

ISSN 2412-8627

Vol. 12 No. 2

# Noise

## Theory and Practice

Scientific Journal



II  
2026

Acoustic Design Institute

# Редакционная коллегия

## Главный редактор

Иванов Николай Игоревич



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

## Заместитель главного редактора

Тюрина Наталья Васильевна



Доктор технических наук, профессор кафедры "Техносферная безопасность и вычислительная механика" Балтийского государственного технического университета "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова  
(г. Санкт-Петербург, РФ)

## Члены редакционной коллегии

Шашурин Александр Евгеньевич



Доктор технических наук, профессор, ректор 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, РФ)

Буторина Марина Вадимовна



Доктор технических наук, профессор кафедры "Техносферная безопасность и вычислительная механика" Балтийского государственного технического университета "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова  
(г. Санкт-Петербург, 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)

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)

Пименов Игорь Константинович



Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой "Гидрофизических средств поиска" Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
(г. Санкт-Петербург, 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)

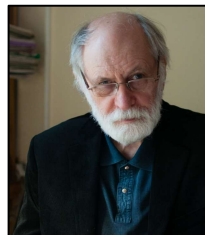
**Рассошенко Юлия Сергеевна**



Кандидат технических наук, специалист в области шумообразования высокоскоростных поездов, снижения шума автомобильных и железных дорог

(г. Санкт-Петербург, РФ)

**Емельянов Владислав Николаевич**



Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры "Плазмогазодинамика и теплотехника" Балтийского государственного технического университета "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова

(г. Санкт-Петербург, РФ)

**Элькин Юрий Иосифович**



Доктор технических наук, профессор кафедры "Инженерно-экологические инновации и комплексная безопасность" Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)

(г. Москва, РФ)

**Вельбель Александр Мотявич**



Начальник акустического стенда научно-исследовательской лаборатории ООО "Арктос"

(г. Санкт-Петербург, РФ)

**Аббакумов Константин Евгеньевич**



Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроакустика и ультразвуковая техника» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина)

(г. Санкт-Петербург, РФ)

**Кобилов Эргаш Эгамбердиевич**



Доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедры "Экология и безопасность жизнедеятельности" Самаркандского государственного университета им.Ш.Рашидова

(г. Самарканд, Узбекистан)

**Элеонора Карлетти**



Директор Института сельскохозяйственных и землеройнотранспортных машин (IMAMOTER-CNR), руководитель исследовательской группы IMAMOTER

(г. Феррара, Италия)

**Серджио Луцци**



Профессор и лектор в Университете Флоренции, руководитель курса "Акустика и контроль транспортного шума" в UNISER

(г. Флоренция, Италия)

**Дэвид Копли**



Сертифицированный член совета Института технологий по контролю за шумом, руководитель группы инженеров по борьбе с шумом в техническом центре компании Caterpillar

(г. Пеория, США)

## Editor-in-chief

Nickolay Ivanov



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

## Deputy Editor-in-chief

Natalya Tyurina



Doctor of Engineering Science, Professor of the Department of Environmental Engineering and Computational Mechanics of the Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov  
(St. Petersburg, Russia)

## Members of the Editorial Board

Aleksander Shashurin



Doctor of Engineering Science, Professor, Rector 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, Russia)

Marina Butorina



Doctor of Engineering Science, Professor of the Department of Environmental Engineering and Computational Mechanics of the Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov  
(St. Petersburg, 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  
(Samara, Russia)

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)

Igor Pimenov



Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of the Department of Hydrophysical Search Tools, St. Petersburg State Marine Technical University  
(St. Petersburg, 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)

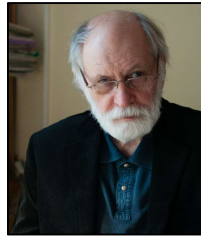
## Iuliia Rassoshenko



Ph.D. of Engineering Science, specialist in the field of high-speed train noise generation and transport noise reduction

(St. Petersburg, Russia)

## Vladislav Emelyanov



Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of the Department of Plasma Gas Dynamics and Thermal Engineering of the 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 Engineering and Environmental Innovations and Integrated Safety, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)

(Moscow, Russia)

## Alexander Velbel



Head of the Acoustic stand of the Research laboratory of Arktos LLC

(St. Petersburg, Russia)

## Abbakumov Konstantin



Doctor of Engineering Science, Professor of the Department of Electroacoustic and Ultrasound Techniques of the Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI'

(St. Petersburg, Russia)

## Ergash E. Kobilov



Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department of Ecology and Life Safety of the Samarkand State University named after Sh.Rashidova

(Samarkand, Uzbekistan)

## 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)

## 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)

Научный журнал  
Том 12 №2

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 "Техносферная безопасность и вычислительная механика" Балтийского государственного технического университета "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова, основатель теории транспортной акустики в России - Иванов Николай Игоревич

"Noise Theory and Practice" посвящен фундаментальным проблемам в области виброакустики 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

### Почтовый адрес редакции

190020, г. Санкт-Петербург, наб. Обводного канала, д.138, к.7, литера А, пом. 11-Н, офис 2-2А  
Телефон: +7(812) 495-77-97  
e-mail: secretary@noisetp.com  
www.noisetp.com

### Ответственный секретарь

Лубянченко Анна Александровна

Зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

**Свидетельство**

ЭЛ № ФС 77-74057

## Содержание

- |  |     |
|--|-----|
| <b>Красненко Н.П., Рыбаков И.А.</b>  | РУС |
| Методы шумоподавления в акустических доплеровских содарах для зондирования атмосферы<br>стр. 9-31  |     |
| <b>Мошков П.А., Стрелец Д.Ю., Остроумов М.Н., Мязина Н.В., Софронов С.М.</b>   | РУС |
| Предварительные результаты валидации сферической микрофонной решетки для локализации источников шума в салонах летательных аппаратов<br>стр. 32-47 |     |
| <b>Черкасов В.Д., Тюрязкин М.А.</b>  | РУС |
| Слоистые вибропоглощающие материалы<br>стр. 48-53  |     |
| <b>Буторина М.В., Донцов С.А.</b>  | РУС |
| Обзор методов оценки и снижения шума строительных площадок<br>стр. 54-67   |     |
| <b>Васильев М.Д., Шишкина П.В.</b>   | РУС |
| Сопоставительный анализ нормативных требований СП51.13330.2011 «Защита от шума» и международного стандарта WELL v.2<br>стр. 68-81                  |     |
| <b>Кирпичников В.Ю., Кудаев А.В., Олейников А.Ю.</b>   | РУС |
| Вибродемпфирование подкрепленной пластины<br>стр. 82-89  |     |

Научный журнал  
Том 12 №2

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  
"Техносферная безопасность и  
вычислительная механика"  
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

Лубянченко Анна Александровна

Зарегистрировано в Федеральной  
службе по надзору в сфере связи,  
информационных технологий  
и массовых коммуникаций

### Свидетельство

ЭЛ № ФС 77-74057

## Содержание

### Стуженко Н.И.

РУС

Экспериментальные исследования виброакустических  
характеристик гаммы расточных станков  
стр. 90-98

### Себурев А.В.

РУС

Сравнительный анализ отечественных и зарубежных  
методик учёта метеорологических факторов при  
прогнозировании акустического загрязнения  
стр. 99-108

### Вареникова А.Ю., Чернов Н.Н., Кравчук Д.А.

РУС

Применение нелинейных акустических эффектов для  
визуализации внутренних структур биологических тканей  
стр. 109-121

### Фиев К.П., Тюрина Н.В., Вовченко У.А.

РУС

Оценка воздействия производственного шума на основе  
треть-октавного анализа вкладов источников шума  
стр. 122-129

## Contents

### **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 Environmental Engineering and Computational Mechanics 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.

### **Noise Theory and Practice Editorial office**

138, Bldg.7A, Obvodny Canal Emb.,  
Room 11-H, Office 2-2A  
St. Petersburg, 190020, Russia  
Phone: +7(812) 495-77-97  
e-mail: secretary@noisetsp.com  
www.noisetsp.com

### **Executive Secretary**

Anna Lubyanchenko

Journal is registered in Federal service for supervision of communications, information technology, and mass media

**The certificate of registration**

ЭЛ № ФС 77-74057

**Krasnenko N.P., Rybakov I.A.** RUS

Noise reduction methods in acoustic doppler SODARs for atmospheric sensing  
pp. 9-31

**Moshkov P.A., Strelets D.Yu., Ostroumov M.N., Myazina N.V., Sofronov S.M.** RUS

Preliminary validation results of aspherical microphone array for noise source localization in aircraft cabins  
pp. 32-47

**Cherkasov V.D., Tyuryakin M.A.** RUS

Layered vibration-absorbing materials  
pp. 48-53

**Butorina M.V., Dontsov S.A.** RUS

Review of methods for assessment and reduction of construction sites' noise  
pp. 54-67

**Vasiliev M.D., Shishkina P.V.** RUS

Comparative analysis of the regulatory requirements of SP 51.13330.2011 "Noise Protection" and the WELL v.2 Building Standard  
pp. 68-81

**Kirpichnikov V. Yu., Kudaev A.V., Oleinikov A. Yu.** RUS

Vibration damping of a reinforced plate  
pp. 82-89

## Contents

### **'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 Environmental Engineering and Computational Mechanics 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](http://www.noisetp.com)

e-mail: [secretary@noisetp.com](mailto:secretary@noisetp.com)

### **Executive Secretary**

Anna Lubyanchenko

Journal is registered in Federal service for supervision of communications, information technology, and mass media

### **The certificate of registration**

ЭЛ № ФС 77-74057

### **Stuzhenko N.I.**

RUS

Experimental studies of vibroacoustic characteristics of a range of boring machines  
pp. 90-98

### **Seburev A.V.**

RUS

Comparative analysis of domestic and foreign methods for considering meteorological factors in predicting acoustic pollution  
pp. 99-108

### **Varenikova A.Yu., Chernov N.N., Kravchuk D.A.**

RUS

Application of nonlinear acoustic effects for visualization of internal structures of biological tissues  
pp. 109-121

### **Fiev K.P., Tyurina N.V., Vovchenko U.A.**

RUS

Industrial noise impact assessment based on one-third-octave band analysis of noise sources contributions  
pp. 122-129

УДК: 534.6.08, 551.508.5

OECD: 1.03.AA

DOI: 10.56408/2412-8627.2026.12.2.001

## Методы шумоподавления в акустических доплеровских содарах для зондирования атмосферы

Красненко Н.П.<sup>1\*</sup>, Рыбаков И.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией геофизических исследований и технологий, главный научный сотрудник

<sup>2</sup>Аспирант, младший научный сотрудник лаборатории геофизических исследований и технологий

<sup>1,2</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

### Аннотация

Представлен обзор современных методов шумоподавления, применяемых в акустических доплеровских содарах, используемых для дистанционного зондирования атмосферы. Рассмотрены основные источники помех при измерениях и методы компенсации их влияния. Проведен анализ алгоритмов цифровой обработки сигналов, применяемых в коммерческих содарах различных производителей, таких как Metek, Remtech, Scintec, Atmospheric Research & Technology, Vaisala. Особое внимание уделено спектральным методам обработки доплеровского сигнала, многочастотным режимам измерений, пространственной фильтрации с использованием антенных решеток, временному и частотному усреднению, а также адаптивным процедурам контроля качества данных. Проведено сравнительное обобщение применяемых подходов, выявлены тенденции перехода от классических методов обработки к более сложным методам. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых методов шумоподавления и оптимизации обработки данных в акустических атмосферных системах различного назначения.

**Ключевые слова:** содар, шумоподавление, цифровая обработка сигналов, доплеровский спектр, отношение сигнал/шум, антенные решетки

## *Noise Reduction Methods in Acoustic Doppler SODARs for Atmospheric Sensing*

*Krasnenko N.P.<sup>1\*</sup>, Rybakov I.A.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*D.Sc., Professor, Head of the Laboratory of Geophysical Researches and Technologies, Chief Researcher*

<sup>2</sup>*Ph.D., Junior Researcher of the Laboratory of Geophysical Researches and Technologies*

<sup>1,2</sup>*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IMCES SB RAS), Tomsk, Russia*

### **Abstract**

*An overview is presented of modern noise-suppression methods employed in acoustic Doppler sodars used for the remote sensing of the atmosphere. The primary sources of interference encountered during measurements*

---

\*E-mail: krasnenko@imces.ru (Красненко Н.П.)

are examined, along with methods for compensating for their effects. An analysis is provided of the digital signal processing algorithms implemented in commercial sodars from various manufacturers, including Metek, Remtech, Scintec, Atmospheric Research & Technology, and Vaisala. Particular attention is devoted to spectral methods for Doppler signal processing, multi-frequency measurement modes, spatial filtering using antenna arrays, temporal and frequency averaging, and adaptive data quality control procedures. A comparative summary of the applied approaches is conducted, revealing trends toward a transition from classical processing techniques to more sophisticated methods. The results obtained may be utilized in the development of new noise-reduction techniques and the optimization of data processing in acoustic atmospheric sensing systems for various applications.

**Keywords:** SODAR, noise reduction, digital signal processing, Doppler spectrum, signal-to-noise ratio, antenna arrays

## Введение

Акустическое зондирование атмосферы с использованием доплеровских локаторов (содаров) – занимает особое место среди дистанционных методов исследования атмосферы [1], [2]. Содары [1]-[3] позволяют получать сведения о скорости и направлении ветра, характеристиках турбулентности и термической стратификации в атмосферном пограничном слое (АПС), что делает их важным инструментом для экологического мониторинга, оценки ветроэнергетического потенциала, обеспечения безопасности авиационных полетов и изучения физических процессов в АПС.

Вместе с тем практическое применение содаров существенно осложняется низким отношением сигнал/шум (ОСШ), характерным для акустического зондирования атмосферы. Это связано с тем, что принимаемые сигналы, рассеянные естественными турбулентными неоднородностями, обладают малой интенсивностью и на фоне шумов и помех антропогенного и природного происхождения нередко оказываются близкими к порогу обнаружения. Промышленные объекты, транспорт, ветер и иные источники формируют сложную помеховую обстановку, в которой полезный сигнал может быть частично или полностью замаскирован [1], [2], [4]. В этих условиях достоверность содарных измерений определяется как эффективностью алгоритмов шумоподавления и цифровой обработки сигналов, так и характеристиками аппаратной реализации системы. При этом, несмотря на высокую практическую значимость данной задачи, систематизированное сопоставление инженерных решений, используемых в коммерческих содарных системах ведущих мировых производителей, до настоящего времени остается недостаточно представленным. В настоящей работе выполнен обзор и сравнительный анализ современных методов шумоподавления и обработки сигналов, применяемых в содарах компаний Metek, Remtech, Scintec, Atmospheric Research & Technology и Vaisala. Особое внимание уделено конструктивным решениям, спектральному анализу доплеровских сдвигов, многочастотным режимам работы, пространственной фильтрации с использованием антенных решеток, а также современным процедурам контроля качества данных.

Существующее разнообразие инженерных и алгоритмических решений, направленных на повышение помехоустойчивости содаров, целесообразно классифицировать по уровню воздействия на отношение сигнал/шум. В рамках настоящего обзора сравнительный анализ проводится по трем основным категориям: аппаратные (конструктивные) методы, обеспечивающие минимизацию боковых лепестков диаграммы направленности антенны (фазированные антенные решетки, звукозащитные экраны); алгоритмические методы цифровой обработки, направленные

на выделение полезного доплеровского сигнала из шума (спектральный анализ, многочастотное зондирование, фильтрация) и процедуры контроля качества и валидации данных, отбраковывающие недостоверные измерения на основе пороговых критериев и статистического анализа. Такой подход позволяет системно сопоставить эффективность применяемых технических решений различных производителей.

## 1 Шумоподавление в содарах компании Metek

Германская компания МЕТЕК GmbH [5] является одним из ведущих производителей акустических локаторов для исследования и мониторинга характеристик атмосферы [6]-[12]. Среди наиболее распространенных приборов компании следует отметить доплеровские содары серии PCS.2000 Doppler Sodar, которые представлены в различных модификациях и активно используются в международных измерительных кампаниях и долговременных проектах. Один цикл измерения профиля скорости ветра включает в себя последовательное импульсное зондирование в пяти направлениях (вертикальном и четырех наклонных в противоположных ортогональных направлениях).

По данным производителя, максимальная дальность (высота) зондирования содаров серии PCS может достигать порядка 1–1,5 км в благоприятных метеорологических и шумовых условиях. В то же время при работе в других условиях реальная высота зондирования может существенно уменьшаться [13].

