Prediction of jet noise shielding // 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2010. AIAA Paper No. 2010–653. DOI: 10.2514/6.2010-653
11. Colas D.F., Spakovszky Z. A turbomachinery noise shielding framework based on the modified theory of physical optics // 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2013. AIAA Paper No. 2013–2136. DOI: 10.2514/6.2013-2136
12. Papamoschou D., Mayoral S. Experiments on shielding of jet noise by airframe surface // 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (30th AIAA Aeroacoustics Conference). AIAA Paper 2009–3326. 2009. DOI: 10.2514/6.2009-3326

13. Mayoral S., Papamoschou D. Effects of source redistribution on jet noise shielding // 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. AIAA. Paper 2010-652. 2010. DOI: 10.2514/6.2010-652
14. Ostrikov N.N., Denisov S.L. Airframe shielding of noncompact aviation noise sources: Theory and experiment // 21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2015. DOI: 10.2514/6.2015-2691
15. Merino-Martínez, R., Sijtsma, P., Carpio, A.R., Zamponi R., Luesutthiviboon S., Malgoezar A.M.N., Snellen M, Schram, C., Simons, D.G. Integration methods for distributed sound sources // International Journal of Aeroacoustics. 2019. Vol. 18. No. 4-5. pp. 444-469. DOI: 10.1177/1475472X19852945
16. Shim Y.M., Kingan M., Go S.T., Jung R., McKay R., Doolan C., Yauwenas., Jiang., Tan J., Croaker P., Verstraete D., MacNiel R., Skvortsov A. Noise reduction methods for a fixed wing UAV // QUIET DRONES International e-Symposium on UAV/UAS Noise, 2020, 8 p.
17. Vieira A., Malgoezar A., Snellen M., Simons D.G. Experimental study of shielding of propeller noise by a wing and comparison with model predictions // Euronoise-2018. 2018. pp. 237-244.
18. Vieira A., Snellen M., Malgoezar A.M.N., Merino-Martinez R., Simons D.G. Analysis of shielding of propeller noise using beamforming and predictions // The Journal of the Acoustical Society of America. 2019. Vol. 146. No. 2. pp. 1085-1098. DOI: 10.1121/1.5121398
19. Ostrikov N.N., Denisov S.L. Mean flow effect on shielding of noncompact aviation noise sources // 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2016. 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2016. DOI: 10.2514/6.2016-3014
20. Denisov, S.L., Ostrikov, N.N., Granich, V.Y. Problems of Aviation Power Plants Noise Reduction by Means of Shielding Effect // Acoustical Physics. 2021. Vol. 67. No. 3. pp. 293-297. DOI: 10.1134/S1063771021030027
21. Dewitte F.H.V. Aircraft Noise Shielding Assessment. The creation of a software tool to predict aircraft noise shielding. Master of Science Thesis. 2016. 93 p.
22. Vieira, A., Koch, M., Bertsch, L., Snellen, M., Simons, D.G. Simulation methodologies of engine noise shielding by wings within conceptual aircraft design // Journal of Aircraft. 2020. Vol. 57. No. 6. pp. 1202-1211.
23. Vieira, A., Snellen, M., Simons, D.G. Assessing the shielding of engine noise by the wings for current aircraft using model predictions and measurements // Journal of the Acoustical Society of America. 2018. Vol. 143. No. 1. pp. 388-398. DOI: 10.1121/1.5020798
24. Nöding, M., Bertsch, L. Application of noise certification regulations within conceptual aircraft design // Aerospace. 2021. Vol. 8. No. 8. P. 210 DOI: 10.3390/aerospace8080210
25. Bertsch L. et al. Comparative assessment of aircraft system noise simulation tools // Journal of Aircraft. 2021. Vol. 58. No. 4. pp. 867-884.
26. Bertsch, L., Snellen, M., Enghardt, L., Hillenherms, C. Aircraft noise generation and assessment: executive summary // CEAS Aeronautical Journal. 2019. Vol. 10. No. 1. pp. 3-9.
27. Rossignol, K.-S., Delfs, J.W., Moessner, M., Lummer, M., Yin, J.: Validation data for aircraft noise shielding prediction // CEAS Aeronaut. J. 2019. Vol. 10. pp. 179-196. DOI: 10.1007/s13272-019-00387-0
28. Дмитриев В.Г., Самохин В.Ф. Комплекс алгоритмов и программ для расчета шума самолетов на местности // Ученые записки ЦАГИ. 2014. Т. 45. № 2. С. 137-157.
29. Мошков П.А. Прогнозирование и снижение шума на местности легких винтовых самолетов: дис... канд. техн. наук. – М.: МАИ, 2015. – 143 с.