Для повышения качества измерений в содарах Metek реализован ряд инженерных решений, направленных на повышение ОСШ и устойчивости работы прибора. Одним из таких решений является использование многочастотного режима зондирования [13]. В этом режиме в пределах одного цикла измерений содар последовательно осуществляет зондирование на нескольких несущих частотах в каждом из направлений. Как правило, рабочие частоты находятся в интервале 1,4–2,6 кГц, а конкретные наборы частот зависят от модели и конфигурации содара (например, используются комбинации 1386, 1612, 1862, 2087 Гц для модификации PCS.2000-64MF). Применение нескольких частот в одном цикле зондирования обусловлено особенностями распространения акустических волн в атмосфере: низкочастотные волны испытывают меньшее затухание и лучше подходят для зондирования верхних слоев атмосферы, тогда как волны более высоких частот сильнее рассеиваются на мелкомасштабных неоднородностях атмосферы и обеспечивают более высокий уровень обратно рассеянного сигнала на малых высотах. Комбинирование частот в одном измерительном цикле расширяет динамический диапазон при профилировании атмосферы и повышает стабильность измерений на разных высотах. Кроме того, разнесение рабочих частот уменьшает неоднозначности в спектральном анализе и снижает влияние шумов.

Особенностью содаров Metek, как и других зарубежных производителей в последние годы, является использование антенных массивов, состоящих из большого числа акустических излучателей и приемников (рупорных громкоговорителей), объединенных в фазированную антенную решетку. Формирование пяти последовательных направлений зондирования атмосферы осуществляется путем задания определенных фазовых сдвигов между элементами массива. Такой принцип позволяет формировать вертикальный и наклонные лучи без механического сканирования антенны.

В частности, в содаре PCS.2000-64 используется массив из 64 элементов (8 x 8), представленный на рисунке 1. Сodar обеспечивает вертикальное разрешение 5–50 м. Диапазон измерения горизонтальной скорости ветра составляет от 0 до 50 м/с, при этом погрешность ее определения находится в пределах 0,1–0,3 м/с или не превышает 5% от измеряемого значения. Вертикальная составляющая скорости ветра измеряется в диапазоне  $\pm 10$  м/с с погрешностью 0,03–0,1 м/с либо до 5%. Погрешность определения

направления ветра составляет  $1-3^\circ$  при скорости ветра свыше  $5 \text{ м/с}$  и возрастает до  $3-5^\circ$  при скоростях менее  $5 \text{ м/с}$  [5].

Значительную роль в повышении качества измерений играет конструктивное подавление внешних шумов и переотражений от местных предметов. Конструкция антенн содаров включает специальные защитные экраны (акустические бленды) вокруг них с жесткой внешней оболочкой и мягкой, поглощающей звук, внутри. У содаров фирмы Metek, в отличие от других, даже применяется двойная бленда (внешняя и внутренняя) (рисунок 1). Также интересной особенностью является использование треугольных клиньев на верхней кромке корпуса внешней бленды. Общая высота внешней бленды составляет  $2,15 \text{ м}$ . Поперечное сечение бленды имеет форму квадрата со стороной  $1,65 \text{ м}$  и над верхней кромкой по всему периметру имеются по двенадцать клиновидных элементами вдоль каждой из его сторон. Высота клиньев составляет  $35 \text{ см}$ , ширина у основания –  $15 \text{ см}$ . К сожалению, ни в документации, ни в публикациях компании не приводятся формулы для расчета и результаты исследований по шумоподавлению в данной конструкции.



Рисунок 1 – Антенная система содара PCS.2000-64 с антенной решеткой внутри двух звукозащитных бленд

Однако в работе [2] рассмотрено влияние клиньев бленды работу акустического локатора. Край бленды можно рассматривать как совокупность вторичных точечных источников, формирующих сферические волновые фронты, как показано на рисунке 2. В соответствии с принципом взаимности антенн данный эффект может быть рассмотрен в равной степени как для режима приема, так и для режима излучения сигнала. Суперпозиция излучений вторичных источников приводит к образованию интерференционной картины и увеличению рассеяния энергии в боковых направлениях, что проявляется в виде дополнительных боковых лепестков антенны. Поэтому для снижения влияния дифракции на кромке экрана и применяют специальные конструктивные элементы – акустические клинья. Утверждается, что использование клиньев позволяет уменьшить когерентность излучения вдоль края и в итоге снизить интенсивность дифрагированной волны в среднем на  $6-7 \text{ дБ}$ . Хотя это должно зависеть как от рабочей частоты содара, так и геометрии экрана. Наверное, независимый от этого и лучший результат даст случайный характер расположения и размеров клиньев. В этом

случае применение клиньев приведет к тому, что излучение от различных участков кромки станет некогерентным. В результате нарушится согласованность фазового сложения дифрагированных волн, что приведет к уменьшению суммарной интенсивности дифрагированного звукового поля и повышению эффективности шумозащитного экрана [14].

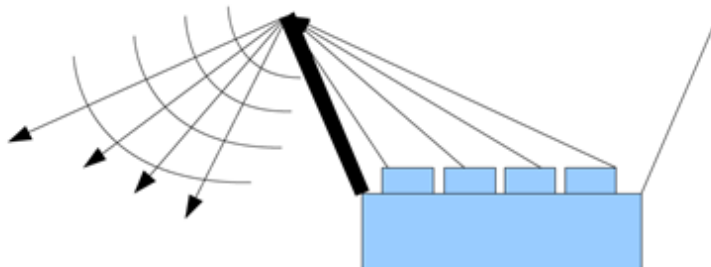
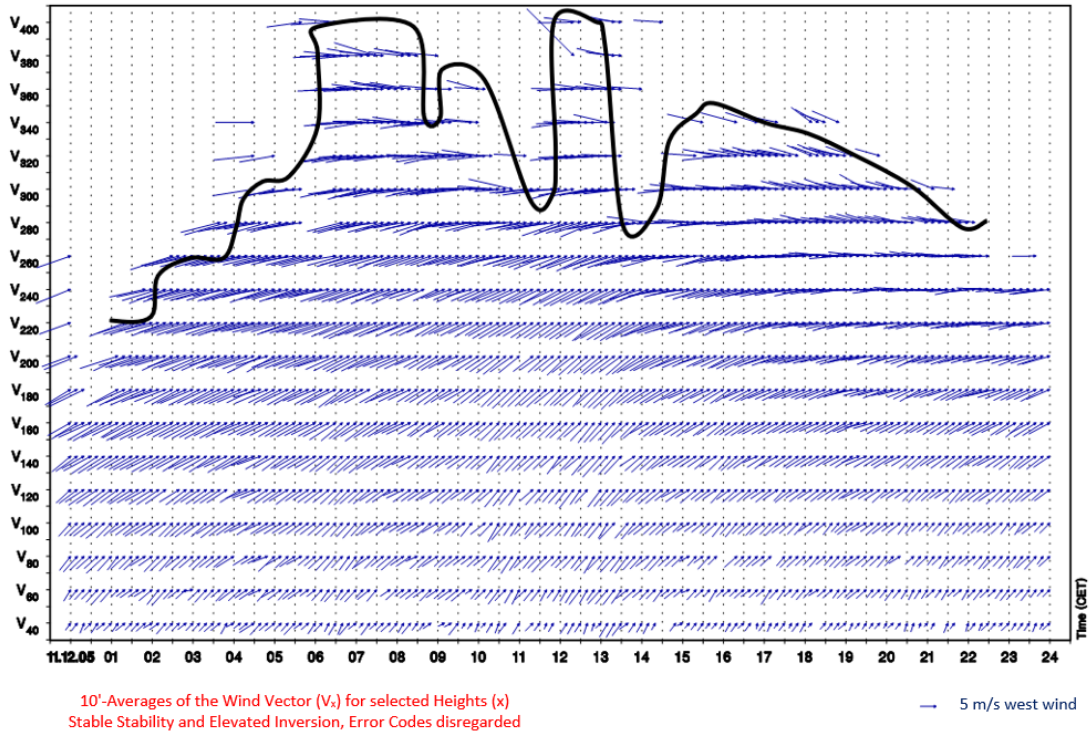


Рисунок 2 – Дифракционная картина на краю перегородки бленды, излучающей антенной решетки

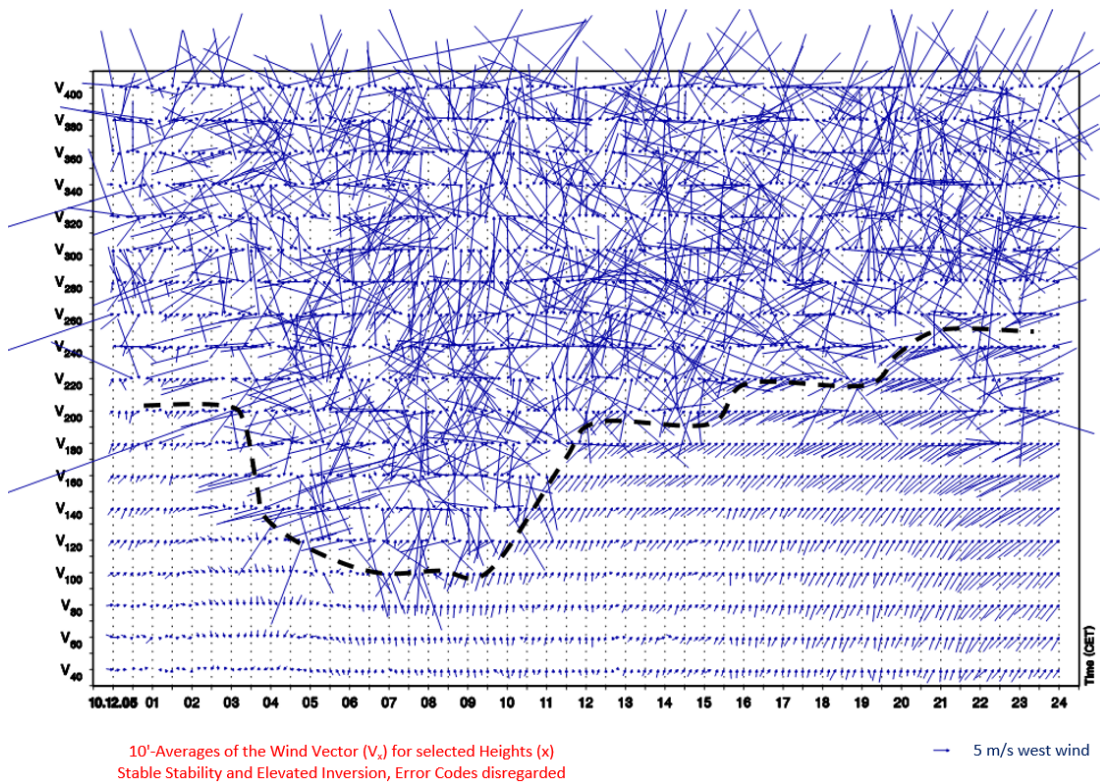
Основным методом обработки данных в доплеровских содарах, применяемых в содарах Metek, является спектральный анализ принимаемого рассеянного акустического сигнала. Поскольку зондирование является импульсным, то после приема сигнала выполняется его дискретизация и разделение по высотным интервалам (стробирование по времени прихода рассеянного акустического сигнала). Для каждого высотного интервала вычисляется спектр мощности сигнала с использованием быстрого преобразования Фурье [15]. По положению максимума спектра определяется доплеровская частота и радиальная компонента скорости ветра (скорости движения воздушных масс) в направлении луча зондирования. На основе измеренных радиальных скоростей для нескольких лучей в одном цикле зондирования рассчитываются ортогональные компоненты вертикального профиля вектора скорости ветра. По величине мощности сигнала определяют сечение рассеяния, интенсивность турбулентности и в конечном итоге термическую структуру АПС.

Поскольку принимаемый сигнал, как и последующие определяемые параметры атмосферы, является случайным, то важным этапом обработки является оценка отношения сигнал/шум - ОСШ. Обычно вычисляется отношение мощности спектрального пика к среднему уровню фонового шума в спектре. Если полученное значение ОСШ оказывается ниже заданного порога, соответствующая высотная ячейка признается недостоверной и исключается из дальнейшего анализа [13]. Рисунок 3а демонстрирует результат отбраковки шумовых данных. Процедура позволяет избежать появления ошибочных значений ветровых параметров в условиях низкого отношения сигнал/шум. Также имеется возможность просмотра изначальных данных, без применения алгоритма отбраковки некачественных данных (рисунок 3б).

Для повышения устойчивости измерений применяется временное накопление и усреднение данных. В содарах усреднение реализуется на нескольких уровнях обработки. Во-первых, выполняется накопление спектров, полученных от последовательных посылок зондирующих импульсов в одном направлении, что позволяет повысить устойчивость оценки доплеровского сдвига [15]. Во-вторых, при формировании итоговых профилей компонентов скорости ветра применяется временное усреднение. Оно варьируется от 10 до 30 минут. Данная процедура обеспечивает повышение устойчивости оценок и снижение влияния случайных флуктуаций измеряемых параметров.



a)



б)

Рисунок 3 – Высотно-временная (до 400 м) суточная запись распределения горизонтальной скорости ветра с отбраковкой «зашумленных» данных. Линией показана реальная граница высоты измерений. Усреднение 10 минут. Ориентация стрелок соответствует направлению ветра, масштаб стрелок - величине скорости ветра

Несмотря на высокую эффективность, метод усреднения имеет ограничения. Увеличение числа накоплений приводит к снижению временного разрешения измерений и может вызывать сглаживание реальных вариаций атмосферных параметров. Кроме того, при резком изменении ветрового поля нарушается когерентность сигнала между реализациями, что снижает эффективность усреднения.

Дополнительно в настройках аппаратуры и программного обеспечения содаров Metek реализованы средства подавления так называемых фиксированных эхо-сигналов, возникающих вследствие отражений от окружающих антенну объектов – от «местников». Они характеризуются нулевым доплеровским сдвигом частоты и в записях термической структуры АПС (эхোগраммы сигнала) выделяются горизонтальными полосами, искажая картину структуры. В программном обеспечении систем используется алгоритм, автоматически выявляющий спектральные максимумы, находящиеся в области нулевого доплеровского смещения и устойчиво проявляющиеся в серии последовательных измерений. После их обнаружения выполняется оценка вклада нулевой доплеровской составляющей сигнала в спектр. Полученная оценка затем используется для коррекции текущего спектра мощности путем вычитания из него соответствующей компоненты.

## 2 Шумоподавление в содарах компании Remtech

Французская компания Remtech [16], как она себя позиционирует, один из ведущих производителей доплеровских акустических локаторов для дистанционного зондирования атмосферы. По данным компании, на 23 августа 2019 года было установлено более 600 содаров в 55 странах.

В содарах Remtech в качестве антенн используются фазированные антенные решетки. В типичной конфигурации формируются пять лучей: один вертикальный и четыре наклонных. Наклонные лучи отклонены от вертикали примерно на 20-25° и разнесены по азимуту на 90°. По доплеровскому сдвигу сигналов, принимаемых по наклонным лучам, определяются радиальные компоненты скорости ветра, а вертикальный луч используется для измерения вертикальной скорости воздушных перемещений.

Максимальные высоты зондирования варьируются в широком диапазоне: от порядка 400 м для наиболее компактных моделей и до 3000 м для наиболее мощных и габаритных систем. Содары Remtech используют частоты зондирования в диапазоне 1-5,5 кГц, что обеспечивает оптимальный компромисс между дальностью распространения акустических волн и размером антенной системы [17].

К примеру наиболее компактная модель PA-XS использует зондирующую частоту 5,5 кГц (рисунок 4). Антенна данной системы имеет размеры порядка 24 × 24 × 4 см и массу 1,85 кг, а вес всей конструкции – 7,3 кг, что делает ее компактным и мобильным устройством [16].

Инженерные решения, разработанные компанией Remtech для обработки доплеровских сигналов, нашли применение в многочисленных метеорологических исследованиях атмосферного пограничного слоя [18]-[21].

Одним из важных направлений развития содаров Remtech стало внедрение цифровых методов обработки сигналов. Уже на ранних этапах разработки систем компания начала использовать программную реализацию спектрального анализа на основе быстрого преобразования Фурье [17]. Применение цифровой обработки позволило отказаться от специализированных аппаратных спектральных анализаторов и обеспечить более гибкую настройку алгоритмов обработки сигналов.



Рисунок 4 – Внешний вид содара Remtech PA-XS

В техническом описании PA-XS указано, что вычисления осуществляются на ARM Quad Core процессоре при подключенном 16-битном аналого-цифровом преобразователе. Аналогично, в описании PA-5 также фигурирует ARM-четырёхъядерный CPU с Linux и 16-битный АЦП. Для систем радиоакустического зондирования атмосферы обработка осуществляется с помощью быстрого преобразования Фурье сигнала после понижения радиочастоты в приемном устройстве [16].

Компания Remtech применяет в своих доплеровских содарах технологию сложнокодированного зондирующего сигнала (multi-frequency coding), описанную в патенте [22]. Данный метод является одним из ключевых элементов обработки сигналов в содарах и предназначен для повышения достоверности измерений профиля ветра в условиях низкого ОСШ. Его принцип основан на использовании зондирующего импульса, содержащего набор дискретных несущих частот, излучаемых в составе одного пакета, как правило, из 7-9 частот.

На этапе цифровой обработки для каждой зондирующей частоты отдельно выполняется спектральный анализ принятого сигнала. По положению максимумов спектров определяются доплеровские сдвиги частоты, которые затем преобразуются в оценки радиальной скорости ветра. В результате для каждой пространственной ячейки атмосферы формируется несколько независимых оценок скорости, соответствующих различным несущим частотам зондирующего сигнала. Ключевым этапом метода является процедура согласования полученных оценок: алгоритм сопоставляет значения скорости, определенные по разным частотам, и проверяет их взаимную согласованность. Если оценка скорости появляется только на одной частоте или существенно отличается от результатов, полученных на остальных частотах, она интерпретируется как результат шумового артефакта, акустической помехи или случайного спектрального максимума и исключается из дальнейшей обработки. В итоговые данные включаются только те значения скорости, которые подтверждаются несколькими частотными каналами. Таким

образом реализуется принцип многократной валидации измерения.

Согласно описанию патента, применение нескольких несущих частот позволяет получать достоверные оценки скорости ветра при значительно более низком ОСШ по сравнению с одночастотными методами зондирования. В частности, указывается, что при использовании пяти частот достигается выигрыш в ОСШ порядка 15–20 дБ [22]. Этот эффект объясняется тем, что вероятность случайного появления одинакового ложного доплеровского максимума одновременно на нескольких независимых частотах крайне мала.

В содарах Remtech данный принцип реализован программно. Приемник непрерывно формирует спектры отраженного сигнала для всех используемых частотных каналов, после чего алгоритмы обработки сравнивают полученные доплеровские оценки между собой и применяют набор пороговых критериев. В системе используется большое количество порогов ОСШ, распределенных по зондирующим лучам, высотным интервалам и частотным каналам [17]. Эти пороги позволяют автоматически отсекалть слабые или нестабильные спектральные пики. Если количество подтверждений для конкретной оценки скорости оказывается недостаточным, соответствующее значение автоматически помечается как недостоверное и не выводится в результирующий профиль ветра.

Такая технология применяется во всей современной линейке содаров Remtech, включая модели РА-XS, РА-0, РА-2 и РА-5. В этих системах она рассматривается как один из основных элементов повышения качества данных. На практике использование нескольких несущих частот позволяет не только повысить устойчивость измерений к помехам, но и увеличить энергетический потенциал зондирующего импульса без ухудшения пространственного разрешения.

Одним из применяемых методов подавления шума является также спектральное вычитание шума. В рамках данного подхода принимаемый сигнал рассматривается как сумма полезной компоненты и шумовой составляющей. После вычисления спектра принимаемого сигнала выполняется также оценка спектральной плотности шума по временным интервалам между зондирующими импульсами. Полученная оценка спектра шума вычитается из спектра принимаемого сигнала, что позволяет снизить влияние широкополосных шумов и повысить вероятность корректного обнаружения доплеровского пика [17].

Для повышения достоверности измерений в содарах реализуются алгоритмы автоматического обнаружения и подавления фиксированных отражений. В программном обеспечении содаров Remtech применяется процедура автоматической идентификации спектральных пиков, расположенных вблизи нулевого доплеровского сдвига и сохраняющихся в последовательности измерений. После их обнаружения формируется оценка спектрального вклада фиксированного сигнала, которая затем вычитается из текущего спектра мощности. В случаях, когда корректное восстановление спектра невозможно, соответствующие высотные ячейки могут автоматически помечаться как недостоверные и исключаться из дальнейшего расчета ветрового профиля.

Для повышения устойчивости измерений применяется временное накопление и усреднение результатов по множеству зондирующих импульсов и временных интервалов наблюдения, что позволяет уменьшить дисперсию оценки доплеровской частоты и снизить влияние случайных шумовых всплесков. Время усреднения варьируется в диапазоне от 2 до 60 минут, в зависимости от требуемой точности и условий проведения измерений [16].

Разрешающая способность по высоте определяется аппаратными особенностями и режимами работы конкретной модели. В частности, для высокочастотных систем характерно более высокое вертикальное разрешение, достигающее порядка 10 м, тогда

как для низкочастотных модификаций данный параметр, как правило, находится на уровне до 100 м.

Диапазон измерения горизонтальной скорости ветра составляет от 0 до 50 м/с. Погрешность определения горизонтальной компоненты скорости  $V$  не превышает 0,2 м/с или 3% от измеряемого значения при скоростях ветра выше 6 м/с. Диапазон измерения вертикальной скорости ветра в стандартной конфигурации составляет  $\pm 4$  м/с (с возможностью расширения в отдельных режимах). Погрешность измерения вертикальной компоненты скорости не превышает 0,05 м/с. Погрешность определения направления скорости ветра составляет не более  $3^\circ$  при скорости ветра выше 2 м/с [16].

### 3 Шумоподавление в содарах компании Scintec

Германская компания Scintec AG также является одним из ведущих мировых производителей акустических локаторов и радиоакустических систем дистанционного зондирования атмосферы [23]-[26].

Доплеровские содара семейства FAS (Flat Array Sodar) используют плоскую фазированную акустическую антенную решетку пьезоэлектрических акустических преобразователей оригинальной конструкции (рисунок 5). Управляя фазами сигналов отдельных элементов решетки формируют несколько направленных акустических лучей под различными углами к вертикали. Наиболее распространенная схема включает вертикальный луч и несколько наклонных лучей (обычно четыре пары симметричных лучей) [23], что позволяет определять три компоненты скорости ветра.

Многочувствительный режим зондирования позволяет выполнять взаимную проверку измерений по различным направлениям и повышать надежность оценки параметров ветра.



Рисунок 5 – Антенная решетка содара фирмы Scintec

Количество зондирований на различных частотах в одном направлении может достигать десяти [23]. Диапазоны рабочих частот определяются конструктивными особенностями конкретной системы и составляют 2525-4850 Гц, 1650-2750 Гц и 825-1375 Гц.

После приема эхосигнала выполняется его цифровая обработка с использованием быстрого преобразования Фурье. На этапе предварительной обработки в программном обеспечении Scintec выполняется оценка уровня фонового шума на участках спектра,

свободных от полезной составляющей, после чего ОСШ определяется как отношение мощности полезной спектральной компоненты к оцененному уровню шума. Полученные спектры накапливаются и усредняются по серии акустических импульсов. Время усреднения может составлять от 1 до 180 мин. Это позволяет уменьшить влияние случайных флуктуаций шума и повысить устойчивость оценок спектральных моментов.

Кроме того, система обработки включает процедуры автоматического контроля качества измерений. В качестве основных критериев используются минимально допустимое ОСШ, при котором данные признаются достоверными, а также проверки согласованности результатов, полученных по различным частотам и направлениям зондирования. Поскольку системы данного типа работают с несколькими частотами и лучами, выполняется сопоставление данных между каналами, что позволяет выявлять выбросы и некорректные измерения. Если измеренные параметры оказываются взаимно противоречивыми, соответствующие данные могут быть автоматически исключены из дальнейшей обработки. На рисунке 6 представлены результаты измерений, где в интервале времени 18-19 часов наблюдалось существенное увеличение уровня шума. В связи с этим данные, полученные на данном временном участке, были признаны некорректными для дальнейшего анализа и исключены из рассмотрения. При необходимости возможна повторная обработка исходных временных рядов и спектров.

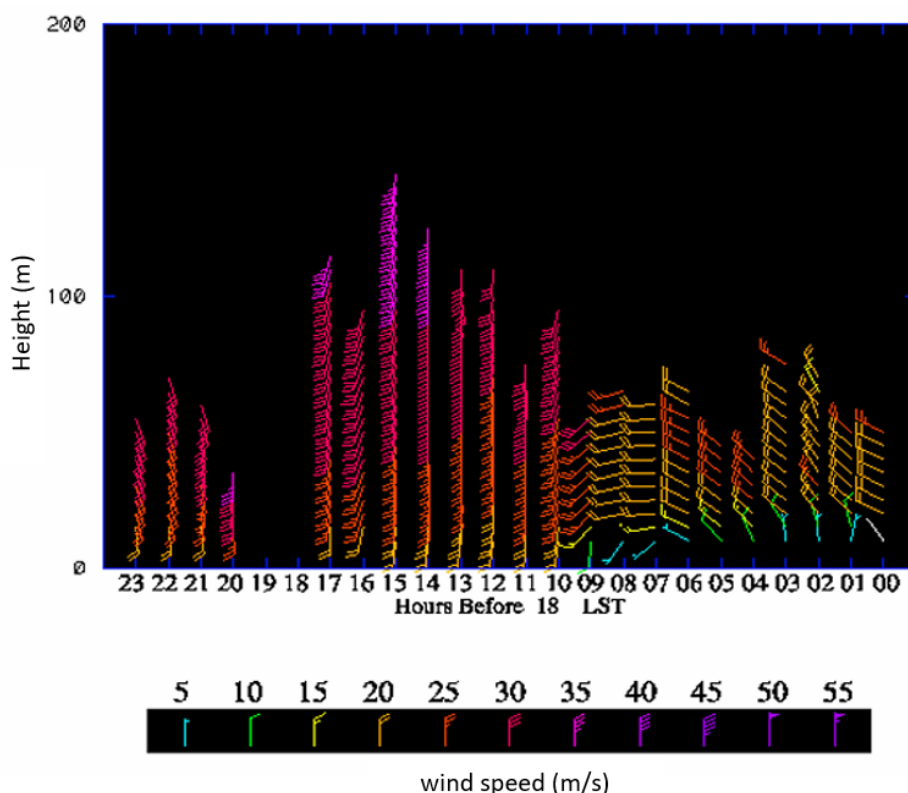


Рисунок 6 – Высотно-временная (до 200 м) суточная почасовая запись распределения горизонтальной скорости ветра с отбраковкой «зашумленных» данных. Ориентация стрелок соответствует направлению ветра, масштаб стрелок - величине скорости ветра

Также в программном обеспечении реализовано автоматическое обнаружение и коррекция отражений от «местников» на этапе спектральной обработки сигнала. После их обнаружения алгоритмы обработки выполняют коррекцию спектра, что позволяет исключить влияние фиксированных отражений при определении доплеровского сдвига и расчете скорости ветра.

Помимо алгоритмических методов, в содарах Scintec применяются и конструктивные способы снижения шумов. Антенная система может устанавливаться внутри защитного экрана, уменьшающего влияние шума ветра и турбулентных потоков воздуха вблизи поверхности [27]. На рисунке 7 представлены различные звукозащитные экраны. Также применяются специально разработанные инверсные рупорные акустические преобразователи, обеспечивающие эффективное согласование акустического импеданса излучателя с атмосферой и, что очень важно, защиту от осадков (рисунок 8 [23]).

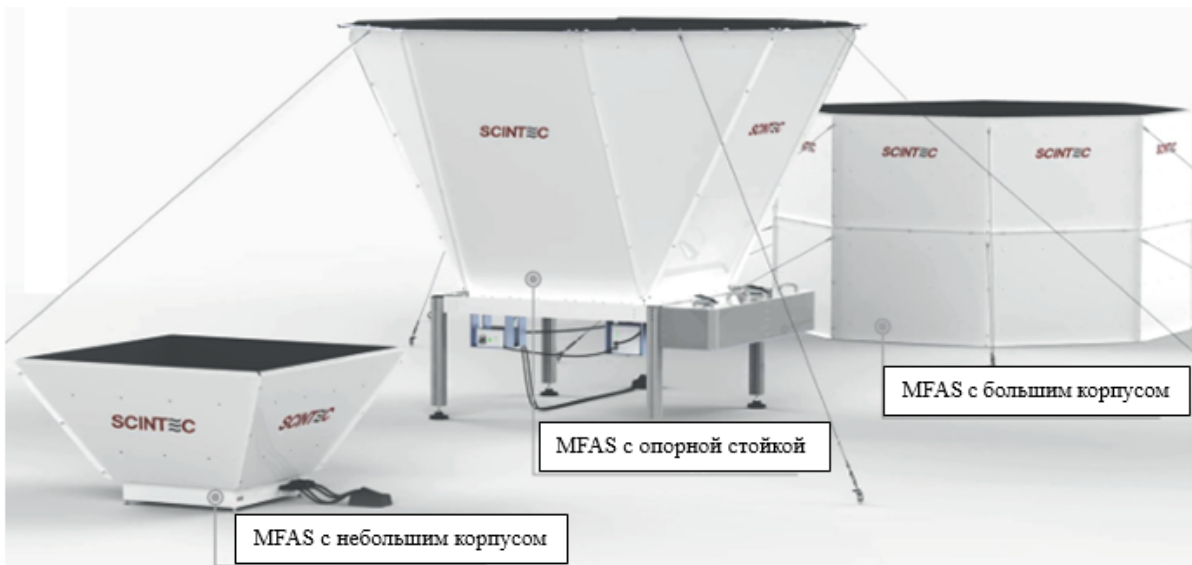


Рисунок 7 – Звукозащитные экраны антенн содаров Scintec

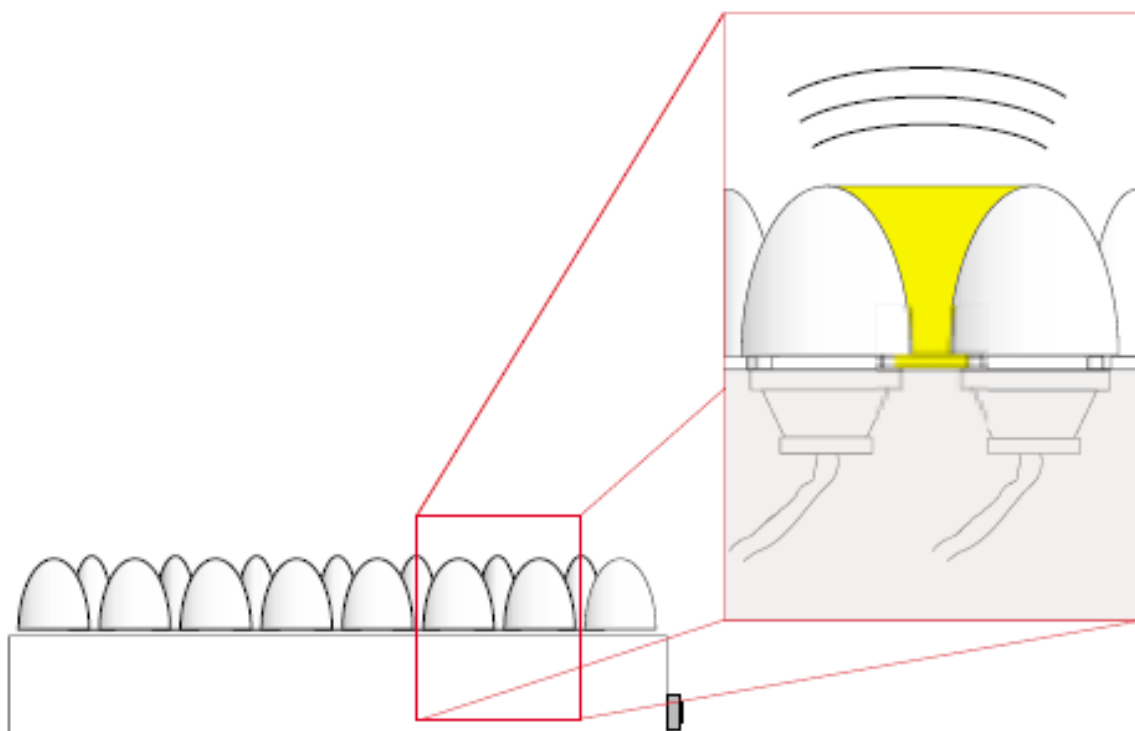


Рисунок 8 – Инверсный акустический рупор в антенной решетке

Программное обеспечение приборов предоставляет доступ ко всем уровням данных – от необработанных или, как их еще называют, “сырых” данных до обработанных профилей ветра, что позволяет пользователям дополнительно применять собственные методы и алгоритмы обработки и подавления шума.