References

1. Dmitriev V.G., Samokhin V.F., Moshkov P.A. Acoustics of Light Propeller-Driven Aircraft // *Polyot*. – 2022. – № 3. – pp. 3–12.
2. Moshkov P.A. Study of the audibility and masking of the propeller-driven unmanned aerial vehicle noise by ambient noise // *Noise Theory and Practice*. – 2021. – Vol. 7. – № 2 (24). – pp. 28–38.
3. Environmental Protection. Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation, Montreal, Canada. ICAO. 2011. – Vol. 1 Aircraft Noise. – 227 p.
4. Moshkov P., Samokhin V., Yakovlev A. About the community noise problem of the light propeller aircraft, *Akustika*. –2019. – Vol. 34. – pp. 68–73.
5. Moshkov P., Samokhin V., Yakovlev A., Bolun C. The problems of selecting the power plant for light propeller-driven aircraft and unmanned aerial vehicle taking into account the requirements for community noise // *Akustika*. – 2021. – Vol. 39. – pp. 164–169.
6. Moshkov P., Samokhin V., Yakovlev A. Engine-propeller power plant aircraft community noise reduction key methods // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2017. – Vol. 12. – No. S9. – pp. 8601–8606.
7. Von Glahn U., Groesbeck D., Reshotko M. Geometry considerations for jet noise shielding with CTOL engine-over-the-wing concept // 7th Fluid and Plasma Dynamics Conference. – 1974. AIAA Paper 74–568. DOI: 10.2514/6.1974-568
8. Von Glahn U., Groesbeck D., Wagner J. Wing shielding of highvelocity jet and shock-associated noise with cold and hot flow jets // 3rd Aeroacoustics Conference. – 1976. AIAA Paper 76-547. DOI: 10.2514/6.1976-547
9. Maekawa Z. Noise Reduction by Screens // *Journal of Applied Acoustics*. – 1968. – Vol. 1. – pp. 157–173.
10. Papamoschou D. Prediction of jet noise shielding // 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. – 2010. AIAA Paper No. 2010–653. DOI: 10.2514/6.2010-653
11. Colas D.F., Spakovszky Z. A turbomachinery noise shielding framework based on the modified theory of physical optics // 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. –2013. AIAA Paper No. 2013–2136. DOI: 10.2514/6.2013-2136
12. Papamoschou D., Mayoral S. Experiments on shielding of jet noise by airframe surface // 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (30th AIAA Aeroacoustics Conference). AIAA Paper 2009–3326. – 2009. DOI: 10.2514/6.2009-3326
13. Mayoral S., Papamoschou D. Effects of source redistribution on jet noise shielding // 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. – 2010. AIAA. Paper 2010–652. DOI: 10.2514/6.2010-652
14. Ostrikov N.N., Denisov S.L. Airframe shielding of noncompact aviation noise sources: Theory and experiment // 21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. – 2015. DOI: 10.2514/6.2015-2691
15. Merino-Martínez, R., Sijtsma, P., Carpio, A.R., Zamponi R., Luesutthiviboon S., Malgoezar A.M.N., Snellen M, Schram, C., Simons, D.G. Integration methods for distributed sound sources // *International Journal of Aeroacoustics*. – 2019. – Vol. 18. – No. 4-5. – pp. 444–469. DOI: 10.1177/1475472X19852945
16. Shim Y.M., Kingan M., Go S.T., Jung R., McKay R., Doolan C., Yauwenas., Jiang., Tan J., Croaker P., Verstraete D., MacNiel R., Skvortsov A. Noise reduction methods for a fixed wing UAV // *QUIET DRONES International e-Symposium on UAV/UAS Noise, 2020*, 8 p.
17. Vieira A., Malgoezar A., Snellen M., Simons D.G. Experimental study of shielding of propeller noise by a wing and comparison with model predictions // *Euronoise-2018*. – 2018. – pp. 237–244.