Содары серии FAS обладают возможностью проведения полностью автоматизированной процедуры самодиагностики. Данная процедура включает контроль фазовых и амплитудных характеристик каждого отдельного акустического элемента антенной решетки. Реализация такого функционала обеспечивается архитектурой устройства, в которой каждый элемент решетки управляется индивидуально. Благодаря этому программное обеспечение системы способно выполнять детальный анализ параметров излучения и, в частности, определять точные характеристики направленности всех девяти акустических лучей.

Вертикальное разрешение содаров по высоте составляет от 5 до 20 м, при этом минимальное значение характерно для систем с более высокой пространственной дискретизацией (серия SFAS), а максимальное – для конфигураций с увеличенным диапазоном зондирования (серия XFAS). Диапазон измерения горизонтальной скорости ветра лежит в пределах от 0 до 50 м/с. Погрешность определения горизонтальной составляющей скорости ветра составляет порядка 0,1–0,3 м/с и может варьироваться в зависимости от условий наблюдения и параметров усреднения сигнала. Диапазон измерения вертикальной скорости ветра ограничен значениями от минус 10 до +10 м/с. Погрешность измерения вертикальной скорости находится на уровне 0,025–0,1 м/с. Точность определения направления скорости ветра менее 1,5° [23].

#### 4 Шумоподавление в содарах компании Atmospheric Research & Technology

Американская компания Atmospheric Research & Technology (ART) основана в 2000 году и специализируется на разработке компактных и мобильных систем акустического зондирования атмосферы, применяемых в задачах метеорологических исследований, ветроэнергетики и экологического мониторинга [28], [29].

Одной из наиболее известных систем компании является содар VT-1, представляющий собой монопозиционную доплеровскую систему с фазированной антенной решеткой. Данный содар работает на одной частоте зондирования 4600 Гц [30] и обеспечивает измерение профиля скорости ветра на высотах от 15 до 300 м. Антенная система построена на основе фазированной акустической решетки, отклоненной на 20° от вертикали. Используется массив из 48 элементов, объединенных в единую структуру, как показано на рисунке 9 [31]. Управление фазами сигналов отдельных преобразователей позволяет формировать направленные акустические лучи и осуществлять зондирование в нескольких направлениях.

Антенная система включает рефлекторную плату, установленную под углом 35° к горизонтали, как показано на рисунке 10. Рефлекторная плата является ключевым элементом конструкции. Ее наклон обеспечивает направленность фазированной решетки слегка вниз, что препятствует попаданию дождя, снега и мусора на антенные элементы. Такая ориентация допускает применение стандартных пьезоизлучателей и повышает эксплуатационную надежность в неблагоприятных погодных условиях. В холодном климате электрический нагрев выполняют на отражающей плате, а не на самой решетке. Это предотвращает образование снега и льда, поглощающих акустический сигнал и ухудшающих работу содара.



Рисунок 9 – Антенная система содара VT-1

Внутренняя поверхность корпуса защитного экрана облицована ячеистым поглощающим пенополиуретаном, что снижает переотражения и уровень боковых лепестков антенны, ослабляет воздействие внешнего шума [30]. В совокупности конструкция рефлектора и корпус делают VT-1 устойчивым к помехам и позволяют системе эффективно формировать один вертикальный луч и два наклонных в ортогональных горизонтальных направлениях.



Рисунок 10 – Рефлекторная панель содара VT-1 в корпусе антенны

После приема эхо-сигнала по каждому каналу зондирования производится стандартная цифровая обработка с помощью быстрого преобразования Фурье. При сложной структуре частотного спектра принимаемого сигнала (значительная ширина спектра или наличие нескольких максимумов) определение доплеровской частоты и, соответственно, скорости ветра требует применения дополнительных процедур оценки центральной частоты. Для повышения устойчивости измерений используется накопление и последующее усреднение по серии зондирующих импульсов, что позволяет уменьшить влияние случайных шумовых флуктуаций и повысить точность выделения доплеровского максимума. Интервал усреднения, как правило, варьируется в диапазоне от 1 до 60 минут.

Важным этапом обработки является оценка отношения сигнал/шум (ОСШ). Для этого в спектре принимаемого сигнала определяется уровень фонового шума и рассчитывается отношение мощности спектрального максимума к шумовой составляющей. При снижении ОСШ ниже установленного порогового значения соответствующая высотная ячейка считается недостоверной и исключается из последующей обработки параметров ветра [31].

В содаре VT-1 дополнительно реализована функция автономного самотестирования, обеспечивающая регулярный контроль работоспособности антенной системы и позволяющая своевременно выявлять деградацию элементов антенной решетки [30]. Полная последовательность проверки занимает примерно 3 минуты. При обнаружении более пяти плохих элементов производится их своевременная замена, что обеспечивает восстановление энергетике содара и устойчивость измерений.

Пространственная разрешающая способность содара находится в диапазоне от 10 до 40 м, в зависимости от режима работы. Диапазон измерения скорости горизонтального ветра составляет от 0 до 25 м/с, при этом точность определения находится на уровне  $\pm 0,25$  м/с. Погрешность определения направления ветра не превышает  $\pm 2^\circ$  [30].

## 5 Шумоподавление в содарах компаний Vaisala и Second Wind

Содар Triton, разработанный компаниями Vaisala и Second Wind [32], представляет собой промышленную доплеровскую акустическую систему дистанционного зондирования атмосферы, предназначенную прежде всего для задач ветроэнергетики и долговременного мониторинга ветрового режима. Система ориентирована на измерение вертикального профиля скорости и направления ветра на высотах, превышающих уровень современных ветротурбин, что делает ее востребованной при выборе площадок для ветропарков и при оценке ветроэнергетического потенциала [33]-[35]. В типовой конфигурации устройство обеспечивает надежные измерения ветрового профиля до высоты не более 200 м.

Конструктивно система оснащена специализированной акустической антенной с запатентованной гексагональной конфигурацией излучателей и трехлепестковой формой антенного корпуса (рисунок 11). В рабочем режиме содар использует трехлучевую схему зондирования атмосферы. Один из лучей направлен вертикально вверх, а два других имеют наклон относительно вертикали в ортогональные стороны. Излучение и прием осуществляются последовательно по каждому из направлений зондирования. Один полный цикл зондирования по всем трем направлениям занимает порядка шести секунд. Работа системы осуществляется на частоте 4500 Гц [36]. В конструкции предусмотрена отражающая панель, устанавливаемая под углом порядка  $45^\circ$  к вертикали. Такое конструктивное решение обеспечивает эффективное перенаправление акустического излучения и формирование наклонных зондирующих лучей.

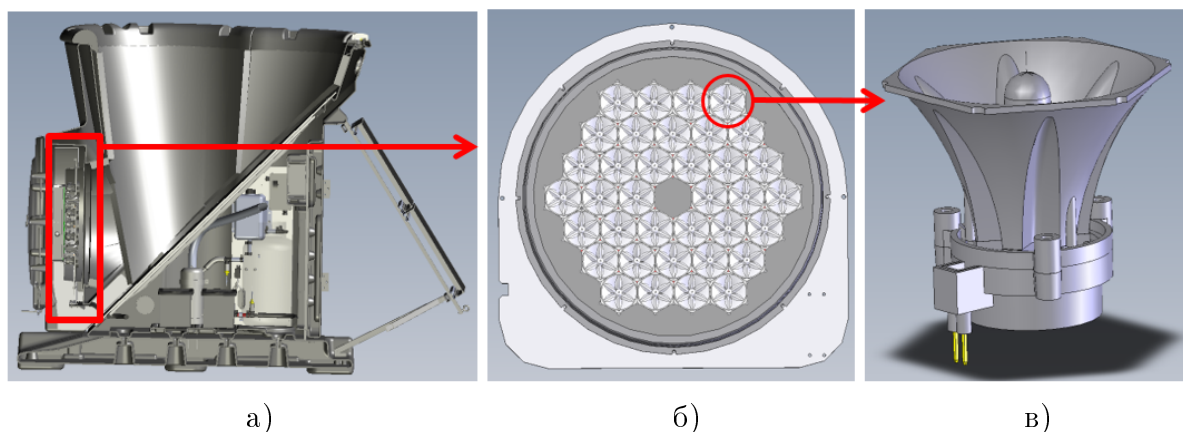


Рисунок 11 – Корпус антенны содара Triton (а), антенная решетка (б) и ее отдельный элемент (в)

Конструкция содара рассчитана на эксплуатацию в автономных полевых условиях. Герметичный ударопрочный корпус антенны защищает от атмосферных воздействий, включая осадки, пыль и перепады температуры. Для обеспечения работоспособности в холодном климате применяются системы обогрева и защиты от образования льда и инея. В частности, возможна установка каталитического пропанового нагревателя, предотвращающего обледенение акустической антенны. Конструкция также имеет элементы виброизоляции и акустического экранирования, снижающие влияние внешних шумов [37], [38].

Отраженный атмосферой акустический сигнал принимается антенной системой, усиливается и оцифровывается. Далее сигнал разбивается на временные интервалы, соответствующие различным расстояниям от источника излучения. Каждому временному интервалу соответствует определенная высотная ячейка зондирования, что позволяет формировать дискретный вертикальный профиль атмосферы.

После оцифровки сигнала для каждой высотной ячейки идет стандартная спектральная обработка с использованием быстрого преобразования Фурье. Спектры мощности, полученные от множества последовательных зондирующих импульсов, усредняются, что позволяет снизить уровень случайного шума. Дополнительно используются процедуры временного и вертикального сглаживания результатов. Сравниваются значения доплеровских сдвигов в соседних высотных ячейках и в последовательных интервалах усреднения, после чего результаты, противоречащие физически допустимым изменениям ветрового профиля, могут классифицироваться как выбросы и исключаться из итогового набора данных.

На этапе цифровой обработки данных выполняется оценка отношения ОСШ и формирование показателя качества измерения. Используется адаптивный порог обнаружения эхо-сигнала [39]. Если значение ОСШ в высотной ячейке оказывается ниже установленного порога, измерение считается недостоверным и исключается из итогового профиля скорости ветра.

Измерения выполняются в десяти фиксированных слоях, расположенных на высотах 40, 50, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 и 200 м. Диапазон измеряемых значений горизонтальной скорости ветра составляет от 0 до 25 м/с, при этом погрешность ее определения не превышает  $\pm 0,5$  м/с [32].

## 6 Сравнение методов шумоподавления в зарубежных содарах

В таблице 1 обобщены сведения об используемых аппаратных и алгоритмических методах защиты, а также о критериях валидации и отбраковки данных.

Таблица 1 – Сравнение технических решений для повышения помехоустойчивости содаров

Производитель	Аппаратные (конструктивные) методы защиты	Алгоритмические методы шумоподавления	Критерии валидации и отбраковки данных
Metek	<ul style="list-style-type: none"> <li>Фазированная антенная решетка, подавление боковых лепестков.</li> <li>Двойные звукозащитные экраны с треугольными-ми клиньями по периметру верхней кромки.</li> <li>Частотные фильтры.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Многочастотное зондирование.</li> <li>Временное усреднение и сглаживание.</li> <li>Подавление фиксированного эха (помех с нулевым доплеровским сдвигом).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Порог по ОСШ.</li> <li>Доступен просмотр «сырых» данных (без отбраковки).</li> <li>Вычисление спектральных моментов (положение максимума, ширина спектра) с помощью БПФ.</li> </ul>
Remtech	<ul style="list-style-type: none"> <li>Фазированная антенная решетка, подавление боковых лепестков.</li> <li>Звукозащитные экраны.</li> <li>Частотная фильтрация.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Сложнокодированный частотный зондирующий сигнал.</li> <li>Спектральное вычитание шума.</li> <li>Временное усреднение.</li> <li>Подавление фиксированного эха (помех с нулевым доплеровским сдвигом).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Принцип многократной валидации: скорость ветра учитывается, если она подтверждена на нескольких зондирующих частотах.</li> <li>Вычисление спектральных моментов (положение максимума, ширина спектра) с помощью БПФ.</li> <li>Обнаружение пиков с порогами ОСШ для разных частот и лучей.</li> </ul>
Scintec	<ul style="list-style-type: none"> <li>Фазированная антенная решетка, подавление боковых лепестков.</li> <li>Формирование до 9 направлений зондирования.</li> <li>Звукозащитные экраны.</li> <li>Инверсные акустические рупоры – согласование импеданса, защита от осадков.</li> <li>Автоматическая самодиагностика каждого элемента решетки</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Многочастотное зондирование.</li> <li>Подавление фиксированного эха (помех с нулевым доплеровским сдвигом).</li> <li>Временное усреднение.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Сравнение согласованности результатов между разными зондирующими частотами и направлениями лучей.</li> <li>Порог по ОСШ. Если отношение сигнал/шум ниже заданного уровня, высотная ячейка признается недостоверной и исключается.</li> <li>Доступен просмотр "сырых" данных (без отбраковки).</li> <li>Вычисление спектральных моментов (положение максимума, ширина спектра) с помощью БПФ.</li> </ul>
Atmospheric Research Technology	<ul style="list-style-type: none"> <li>Наклоненная фазированная антенная решетка – защита от дождя, снега, мусора.</li> <li>Автономное самотестирование.</li> <li>Звукозащитный экран.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Временное усреднение – подавление случайных флуктуаций.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Порог по ОСШ. Если отношение сигнал/шум ниже заданного уровня, высотная ячейка признается недостоверной и исключается.</li> <li>Вычисление спектральных моментов (положение максимума, ширина спектра) с помощью БПФ.</li> </ul>
Vaisala (Triton)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Наклоненная фазированная решетка – защита от дождя, снега, мусора</li> <li>Звукозащитный экран.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Временное усреднение и сглаживание</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Порог по ОСШ. Если отношение сигнал/шум ниже заданного уровня, высотная ячейка признается недостоверной и исключается.</li> <li>Вычисление спектральных моментов (положение максимума, ширина спектра) с помощью БПФ.</li> </ul>

## 7 Шумоподавление в отечественных содарах

У нас в стране исследования и разработки в области акустического зондирования атмосферы были начаты с 1974 года практически одновременно в нескольких научных

институтах и ведутся до сих пор [1], [40], [41]. Был создан целый ряд моделей содаров и с первых же опытов их применения исследователи и разработчики столкнулись как с положительными, так и отрицательными моментами использования акустических волн для измерительных задач в атмосфере. С одной стороны, сильное взаимодействие звуковых волн с атмосферой обеспечивает успех измерительных метеорологических задач, с другой стороны это приводит к случайному характеру сигнала в месте приема и его сильному ослаблению, а также всегда присутствуют внешние акустические шумы и помехи. Поэтому, как описано выше, приходится бороться за повышение энергетики принимаемого содаром сигнала, применяя различные методы. Так вопросы анализа и синтеза построения звукозащитных экранов для антенн содаров были разработаны и изложены в [42], [43], а другие применяемые алгоритмические методы оптимизации приема и шумоподавления описаны в [1].

### Заключение

Проведенный сравнительный анализ позволяет не только оценить текущее состояние технологий, но и определить пути дальнейшего развития шумоподавления в содарах. Современный тренд заключается в переходе от пассивной частотной фильтрации к цифровым и алгоритмическим методам анализа сигнала. Если на заре развития содаров основная борьба с шумом сводилась к аппаратным методам (частотной фильтрации, звукозащитным экранам), то сегодня акцент смещается в сторону алгоритмической цифровой обработки. Развитие идет в трех направлениях:

1. В развитии комбинированного подхода, где используется не только аппаратная защита (фазированные антенные решетки, защитные экраны), но и алгоритмическая (многочастотное зондирование и кодирование, спектральная компенсация шума и др.).

2. В адаптивности и машинном обучении, где будущее за алгоритмами, способными адаптироваться к шумовой обстановке. Вместо жестких пороговых критериев (ОСШ) желательно использовать статистические методы, а в перспективе – нейросетевые модели, способные отличать полезный атмосферный сигнал от шума (помехи) по сложным спектральным признакам.

3. В повышении вычислительной мощности, где переход на современные процессоры (ARM, FPGA) позволит перенести сложную математику (многочастотное БПФ, корреляционный и спектральный анализ) непосредственно в аппаратуру содара. Это откроет путь к использованию методов, которые ранее считались слишком ресурсоемкими для полевых измерителей.

Анализ стратегий ведущих производителей позволяет выделить два принципиально разных подхода к достижению помехоустойчивости, в рамках которых сформировались явные лидеры. В области аппаратных (конструктивных) решений лидером несомненно является компания Scintec. Она выделяется комплексным подходом к проектированию антенной системы содара, который включает использование инверсных рупоров для оптимального акустического согласования с атмосферой, разработку эффективных звукозащитных экранов различной конфигурации и, что особенно важно, внедрение системы самодиагностики каждого элемента фазированной решетки. Это позволяет поддерживать близкую к теоретическому пределу диаграмму направленности содара в течение всего срока эксплуатации, что является ключевым фактором аппаратного подавления помех.

В области алгоритмических методов шумоподавления бесспорным лидером выступает компания Remtech, которая сделала ставку на математические методы, как на основной инструмент выделения сигнала. Ключевая технология Remtech – сложнокодированный зондирующий сигнал (multi-frequency coding) с последующей

валидацией данных. Реализованный принцип «одна скорость, подтвержденная несколькими частотами зондирования» позволяет получать достоверные оценки при экстремально низком отношении сигнал/шум (производителем заявляется выигрыш до 20 дБ), в условиях, где аппаратные методы других производителей оказываются бессильны. Кроме того, Remtech активно развивает методы спектральной компенсации шума, оценивая шумовую обстановку в паузах между зондирующими импульсами, что повышает эффективность работы содаров.

Реализация всех описанных методов в содарах позволит создавать и применять надежные стационарные и мобильные измерительные средства для зондирования атмосферы.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН по проекту № FWRG-2026-0006.

### Список использованных источников

1. Красненко Н. П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. Томск: Водолей, 2001. – 278 с.
2. Bradley S. Atmospheric Acoustic Remote Sensing: Principles and Applications. - Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2007. - 296 p.
3. Красненко Н.П. Содары для зондирования атмосферного пограничного слоя // Научное приборостроение. 2018. Т. 28. № 4. С. 82-89.
4. Crescenti G.H. The degradation of doppler sodar performance due to noise // Atmospheric Environment. - 1998. - Vol. 32, N 9. - P. 1499-1509.
5. Metek GmbH Germany. URL: <https://metek.de> (дата обращения 01.04.2026)
6. Krajny E.A., Ośródko L., Wojtylak M. Application of Doppler sodar in short-term forecasting of PM10 concentration in the air in Krakow (Poland) // Atmospheric Measurement Techniques. - 2024. - Vol. 17. - P. 2451-2464.
7. de Haij M. On the use of SODAR reflectivity data during low visibility conditions at Schiphol Airport. - De Bilt: Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), 2010. - Report No. IR2010-02.
8. Sree Brahmanandam P., Gouthu U., Tarakeswara Rao K. [et al.] Doppler Sodar Measured Winds and Sea Breeze Intrusions over Gadanki (13.5° N, 79.2° E), India // Sustainability. - 2023. - Vol. 15, N 15. - P. 12167.
9. Probst O., Cárdenas D. State of the Art and Trends in Wind Resource Assessment // Energies. - 2010. - Vol. 3, N 6. - P. 1087-1141.
10. Lokoshchenko M.A., Yavlyayeva E.A. Wind profiles in Moscow city by the sodar data // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2008. - Vol. 1. - P. 012045.
11. Локощенко М.А. О высоте приземного слоя воздуха по содарным данным // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. - 2024. - Т. 60, N 1. - С. 65-72.
12. Hansen K.S. Validation of Sodar Measurements for Wind Power // Proceedings of the European Wind Energy Conference & Exhibition (EWEC 2006) (Athens, 2006). - Athens, 2006. - P. 1-10.
13. Acoustic Sounder SODAR PCS2000-64 Product Description. - Elmshorn: METEK GmbH. - 19 p.
14. Penelope Menounou, Ilene J. Busch-Vishniac, David T. Blackstock; Jagged-edge noise barriers. J. Acoust. Soc. Am. 1 May 1998; 103: P. 2759–2770. <https://doi.org/10.1121/1.421452>.

15. Signal Analysis Doppler-SODAR MODOS DSDR3x7 DSDPA.90-24/-64 PCS-2000/-24/-64. - Elmshorn: METEK GmbH. - 96 p.
16. Remtech Inc. [Электронный ресурс]. - URL: <https://remtechinc.com/> (дата обращения 12.03.2026).
17. Remtech Sodar Technical Description [Электронный ресурс]. - URL: [https://remtechinc.com/wp-content/uploads/DC02012\\_SODAR\\_TECHNICAL\\_DESCRIPTION\\_0.pdf](https://remtechinc.com/wp-content/uploads/DC02012_SODAR_TECHNICAL_DESCRIPTION_0.pdf) (дата обращения 12.03.2026).
18. Freitas E.D., Dias M.A.F.S., Nair K.S., Silva Dias P.L. Using of Doppler Sodar in Atmospheric Measurements // Hybrid Methods in Engineering. - 2000. - Vol. 2, N 4. - P. 543-558.
19. Haggagy M.E.-N. A Sodar-based Investigation of the Atmospheric Boundary Layer. - Freiburg: Meteorologisches Institut der Universität Freiburg, 2003. - 263 p.
20. Baumann-Stanzer K., Piringer M. Two-years of boundary layer measurements with a sodar - Statistics and applications // Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere. - 2001. - Vol. 26, N 3. - P. 205-211.
21. Baumann-Stanzer K., Piringer M. Foehn signals detected by sodar wind and turbulence measurements in the Rhine Valley, Austria, during the MAP field phase // Meteorology and Atmospheric Physics. - 2004. - Vol. 85, N 1. - P. 125-139.
22. USA патент N 5,521,883, от 28.05.1996 г. Method of Remotely Determining the Three-Dimensional Velocity of a Fluid Such as Air or Water / J.-M. Fage, R. Tasso, A. Donzier; патентообладатель Remtech (Velizy) // Justia Patents. - URL: <https://patents.justia.com/patent/5521883> (дата обращения 28.02.2026).
23. Scintec AG [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.scintec.com/> (дата обращения 12.03.2026).
24. Berg L.K., Reynolds R.M., Allwine K.J., Blumberg A. Comparisons of Measurements Made Using Two Sodars in an Urban Environment // 86th AMS Annual Meeting. Paper No. JP2.9. - Boston: American Meteorological Society, 2006. - 3 p.
25. SODAR Calibration for Wind Energy Applications: Final Reporting on WP3, EU WISE Project NNE5-2001-297. - Отчет. - 2005. - 69 p.
26. Anderson P.S., Ladkin R.S., Renfrew I.A. An Autonomous Doppler Sodar Wind Profiling System // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. - 2005. - Vol. 22, N 9. - P. 1301-1310.
27. Scintec Flat Array Sodars Installation and Operation Manual: SFAS, MFAS, XFAS. - Rottenburg: Scintec AG, 2011. - 33 p.
28. Rogers A.L., Manwell J.F. Investigation of the Applicability of SODAR for Wind Resource Measurements in Complex and Inhomogeneous Terrain. - Amherst: University of Massachusetts, Renewable Energy Research Laboratory, 2003. - 11 p.
29. Draxl C., Worsnop R.P., Xia G. [et al.] Mountain waves can impact wind power generation // Wind Energy Science. - 2021. - Vol. 6, N 1. - P. 45-60.
30. Atmospheric Research & Technology [Электронный ресурс]. - URL: <https://sodar.com/> (дата обращения 12.03.2026).
31. Walls E., Rogers A., Manwell J. Eastham, MA: SODAR-Based Wind Resource Assessment // Proceedings of the American Wind Energy Association (AWEA) Windpower 2007 Conference (Los Angeles, 2007). - Los Angeles, 2007. - 80 p.
32. Vaisala [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.vaisala.com/> (дата обращения 17.03.2026).
33. SoDAR Verification Test Triton SoDAR at Test Site Lelystad. - Отчет. - 2008. - 47 p.
34. Yuechun Y., Jixue W., Hongfang W. [et al.] Comparison of Triton SODAR Data to Meteorological Tower Wind Measurement Data in Hebei Province, China. - Golden: National

Renewable Energy Laboratory (NREL), 2012. - 38 p.

35. Accuracy Test of a Sodar of Type Triton Wind Profiler Serial No.: 225. - Отчет о калибровке. - 2010. - 98 p.

36. Triton SODAR Brochure [Электронный ресурс]. - Vaisala Oyj. - URL: [https://www.sartelco.it/contenuti/download/EOLICO\\_WIND/Triton-Brochure.pdf](https://www.sartelco.it/contenuti/download/EOLICO_WIND/Triton-Brochure.pdf) (дата обращения 12.03.2026).

37. Pat. WO2008108894A2, от 2008 г. Transducer Array Arrangement and Operation for Sodar Applications. Pat. WO2008108894A2, от 18.09.2008 г. Transducer Array Arrangement and Operation for Sodar Applications; патентообладатель WIPO Patentscope. - URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2008108894> (дата обращения 18.03.2026).

38. Pat. US8456955B2 USA, от 2013 г. Housings for Phased Array Monostatic Sodar Systems. Pat. US8456955B2, USA, от 04.06.2013 г. Housings for Phased Array Monostatic Sodar Systems / (Remtech, по патенту US); патентообладатель Remtech // USPTO / Justia Patents. - URL: <https://patents.justia.com/patent/8456955> (дата обращения 18.03.2026).

39. TRITON® SONIC WIND PROFILER Siting Guidelines. - Vaisala Oyj, 2012. - 38 p.

40. Красненко Н.П. Развитие дистанционных методов и средств изучения нижней атмосферы в ИМКЭС СО РАН // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 2. С. 98-104.

41. Красненко Н.П., Раков А.С., Рыбаков И.А. Состояние и тенденции развития систем акустического зондирования атмосферы // Сборник Трудов XXXVII сессии Российского акустического общества (Москва, 20-24 октября 2025 г.) [Электронный ресурс]. - М.: ГЕОС, 2025. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - С. 115-123.

42. Красненко Н.П., Мананко Е.Е. Анализ и синтез защищенных акустических антенн для атмосферных исследований // Труды XV сессии Российского акустического общества «Акустические измерения. Ультразвук и ультразвуковые технологии. Атмосферная акустика. Акустика океана». Т. II. - М.: ГЕОС, 2004. - С. 102-106.

43. Красненко Н.П., Мананко Е.Е. Зеркально-параболические акустические антенны для зондирования атмосферы // Методы и устройства передачи и обработки информации: Межвуз. сб. науч. тр. - Вып. 5 / Под ред. В.В. Ромашева, В.В. Булкина. - СПб.: Гидрометеиздат, 2004. - С. 83-98.

## References

1. Krasnenko N.P. Acoustic sounding of the atmospheric boundary layer. - Tomsk: Vodolay, 2001. - 278 p.

2. Bradley S. Atmospheric Acoustic Remote Sensing: Principles and Applications. - Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2007. - 296 p.

3. Krasnenko N.P. Sodars for Atmospheric Boundary Layer Sounding // Nauchnoe Priborostroenie. - 2018. - Vol. 28, N 4. - P. 82-89.

4. Crescenti G.H. The degradation of doppler sodar performance due to noise // Atmospheric Environment. - 1998. - Vol. 32, N 9. - P. 1499-1509.

5. Metek GmbH Germany. URL: <https://metek.de> (date of reference 01.04.2026)

6. Krajny E.A., Ośródko L., Wojtylak M. Application of Doppler sodar in short-term forecasting of PM10 concentration in the air in Krakow (Poland) // Atmospheric Measurement Techniques. - 2024. - Vol. 17. - P. 2451-2464.

7. de Haij M. On the use of SODAR reflectivity data during low visibility conditions at Schiphol Airport. - De Bilt: Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), 2010. - Report No. IR2010-02.

8. Sree Brahmanandam P., Gouthu U., Tarakeswara Rao K. [et al.] Doppler Sodar Measured Winds and Sea Breeze Intrusions over Gadanki (13.5° N, 79.2° E), India // Sustainability. - 2023. - Vol. 15, N 15. - P. 12167.
9. Probst O., Cárdenas D. State of the Art and Trends in Wind Resource Assessment // Energies. - 2010. - Vol. 3, N 6. - P. 1087-1141.
10. Lokoshchenko M.A., Yavlyaeva E.A. Wind profiles in Moscow city by the sodar data // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2008. - Vol. 1. - P. 012045.
11. Lokoshchenko M.A. On the height of the surface air layer according to sodar data // Izvestiya of the Russian Academy of Sciences. Physics of the Atmosphere and Ocean. - 2024. - Vol. 60, N 1. - P. 65-72.
12. Hansen K.S. Validation of Sodar Measurements for Wind Power // Proceedings of the European Wind Energy Conference & Exhibition (EWEC 2006) (Athens, 2006). - Athens, 2006. - P. 1-10.
13. Acoustic Sounder SODAR PCS2000-64 Product Description. - Elmshorn: METEK GmbH. - 19 p.
14. Penelope Menounou, Ilene J. Busch-Vishniac, David T. Blackstock; Jagged-edge noise barriers. J. Acoust. Soc. Am. 1 May 1998; 103: P. 2759-2770. <https://doi.org/10.1121/1.421452>.
15. Signal Analysis Doppler-SODAR MODOS DSDR3x7 DSDPA.90-24/-64 PCS-2000/-24/-64. - Elmshorn: METEK GmbH. - 96 p.
16. Remtech Inc. [Electronic resource]. - URL: <https://remtechinc.com/> (date of reference 12.03.2026).
17. Remtech Sodar Technical Description [Electronic resource]. - URL: [https://remtechinc.com/wp-content/uploads/DC02012\\_SODAR\\_TECHNICAL\\_DESCRIPTION\\_0.pdf](https://remtechinc.com/wp-content/uploads/DC02012_SODAR_TECHNICAL_DESCRIPTION_0.pdf) (date of reference 12.03.2026).
18. Freitas E.D., Dias M.A.F.S., Nair K.S., Silva Dias P.L. Using of Doppler Sodar in Atmospheric Measurements // Hybrid Methods in Engineering. - 2000. - Vol. 2, N 4. - P. 543-558.
19. Haggagy M.E.-N. A Sodar-based Investigation of the Atmospheric Boundary Layer. - Freiburg: Meteorologisches Institut der Universität Freiburg, 2003. - 263 p.
20. Baumann-Stanzer K., Piringer M. Two-years of boundary layer measurements with a sodar - Statistics and applications // Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere. - 2001. - Vol. 26, N 3. - P. 205-211.
21. Baumann-Stanzer K., Piringer M. Foehn signals detected by sodar wind and turbulence measurements in the Rhine Valley, Austria, during the MAP field phase // Meteorology and Atmospheric Physics. - 2004. - Vol. 85, N 1. - P. 125-139.
22. USA patent N 5,521,883, or 28.05.1996 г. Method of Remotely Determining the Three-Dimensional Velocity of a Fluid Such as Air or Water / J.-M. Fage, R. Tasso, A. Donzier; patent holder of Remtech (Velizy) // Justia Patents. - URL: <https://patents.justia.com/patent/5521883> (date of reference 28.02.2026).
23. Scintec AG [Electronic resource]. - URL: <https://www.scintec.com/> (date of reference 12.03.2026).
24. Berg L.K., Reynolds R.M., Allwine K.J., Blumberg A. Comparisons of Measurements Made Using Two Sodars in an Urban Environment // 86th AMS Annual Meeting. Paper No. JP2.9. - Boston: American Meteorological Society, 2006. - 3 p.
25. SODAR Calibration for Wind Energy Applications: Final Reporting on WP3, EU WISE Project NNE5-2001-297. - Report. - 2005. - 69 p.
26. Anderson P.S., Ladkin R.S., Renfrew I.A. An Autonomous Doppler Sodar Wind Profiling System // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. - 2005. - Vol. 22, N

9. - P. 1301-1310.

27. Scintec Flat Array Sodars Installation and Operation Manual: SFAS, MFAS, XFAS. - Rottenburg: Scintec AG, 2011. - 33 p.