18. Vieira A., Snellen M., Malgoezar A.M.N., Merino-Martinez R., Simons D.G. Analysis of shielding of propeller noise using beamforming and predictions // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2019. – Vol. 146. – No. 2. – pp. 1085–1098. DOI: 10.1121/1.5121398
19. Ostrikov N.N., Denisov S.L. Mean flow effect on shielding of noncompact aviation noise sources // 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2016. 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2016. <https://doi.org/10.2514/6.2016-3014>
20. Denisov, S.L., Ostrikov, N.N., Granich, V.Y. Problems of Aviation Power Plants Noise Reduction by Means of Shielding Effect // Acoustical Physics. – 2021. – Vol. 67. – No. 3. – pp. 293–297. DOI: 10.1134/S1063771021030027
21. Dewitte F.H.V. Aircraft Noise Shielding Assessment. The creation of a software tool to predict aircraft noise shielding. Master of Science Thesis. – 2016. – 93 p.
22. Vieira, A., Koch, M., Bertsch, L., Snellen, M., Simons, D.G. Simulation methodologies of engine noise shielding by wings within conceptual aircraft design // Journal of Aircraft. – 2020. – Vol. 57. – No. 6. – pp. 1202–1211.
23. Vieira, A., Snellen, M., Simons, D.G. Assessing the shielding of engine noise by the wings for current aircraft using model predictions and measurements // Journal of the Acoustical Society of America. – 2018. – Vol. 143. – No. 1. – pp. 388–398. DOI: 10.1121/1.5020798
24. Nöding, M., Bertsch, L. Application of noise certification regulations within conceptual aircraft design // Aerospace. – 2021. – Vol. 8. – No. 8. – pp. 210 DOI: 10.3390/aerospace8080210
25. Bertsch L. et al. Comparative assessment of aircraft system noise simulation tools // Journal of Aircraft. – 2021. – Vol. 58. – No. 4. – pp. 867–884.
26. Bertsch, L., Snellen, M., Enghardt, L., Hillenherms, C. Aircraft noise generation and assessment: executive summary // CEAS Aeronautical Journal. – 2019. – Vol. 10. – No. 1. – pp. 3–9.
27. Rossignol, K.-S., Delfs, J.W., Moessner, M., Lummer, M., Yin, J.: Validation data for aircraft noise shielding prediction. CEAS Aeronaut. J. – 2019. – Vol. 10. – pp. 179–196. DOI: 10.1007/s13272-019-00387-0
28. Dmitriev V.G., Samokhin V.F. Complex of algorithms and programs for calculation of aircraft noise // TsAGI Science Journal. – 2014. – Vol. 45. – № 3-4. – pp. 367–388.
29. Moshkov P.A. Prediction and reduction of community noise of light propeller-driven aircraft. PhD Thesis. Moscow. MAI. – 2015. – 143 p.

Сетевой Научный Журнал "Noise Theory and Practice"

ООО "ИАК"

при БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова



Главная цель

Главная цель сетевого научного Журнала "Noise Theory and Practice" – способствовать развитию виброакустики (наука о шуме и вибрации).

Основные задачи

Основными задачами Журнала являются:

- отражение последних достижений в теории и практике борьбы с шумом и вибрацией;
- отражение результатов научно-исследовательских работ по изучению процессов шумообразования, распространения звука и вибрации;
- отражение результатов разработки средств шумо- и виброзащиты, а также результатов иных работ, проводимых в области виброакустики, и выполняемых научными сотрудниками ВУЗов и иных организаций;
- предоставление сведений о планируемых конференциях, семинарах, проводимых в России и других странах;
- предоставление архивных материалов трудов научных конференций, посвященных виброакустике.

Научное цитирование Журнала

Журнал является общедоступным для чтения неограниченным числом пользователей.

Материалы Журнала индексируют в наукометрических базах Российского Индекса Научного Цитирования (РИНЦ), Google Scholar. Журнал включен в научные электронные библиотеки "КиберЛенинка", Соционет, CiteFactor, ROAD.

С 21 ноября 2019 г. Журнал "Noise Theory and Practice" включен в ПЕРЕЧЕНЬ рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (п. 42).

ООО"ИАК"
г. Санкт-Петербург
2023