28. Rogers A.L., Manwell J.F. Investigation of the Applicability of SODAR for Wind Resource Measurements in Complex and Inhomogeneous Terrain. - Amherst: University of Massachusetts, Renewable Energy Research Laboratory, 2003. - 11 p.

29. Draxl C., Worsnop R.P., Xia G. [et al.] Mountain waves can impact wind power generation // Wind Energy Science. - 2021. - Vol. 6, N 1. - P. 45-60.

30. Atmospheric Research & Technology [Electronic resource]. - URL: <https://sodar.com/> (date of reference 12.03.2026).

31. Walls E., Rogers A., Manwell J. Eastham, MA: SODAR-Based Wind Resource Assessment // Proceedings of the American Wind Energy Association (AWEA) Windpower 2007 Conference (Los Angeles, 2007). - Los Angeles, 2007. - 80 p.

32. Vaisala [Electronic resource]. - URL: <https://www.vaisala.com/> (date of reference 17.03.2026)

33. SoDAR Verification Test Triton SoDAR at Test Site Lelystad. - Report. - 2008. - 47 p.

34. Yuechun Y., Jixue W., Hongfang W. [et al.] Comparison of Triton SODAR Data to Meteorological Tower Wind Measurement Data in Hebei Province, China. - Golden: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2012. - 38 p.

35. Accuracy Test of a Sodar of Type Triton Wind Profiler Serial No.: 225. - Calibration report. - 2010. - 98 p.

36. Triton SODAR Brochure [Electronic resource]. - Vaisala Oyj. - URL: [https://www.sartelco.it/contenuti/download/EOLICO\\_WIND/Triton-Brochure.pdf](https://www.sartelco.it/contenuti/download/EOLICO_WIND/Triton-Brochure.pdf) (date of reference 12.03.2026).

37. Pat. WO2008108894A2, от 2008 г. Transducer Array Arrangement and Operation for Sodar Applications. Pat. WO2008108894A2, dated 18.09.2008 г. Transducer Array Arrangement and Operation for Sodar Applications; patent holder of WIPO Patentscope. - URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2008108894> (date of reference 18.03.2026).

38. Pat. US8456955B2 USA, dated 2013 г. Housings for Phased Array Monostatic Sodar Systems. Pat. US8456955B2, USA, от 04.06.2013 г. Housings for Phased Array Monostatic Sodar Systems; patent holder of Remtech // USPTO / Justia Patents. - URL: <https://patents.justia.com/patent/8456955> (date of reference 18.03.2026).

39. TRITON® SONIC WIND PROFILER Siting Guidelines. - Vaisala Oyj, 2012. - 38 p.

40. Krasnenko N.P. Development of remote methods and means for studying the lower atmosphere at IMKES SB RAS // Optika Atmosfery i Okeana. - 2022. - Vol. 35, N 2. - P. 98-104

41. Krasnenko N.P., Rakov A.S., Rybakov I.A. State and trends in the development of acoustic sounding systems for the atmosphere // Proceedings of the XXXVII Session of the Russian Acoustical Society (Moscow, October 20-24, 2025) [Electronic resource]. - Moscow: GEOS, 2025. - 1 electronic optical disc (CD-ROM). - P. 115-123

42. Krasnenko N.P., Mananko E.E. Analysis and synthesis of shielded acoustic antennas for atmospheric research // Proceedings of the XY Session of the Russian Acoustical Society "Acoustic Measurements. Ultrasound and Ultrasonic Technologies. Atmospheric Acoustics. Ocean Acoustics". Vol. II. - Moscow: GEOS, 2004. - P. 102-106

43. Krasnenko N.P., Mananko E.E. Mirror-parabolic acoustic antennas for atmospheric sounding // Methods and Devices for Information Transmission and Processing: Interuniversity collection of scientific papers. Issue 5 / Ed. by V.V. Romashev, V.V. Bulkin. - St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2004. - P. 83-98

УДК: 534.6

OECD: 01.03.AA

DOI: 10.56408/2412-8627.2026.12.2.002

## Предварительные результаты валидации сферической микрофонной решетки для локализации источников шума в салонах летательных аппаратов

Мошков П.А.<sup>1\*</sup>, Стрелец Д.Ю.<sup>2</sup>, Остроумов М.Н.<sup>3</sup>, Мязина Н.В.<sup>4</sup>, Софронов С.М.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>К.т.н, ведущий инженер,

<sup>2</sup>К.т.н, доцент, Директор дирекции Института №1 «Авиационная техника»,

<sup>3</sup>Инженер 1-й категории, <sup>4</sup>Инженер 2-й категории, <sup>5</sup>Инженер

<sup>1,3,4,5</sup>НИО-101

<sup>1-5</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ), г. Москва, РФ

### Аннотация

Актуальность рассматриваемой проблемы обусловлена необходимостью выполнения акустической доводки пассажирских салонов современных отечественных летательных аппаратов с применением технологии сферического бимформинга. При выполнении таких исследований аппаратно-программный комплекс должен пройти процедуру валидации в условиях заглушенной камеры. Целью настоящей работы является разработка методики и предварительный анализ результатов валидационных испытаний сферической микрофонной решетки МАИ, разработанной по технологии реверс-инжиниринга. Испытания выполнены в заглушенной камере НИИСФ РААСН на третьем этаже, который может рассматриваться как полностью заглушенное помещение. Разработана методика испытаний с учетом особенностей применения сферической решетки – локализации и ранжирования по интенсивности и/или звуковой мощности источников шума в салонах летательных аппаратов. Получены карты локализации источников шума и определен их относительный вклад в суммарное звуковое давление. Дальнейшие исследования будут направлены на выбор рациональных алгоритмов для локализации и ранжирования по интенсивности источников шума в салоне летательных аппаратов.

**Ключевые слова:** шум в салоне, сферическая микрофонная решетка, сферический бимформинг, локализация источников шума, шумовые карты, валидация

## *Preliminary validation results of a spherical microphone array for noise source localization in aircraft cabins*

Moshkov P.A.<sup>1\*</sup>, Strelets D.Yu.<sup>2</sup>, Ostroumov M.N.<sup>3</sup>, Myazina N.V.<sup>4</sup>, Sofronov S.M.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Ph.D., Leading Engineer,

<sup>2</sup>Ph.D., Associate Professor, Director of the Directorate of Institute No. 1 "Aircraft Engineering",

<sup>3</sup>Engineer 1st Category, <sup>4</sup>Engineer 2nd Category, <sup>5</sup>Engineer

<sup>1,3,4,5</sup>NIO-101 Department

<sup>1-5</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

### **Abstract**

*The relevance of the problem under consideration is due to the need for acoustic finishing of passenger cabins of modern domestic aircraft using spherical beamforming technology. When conducting such research, the hardware and software system must undergo a validation procedure in an anechoic chamber. The purpose of this work is to develop a test procedure and conduct a preliminary analysis of the validation test results of a spherical microphone array developed at MAI using reverse engineering technology. The tests were performed in an anechoic chamber of the Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAACS) on the third floor, which can be considered as a fully anechoic room. A test procedure has been developed taking into account the specific features of spherical array application - localization and ranking by intensity and/or sound power of noise sources in aircraft cabins. Noise source localization maps have been obtained and their relative contribution to the overall sound pressure level has been determined. Further research will be aimed at selecting rational algorithms for localization and ranking of noise sources by intensity in aircraft cabins.*

**Keywords:** aircraft cabin noise, spherical microphone array, spherical beamforming, noise source localization, noise maps, validation

### **Введение**

Важным этапом при проектировании современных летательных аппаратов (ЛА) является акустическая доводка пассажирского салона, которая заключается в корректировке схемы размещения акустических материалов в бортовой конструкции для управления шумом в салоне в условиях массовых и габаритных ограничений [1]-[3] по результатам натурного летного эксперимента.

Неотъемлемой частью таких исследований является локализация и ранжирование по интенсивности основных источников шума в салоне с применением технологии сферического бимформинга. Общее описание данной технологии и используемых алгоритмов подробно рассмотрено в работах [4]-[9].

В РФ ранее такие работы уже выполнялись на самолетах MC-21 [10], [11] в 2023 году, а впервые были выполнены на самолете RRJ-95 [12], [13] в 2019 году с применением зарубежных аппаратно-программных комплексов. Но с учетом импортозамещения как зарубежных систем на самолетах, так и систем виброакустических измерений данная проблема вновь становится актуальной.

Пассажирские салоны ЛА должны соответствовать требованиям ГОСТ 20296-2014 [14], а акустические материалы, применяемые в бортовой конструкции самолета, должны работать эффективно [15], [16]. При этом применение сферических многомикрофонных решеток в настоящее время является стандартизированной процедурой при выполнении виброакустических испытаний гражданских самолетов [17]. Правильная интерпретация результатов таких измерений позволяет скорректировать схему размещения акустических материалов в бортовой конструкции, обеспечив уменьшение их массы и уровней шума в салоне.

Целью работы является разработка методики и предварительный анализ результатов валидационных испытаний сферической микрофонной решетки МАИ, разработанной по технологии реверс-инжиниринга.

По аналогии с валидацией программного обеспечения в соответствии с ГОСТ Р 57700.2-2017 [18] можно дать определение валидации сферической микрофонной решетки в рамках настоящей работы.

Валидация сферической микрофонной решетки – это процесс определения

соответствия результатов визуализации звукового поля с применением технологии сферического бимформинга реальному звуковому полю в салоне ЛА. Валидация обеспечивает обоснование того, что сферическая решетка в заявленной области применения (частотный диапазон, динамический диапазон, пространственное разрешение и т.д.) позволяет правильно и с определенной точностью локализовать источники шума в салоне ЛА.

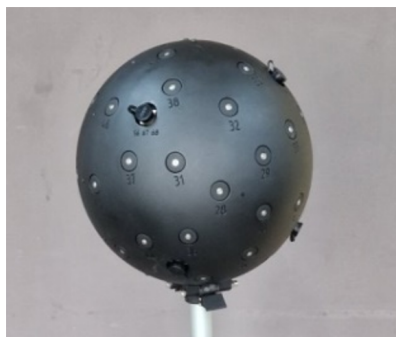
Новизна работы заключается в том, что впервые в РФ разработана и прошла валидацию отечественная сферическая микрофонная решетка МАИ, созданная методом реверс-инжиниринга зарубежного аналога Simcenter Solid Sphere Array. Предложена и реализована на практике методика валидации сферической решетки для условий, приближенных к реальным пассажирским салонам ЛА (расстояния до источников 1–4 м, характерные тональные частоты от 200 до 4000 Гц и «белый» шум).

## 1 Объект исследования

Объектом исследования является сферическая микрофонная решетка МАИ, изготовленная компанией ООО «Динамикс» на базе реверс-инжиниринга решетки Simcenter Solid Sphere Array в конфигурациях 54 микрофона и 78 микрофонов. Общий вид сферической микрофонной решетки МАИ рассмотрен на рисунке 1.

В целом отличие исследуемой решетки от прототипа Simcenter Solid Sphere Array заключается в самостоятельном изготовлении сферы диаметром 30 см под установку 54-х микрофонов диаметром 1/4 дюйма свободного поля типа GRAS 40PH-10 (частотный диапазон 10-20000 Гц, чувствительность 50 мВ/Па, динамический диапазон 33-135 дБ), 8-ми расширителей для установки 24-х дополнительных измерительных микрофонов и выборе штатива. Также стоит отметить, что рабочая длина кабельной сети измерительной системы МАИ составляет 13 м, что существенно расширяет возможности и улучшает эргономические качества системы при проведении измерений по сравнению с прототипом, у которого длина кабельной сети составляла 5 м.

Вся остальная аппаратно-программная часть аналогична решетке Simcenter Solid Sphere Array, которая использовалась ранее при проведении виброакустических испытаний самолета RRJ-95 [12], [13]. Система сбора данных включает в себя 80-ти каналный регистратор типа SCADAS Mobile. Для обработки результатов измерений использовалось лицензионное программное обеспечение Simcenter Testlab, приобретенное МАИ до введения зарубежных санкций.



а) базовая конфигурация, диаметр сферы 30 см, 54 микрофона. Рабочий частотный диапазон 500-10000 Гц



б) расширенная конфигурация, внешний диаметр сферы 80 см, 78 микрофонов. Рабочий частотный диапазон 200-10000 Гц

Рисунок 1 – Общий вид сферической микрофонной решетки МАИ, изготовленной ООО «Динамикс» на базе реверс-инжиниринга решетки Simcenter Solid Sphere Array

## 2 Методика валидационных испытаний

Валидацию сферической микрофонной решетки целесообразно выполнять в условиях свободного звукового поля в заглушенной камере [19], [20] с заранее известными источниками широкополосного и/или тонального шума. При формировании методики валидационных испытаний использованы результаты аналогичных работ [21]–[23].

В салонах ЛА суммарный нормируемый уровень шума в метрике дБА, как правило, определяется излучением в области частот 200-3000 Гц [24]–[29]. Поэтому необходимо иметь возможность получения шумовых карт в данном (проблемном) частотном диапазоне.


Таким образом, для анализа были выбраны тональные частоты 200, 500, 1000, 2000, 3000 и 4000 Гц, включающие нижний частотный предел (200 Гц) сферической микрофонной решетки и частотный диапазон пассажирского салона.

Используемые в работе источники шума представлены в таблице 1. Отметим, что источник шума И-1 генерировал только «белый» шум или был выключен. Источники И-2 и И-4 и И-3 и И-5 работали попарно или все одновременно на заданной тональной частоте. В таблице 1 также указаны воспроизводимые частотные диапазоны колонок (по данным производителей) и их характерные размеры. Отметим, что заявляемые производителями динамиков И-2 (И-4) и И-5 воспроизводимые частотные диапазоны 20–20000 Гц, вероятнее всего, являются диапазоном цифрового тракта Bluetooth. Реальные диапазоны воспроизводимых частот с учетом размеров динамиков можно приближенно оценить для И-2 180-10000 Гц, а для И-5 90-10000 Гц.

Таблица 1 – Используемые в исследовании источники звука

Обозначение источника	Азимутальный угол	Наименование динамика	Общий вид	Характерные размеры, мм	Воспроизводимый частотный диапазон, Гц
И-1	0°	Источник звука OED-SP360		Ø345	100–10000
И-2 и И-4	45° и 135°	Портативная колонка Audiobop M3		Ø50x40	20–20000 (90-10000)*
И-3	90°	Портативная колонка JBL Flip		175x68x70	65–20000

Продолжение таблицы 1

И-5	150°	Портативная колонка Fiego BlackLine FR120		74x110x 73	20–20000 (180-10000)*
-----	------	---	---	------------	--------------------------

\*Ожидаемый реальный частотный диапазон с учетом размеров динамиков

С учетом ширины салонов современных российских самолетов и вертолетов (таблица 2) были выбраны расстояния для расстановки источников звука на дугах окружностей радиусами 1, 2 и 4 м. Эти расстояния больше половины ширины салонов и высот рассмотренных в таблице 2 летательных аппаратов.

Таблица 2 – Характерные размеры фюзеляжа и салона современных отечественных летательных аппаратов (информация из открытых источников)

Тип ЛА	Диаметр фюзеляжа, м	Ширина салона, м	Высота салона, м
<b>Самолеты</b>			
RRJ-95 (SJ-100)	3,46	3,24	2,12
ТУ 204/214	3,8	3,56	2,11
МС-21	4,06	3,81	–
ИЛ-96	6,08	5,7	–
ЛМС-901 «Байкал»	1,8	1,5	1,67
Let L-410 «Turbolet» (как прототип самолета ЛМС-192 «Освей»)	1,92	1,88	1,64
<b>Вертолеты</b>			
МИ-171	3,91	2,34	1,8
Ансат	–	1,68	1,3
МИ-8П	6,36	2,34	1,8

Схема размещения источников шума при расположении источников на дуге окружности представлена на рисунке 2. Источники располагались в направлениях азимутальных углов 0, 45, 90, 135 и 150°. Угловые положения источников звука были выбраны с учетом информации о пространственном разрешении для базовой решетки Simcenter Solid Sphere Array в конфигурации 54 микрофона: 70° для частоты 500 Гц, 53° для частоты 1000 Гц, 28° для частоты 2000 Гц, 17° для частоты 4000 Гц, 11° для частоты 6000 Гц. Данная информация обозначает, что, например, на частоте 500 Гц два источника шума будут различимы на картах локализации при их расположении на азимутальных углах 70° и более.

Также стоит отметить динамический диапазон для базовой решетки Simcenter Solid Sphere Array в конфигурации 54 микрофона (условия свободного поля, источник на расстоянии 1 м): 15 дБ для частоты 500 Гц, 10 дБ для частоты 2000 Гц, 8 дБ для частоты 5000 Гц, 6 дБ для частоты 10000 Гц.

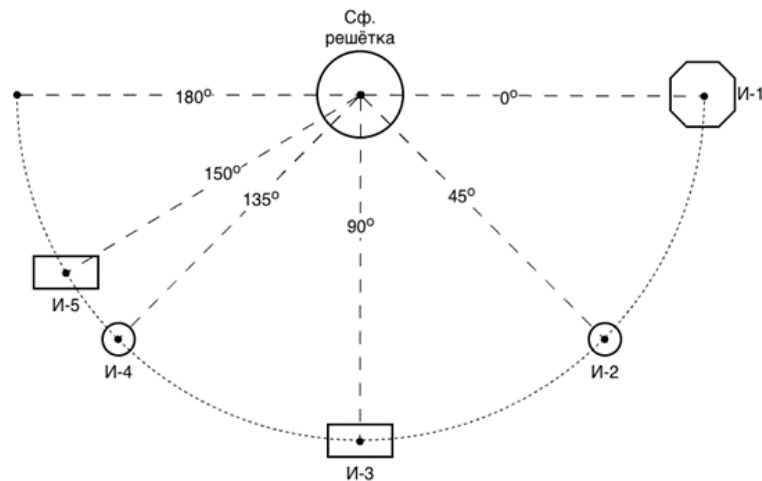
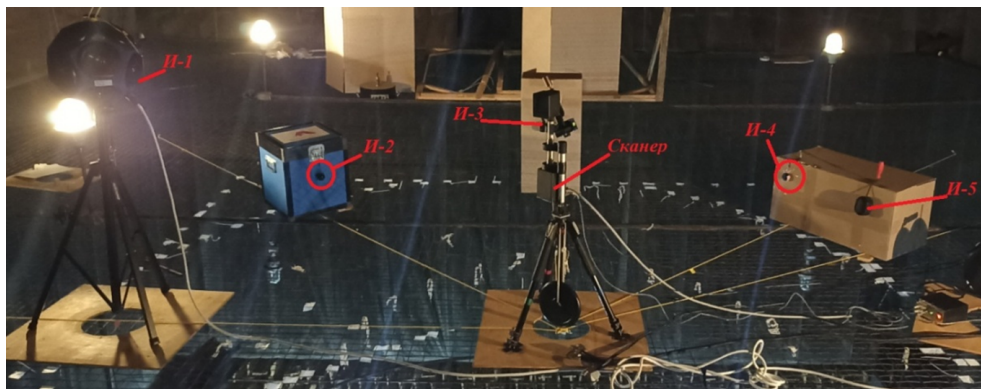
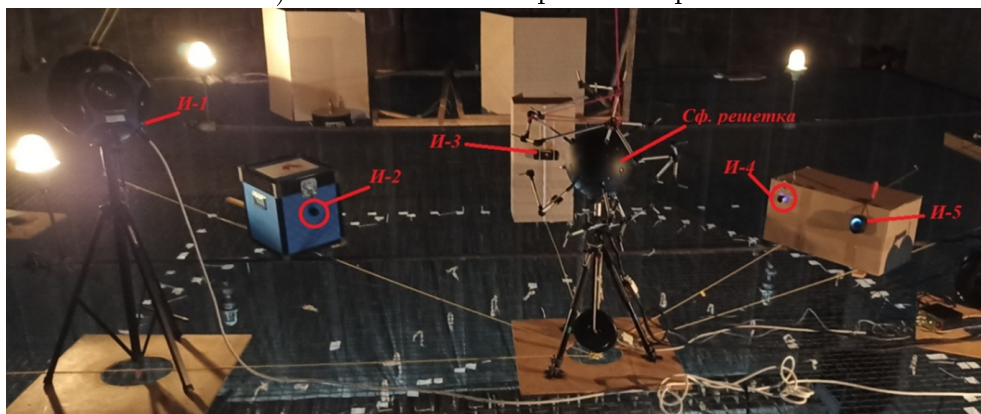


Рисунок 2 – Схема проведения эксперимента для валидации сферической решётки МАИ при расположении источников на дуге окружности

Валидационные испытания сферической микрофонной решетки выполнены в заглушенной камере Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН) на третьем этаже, который может рассматриваться как полностью заглушенное помещение согласно данным работы [30]. Общий вид расположения сферической многомикрофонной решетки и источников шума на дуге окружности радиусом 2 м представлен на рисунке 3.



а) положение сканера геометрии



б) положение сферической решетки с расширителями

Рисунок 3 – Общий вид расположения сферической решетки / сканера геометрии и источников шума на дуге окружности 2 м в заглушенной камере НИИСФ РААСН

На первом этапе работы выполнялось сканирование окружающего пространства с получением геометрии, наложенной на сетку из 1800 узлов. На втором этапе выполнялись непосредственно акустические синхронные измерения сферической решеткой в течение 40 секунд с частотой дискретизации 25600 Гц на каждом рассматриваемом режиме, характеризуемым расстоянием до источника звука (1, 2 и 4 м), частотой источников звука и конфигурацией их работы, а также конфигурацией сферической решетки (54 или 78 микрофонов (рисунок 1), только при измерениях на дуге окружности радиусом 4 м). В итоге были получены карты локализации источников шума и определены алгоритмы, позволяющие наиболее точно локализовать источник звука.

Дополнительно был выполнен анализ, позволяющий определить вклад отдельных источников в суммарное звуковое давление. Данный анализ наиболее важен при разработке мероприятий по снижению уровней шума в салоне ЛА в рамках акустической доводки, поскольку позволяет в явном виде выделить вклад отдельных ограждающих внутреннее пространство самолета элементов (панелей) и шума системы кондиционирования и вентиляции воздуха в общую звуковую мощность (или давление в зависимости от используемого алгоритма постобработки результатов измерений) в исследуемой зоне пассажирского салона.

### 3 Предварительные результаты валидационных испытаний сферической решетки в заглушенной камере НИИСФ РААСН

#### 3.1 Карты локализации и оценка относительного вклада источников шума

В рамках настоящего раздела рассмотрим процедуру анализа результатов измерений и построения карт локализации источников шума, а также оценки вклада отдельных источников шума в суммарное звуковое давление.

Узкополосный спектр уровней звукового давления (УЗД) с границами рассматриваемых частот (800–1200 Гц) с шириной полосы 10 Гц при работе И-1 в режиме «белого» шума; И-2 и И-4 - в режиме тонального сигнала с частотой 1000 Гц, осредненный по всем 78-ми микрофонам решетки, представлен на рисунке 4.

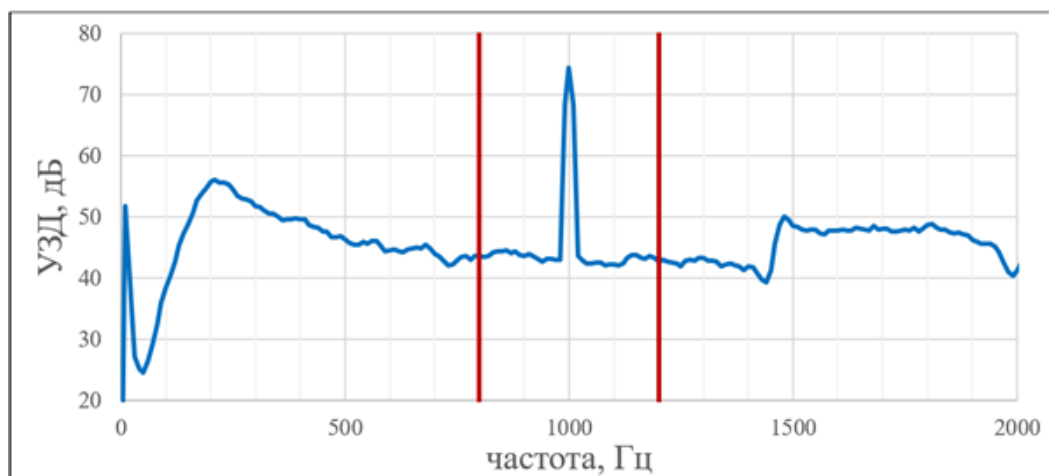
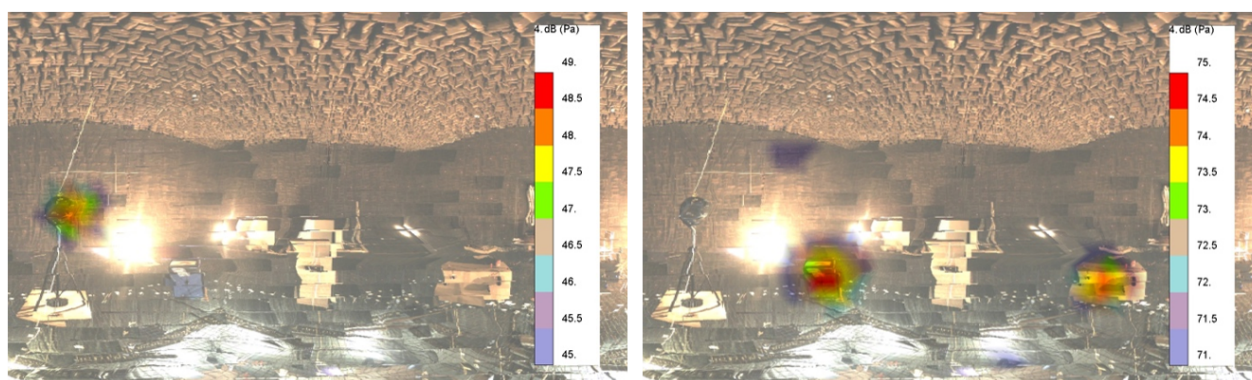


Рисунок 4 – Узкополосный спектр уровней звукового давления с границами рассматриваемых частот (800–1200 Гц) при работе И-1 в режиме «белого» шума; И-2 и И-4 – в режиме тонального сигнала с частотой 1000 Гц (расстояние до источников – 2 м, диапазон частот 0,1–2000 Гц, ширина полосы – 10 Гц, конфигурация 78 микрофонов)

Для данного режима работы источников получены карты локализации источников шума для суммарного излучения в полосе частот 800–1200 Гц (рисунок 5). Источники широкополосного (И-1) и тонального (И-2 и И-4) шумов локализуются в данной полосе частот с применением разных алгоритмов. Источник «белого» шума динамик И-1 локализуется при помощи алгоритма Anti-Coherence Reference/Open (рисунок 5а), а источники тонального шума динамики И-2 и И-4 с помощью алгоритма Spectrum/Open (рисунок 5б). Поскольку уровень широкополосного сигнала более, чем на 20 дБ ниже уровня тонального шума (рисунок 4) и эта разница выше, чем динамический диапазон решетки поэтому получить карту локализации со всеми 3-мя источниками на данном режиме не представляется возможным. В целом можно отметить высокую точность локализации источников – красные пятна на картах соответствуют их реальным положениям при измерениях (рисунок 3б).



а) карта локализации источника шума И-1 (локализация при помощи алгоритма Anti-Coherence Reference/Open)

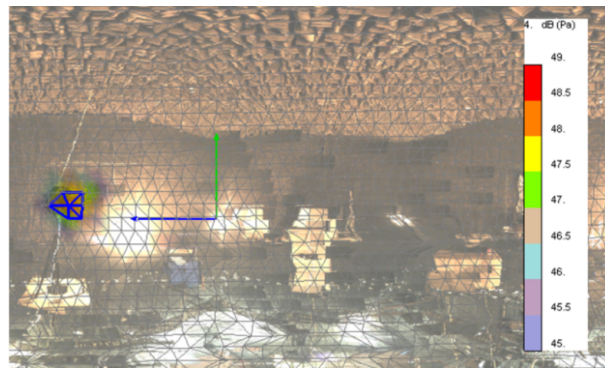
б) карта локализации источников шума И-2 и И-4 (локализация при помощи алгоритма Spectrum/Open)

Рисунок 5 – Карты локализации источников шума для суммарного излучения в диапазоне частот 800–1200 Гц при работе И-1 в режиме «белого» шума; И-2 и И-4 – в режиме тонального сигнала с частотой 1000 Гц (расстояние до источников – 2 м, контраст карт – 4 дБ, конфигурация 78 микрофонов)

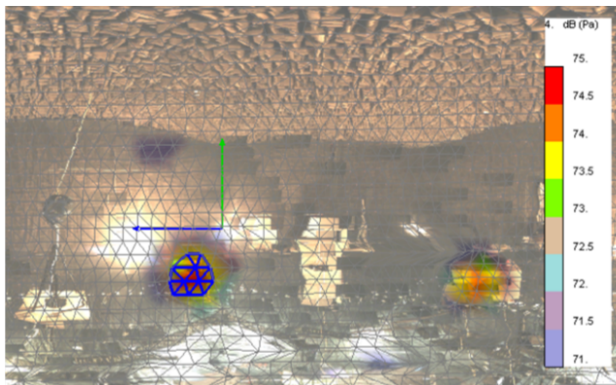
Для данного режима работы источников оценим вклад каждого в суммарное звуковое давление. Для этого на картах локализации выберем зоны на расчетной сетке, соответствующие источникам И-1, И-2 и И-4 как представлено на рисунке 6.

Результаты расчетной оценки вклада в суммарный уровень звукового давления отдельных источников И-1, И-2 и И-4 в диапазоне частот 800-1200 Гц представлены на рисунке 7. Можно видеть, что вклад двух источников тонального шума на частоте 1000 Гц фактически одинаковый и оба динамика (И-2 и И-4) определяют суммарный уровень звуковой мощности на данной частоте. Источник И-1 в свою очередь определяет уровни широкополосного шума в исследуемом частотном диапазоне. Данные результаты полностью согласуются с узкополосным спектром уровней звукового давления, представленным на рисунке 4, и картами локализации источников шума, представленными на рисунке 5.

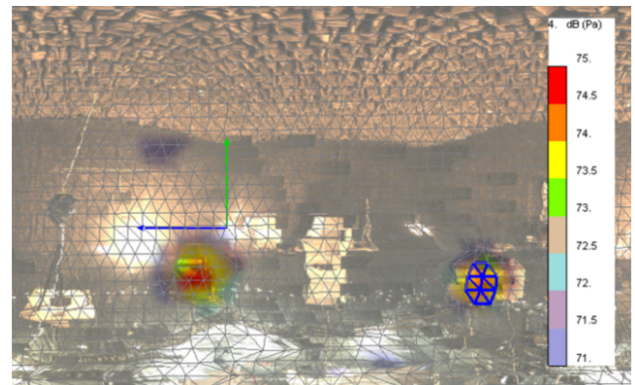
Отметим, что результаты расчетной оценки вклада отдельных источников шума в салоне являются исходными данными для разработки научно обоснованных рекомендаций по модификации схемы размещения акустических материалов в бортовой конструкции ЛА, которая должна обеспечить повышение акустического комфорта пассажиров и уменьшение массы. В случае пассажирских самолетов салон разбивается на отсеки, в которых выполняются акустические измерения и оценка вклада источников.



а) Выбор зоны для оценки вклада источника И-1



б) Выбор зоны для оценки вклада источника И-2



в) Выбор зоны для оценки вклада источника И-4

Рисунок 6 – Выбор зон на расчетной сетке для оценки вклада источников в суммарное звуковое давление

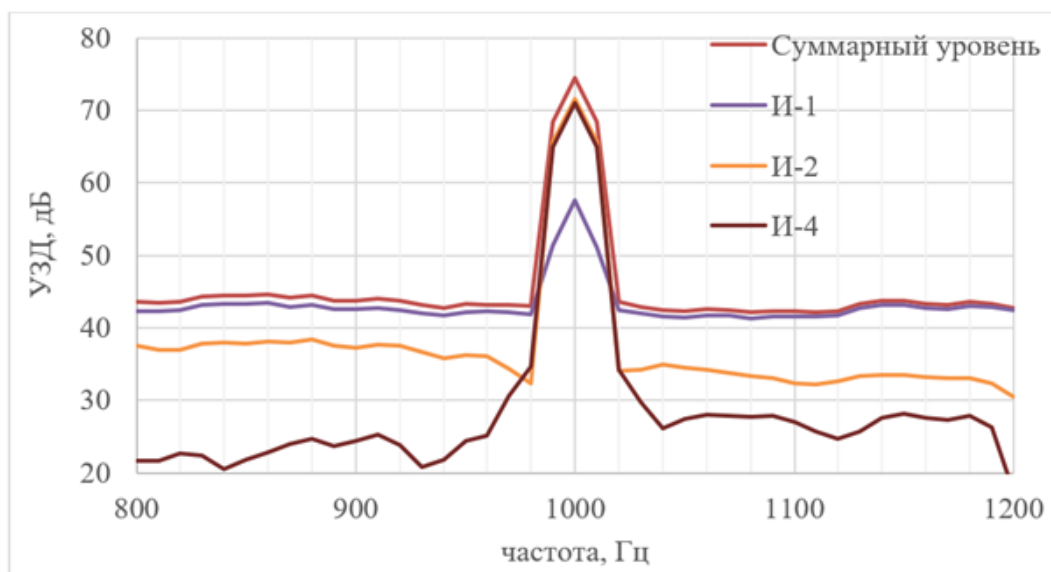
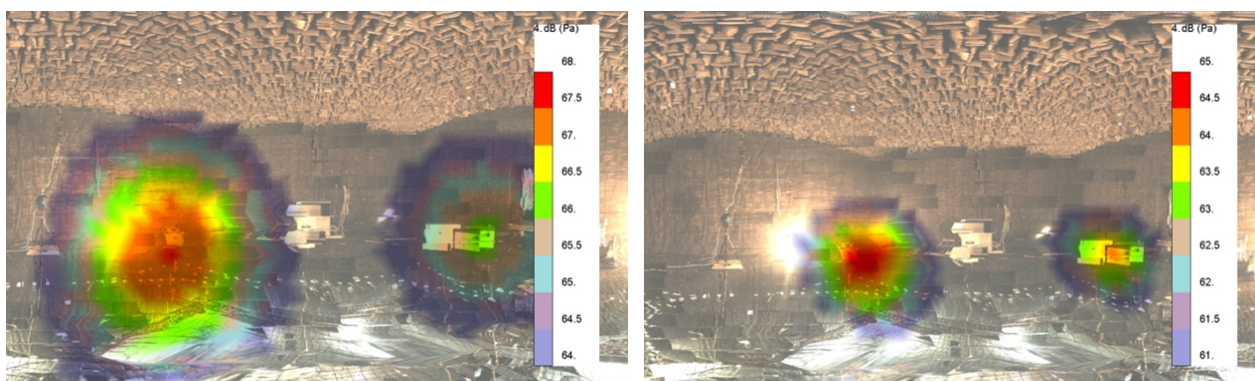


Рисунок 7 – Оценка вклада в суммарный уровень звукового давления отдельных источников при работе И-1 в режиме «белого» шума; И-2 и И-4 – в режиме тонального сигнала с частотой 1000 Гц (расстояние до источников – 2 м) в диапазоне частот 800-1200 Гц

### 3.2 Оценка влияния конфигурации сферической микрофонной решетки на локализацию источников шума

Одной из задач настоящего исследования было сравнить две конфигурации решетки при локализации одних и тех же источников шума. Теоретически в диапазоне частот 500-10000 Гц решетка в обеих конфигурациях должна обеспечивать одинаковые результаты локализации. При этом в диапазоне частот 200-500 Гц доверять результатам локализации можно только при использовании сферической решетки в расширенной конфигурации 78 микрофонов.

Сравнение двух конфигураций сферической решетки для локализации источников шума в диапазоне частот 100–2000 Гц при работе И-2, И-4 на режиме тонального сигнала с частотой 200 Гц представлено на рисунке 8. Можно видеть качественное отличие в картах локализации с применением двух конфигураций решетки. Чем меньше пятно на шумовой карте, тем выше точность локализации источника шума. В конфигурации решетки 78 микрофонов наблюдается более точная локализация источников шума (рисунок 8 б).



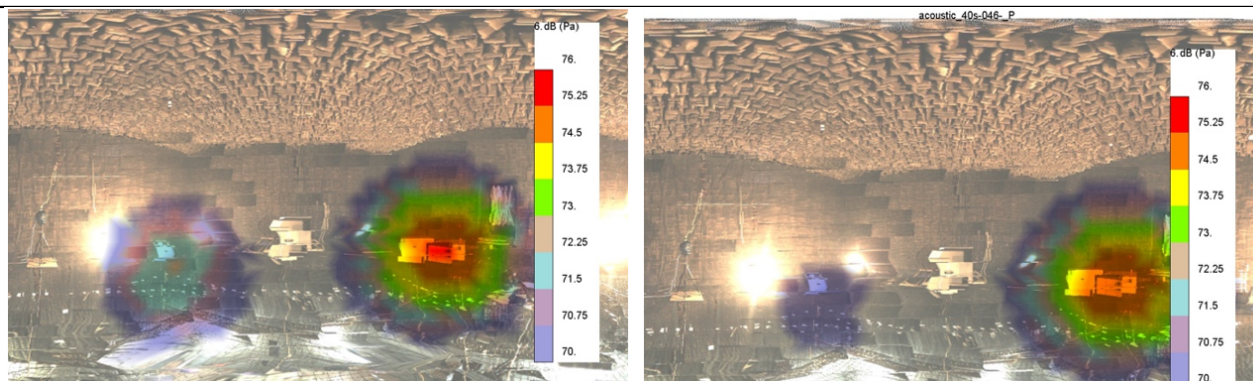
а) 54 микрофона (локализация при помощи алгоритма Spectrum)

б) 78 микрофонов (локализация при помощи алгоритма Spectrum/Open)

Рисунок 8 – Сравнение двух конфигураций сферической решетки для локализации источников шума в диапазоне частот 100–2000 Гц при работе И-2, И-4 на режиме тонального сигнала с частотой 200 Гц (расстояние до источников – 4 м, контраст карты – 4 дБ)

Сравнение двух конфигураций сферической решетки для локализации источников шума в диапазоне частот 800–1200 Гц при работе И-2, И-4 на режиме тонального сигнала с частотой 1000 Гц представлено на рисунке 9. Можно видеть качественное и количественное согласование карт локализации источников шума при использовании двух решеток.

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости применения решетки в расширенной конфигурации (78 микрофонов) для локализации источников шума в области низких частот 200-500 Гц. Результатам локализации с применением решетки в конфигурации 54 микрофона в области низких частот не стоит доверять. Если стоит задача локализации и ранжирования по интенсивности источников шума с частотой более 500 Гц, то для такой задачи можно использовать решетку в сокращенной конфигурации 54 микрофона.



а) 54 микрофона (локализация при помощи алгоритма Spectrum)

б) 78 микрофонов (локализация при помощи алгоритма Spectrum/Rigid)

Рисунок 9 – Сравнение двух конфигураций сферической решетки для локализации источников шума в диапазоне частот 800–1200 Гц при работе И-2, И-4 на режиме тонального сигнала с частотой 1000 Гц (расстояние до источников – 4 м, контраст карты – 6 дБ)

### Заключение

Представлены результаты предварительных валидационных испытаний сферической микрофонной решетки, выполненных в заглушенной камере НИИСФ РААСН на третьем этаже, который может рассматриваться как полностью заглушенное помещение.

Разработана методика валидационных испытаний, которая учитывает область применения исследуемой сферической решетки - для решения проблем внутренней акустики ЛА. Расстояния до источников (1, 2 и 4 м) и спектр генерируемого динамиками шума (тон с частотой 200, 500, 1000, 2000, 3000 и 4000 Гц и «белый» шум) выбраны с учетом размеров и акустической обстановки в салонах ЛА.

Экспериментально подтверждено, что расширенная конфигурация решетки (78 микрофонов) обеспечивает достоверную локализацию источников в области низких частот 200–500 Гц, тогда как в диапазоне выше 500 Гц допустимо использование базовой конфигурации (54 микрофона). Полученные карты локализации и оценки вклада источников в суммарное звуковое давление демонстрируют работоспособность решетки и готовность к ее практическому применению.

Анализ результатов выполненного исследования будет продолжен в части выбора рациональных алгоритмов для локализации и ранжирования по интенсивности источников шума в салоне ЛА. Данный вопрос является сложным и требует отдельного рассмотрения. Также будет оценена точность локализации источников шума относительно азимутального и радиального углов для различных конфигураций решетки и алгоритмов сферического бимформинга. Конечной целью является разработка методики для обработки и анализа натуральных виброакустических испытаний салонов ЛА с применением технологии сферического бимформинга.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность ООО «Динамикс» и д.ф.-м.н. Н.Г. Каневу (НИИСФ РААСН) за помощь в организации и проведении валидационных испытаний сферической микрофонной решетки МАИ в заглушенной камере НИИСФ РААСН. Работа выполнена в рамках проекта «Виброакустика» при реализации в МАИ программы «Приоритет-2030».

**Список использованных источников**

1. Мошков П.А. Проблемы проектирования гражданских самолетов с учетом требований по шуму в салоне // Вестник Московского авиационного института. – 2019. – Т. 26. – № 4. – С. 28-41. – DOI: 10.34759/vst-2019-4-28-41
2. Мошков П.А. О разработке первого российско-китайского стандарта в области авиастроения ГОСТ Р 70066-2022 «Авиационная техника. Требования к акустическому проектированию пассажирского салона и кабины экипажа самолетов» // Динамика и виброакустика. – 2024. – Т. 10. – № 2. – С. 27-34. – DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-2-27-34
3. ГОСТ Р 70066-2022. Авиационная техника. Требования к акустическому проектированию пассажирского салона и кабины экипажа самолетов. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 24 с.
4. Lee S.Y., Chang J., Lee S. Deep learning-enhanced single point sound source localization for spherical microphone array // INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. – 2021. – Vol. 263. – No. 4. – P. 2279-2283. – DOI: 10.3397/in-2021-2094
5. Moshkov P.A. Visualization of the sound field in the cabin of the Superjet 100 aircraft using a spherical microphone array // AIP Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3021. – No. 020003. – DOI: 10.1063/5.0193040
6. Padois T., St-Jacques Ju., Rouard K., Quaegebeur N., Grondin F., Berry A., Nélisse H., Sgard F., Doutres O. Acoustic imaging with spherical microphone array and kriging // JASA Express Letters. – 2023. – Vol. 3. – No. 4. – DOI: 10.1121/10.0017790
7. Navvab M., Meyer A., Heilmann G. Simulation, visualization and perception of sound in a real and virtual vehicle interior using beamforming // Proceedings of the Berlin Beamforming Conference. – 2016. – No. BeBeC-2016.
8. Rafaely B. Fundamentals of Spherical Array Processing. – Springer, 2019. – DOI: 10.1007/978-3-319-99561-8
9. Sz wajkowski A., Makuch T., Celniak W. An iterative approach to sound source localization based on spherical beamforming // Vibrations in Physical Systems. – 2023. – Vol. 34. – No. 2. – P. 2023216-1-2023216-12. – DOI: 10.21008/j.0860-6897.2023.2.16
10. Панов С.Н., Василенков Д.А., Коганицкий Ю.С., Лесных Т.О., Маслов Г.А., Токарев С.Ю., Митенков В.Б. Методология локализации источников шума в салоне транспортных средств с помощью микрофонных решеток // В сборнике: Акустика среды обитания. Материалы IX Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. – Москва, 2024. – С. 299-312.
11. Лесных Т.О., Митенков В.Б., Токарев С.Ю., Паньков Р.И., Василенков Д.А., Панов С.Н., Мухин С.А., Коганицкий Ю.С. Локализация источников шума в кабине экипажа и салоне гражданского самолета с помощью сферической микрофонной решетки // В книге: Тезисы докладов XX научно-технической конференции по аэроакустике. – 2023. – С. 145-146.
12. Мошков П.А., Василенков Д.А., Рубановский В.В., Строганов А.И. Локализация источников шума в гермокабине самолета RRJ-95 сферической микрофонной решеткой. Часть 1. Кабина экипажа // Вестник Московского авиационного института. – 2020. – Т. 27. – № 2. – С. 37-51. – DOI: 10.34759/vst-2020-2-37-51
13. Мошков П.А., Василенков Д.А., Рубановский В.В., Строганов А.И. Локализация источников шума в гермокабине самолета RRJ-95 сферической микрофонной решеткой. Часть 2. Пассажирский салон // Вестник Московского авиационного института. – 2020. – Т. 27. – № 3. – С. 60-72. – DOI: 10.34759/vst-2020-3-60-72
14. ГОСТ 20296-2014. Самолеты и вертолеты гражданской авиации.

Допустимые уровни шума в салонах и кабинах экипажа и методы измерения шума: межгосударственный стандарт. – М.: Стандартинформ, 2014. – 12 с.

15. Vance F., Young Ja. Design, development, and validation of acoustic insulation packages for business and VIP aircraft // INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 264. – No. 1. – P. 800-809. – DOI: 10.3397/nc-2022-813

16. Kletschkowski T. Some insights in active control of noise and vibration in aircraft cabins // Noise Theory and Practice. – 2020. – Т. 6. – № 4 (22). – С. 11-21.

17. Мошков П.А. Способ определения виброакустических характеристик пассажирского салона и кабины экипажа гражданского самолета и ранжирования по интенсивности основных источников шума по результатам летных испытаний // Патент на изобретение RU 2843599 С1. – 2025. – Заявка № 2024139781 от 26.12.2024. – Оpubл. 16.07.2025.

18. ГОСТ Р 57700.2-2017. Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2017. – 8 с.

19. 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. – DOI: 10.7868/S032079191701004X

20. Kopiev V.F., Makashov S.Y., Belyaev I.V., Palchikovskiy V.V., Bersenev Y.V., Korin I.A., Sorokin E.V., Khrantsov I.V., Kustov O.Y. Design and qualification of an anechoic facility in PNRPU // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 176. – P. 264-272. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.317

21. Yang B., Shi S., Yang D. Acoustic source localization using the open spherical microphone array in the low-frequency range // MATEC Web of Conferences. – 2019. – Vol. 283. – 04001. – DOI: 10.1051/mateconf/201928304001

22. Huang Q., Wang T. Acoustic source localization in mixed field using spherical microphone arrays // Eurasip Journal on Advances in Signal Processing. – 2014. – Vol. 2014. – No. 1. – P. 1-16. – DOI: 10.1186/1687-6180-2014-90

23. Демьянов М.А., Бычков О.П. Обобщение стандартного алгоритма "бимформинг" для идентификации акустических источников с помощью несинхронных измерений микрофонной решеткой // Акустический журнал. – 2022. – Т. 68. – № 2. – С. 162-172. – DOI: 10.31857/S0320791922020022

24. Lavrov V., Moshkov P., Popov V., Rubanovskiy V. Study of the sound field structure in the cockpit of a Superjet 100 // 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. – 2019. – AIAA Paper No. 2019-2726. – DOI: 10.2514/6.2019-2726

25. Moshkov P. Contributions of different sources to cabin noise of a Superjet 100 in cruise flight condition // AIAA AVIATION Forum 2021. – 2021. – AIAA Paper No. 2021-2272. – DOI: 10.2514/6.2021-2272

26. Moshkov P., Lavrov V. Analysis of Vibroacoustics of the Superjet 100 Aircraft // Proceedings of the 2022 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM). – 2022. – DOI: 10.1109/DVM55487.2022.9930929

27. Hu N., Buchholz H., Herr M., Spehr C., Haxter S. Contributions of Different Aeroacoustic Sources to Aircraft Cabin Noise // Proceedings of the 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. – 2013. – AIAA Paper No. 2013-2030. – DOI: 10.2514/6.2013-2030

28. Helffer E., Deille O., Briand J., Delverdier O. Fast and Light Acoustic Flight Test

Measurements in Aircraft // AIAA Flight Testing Conference. – 2014. – AIAA Paper No. 2014-2581. – DOI: 10.2514/6.2014-2581

29. Winter R., Norambuena M., Sinske Ju., Zettel S. High-resolution vibroacoustic characterization of DLR'S Falcon 2000LX ISTAR aircraft // CEAS Aeronautical Journal. – 2023. – Vol. 14. – No. 4. – P. 953-963. – DOI: 10.1007/s13272-023-00676-9

30. Бикмухаметов Ф.Р., Канев Н.Г. Безэховая звукомерная камера НИИ строительной физики: актуальные акустические характеристики // Noise Theory and Practice. – 2026. – Т. 12. – № 1 (44). – С. 7-17. – DOI: 10.56408/2412-8627.2026.1.12.001

## References

1. Moshkov P.A. Problems of civil aircraft design taking into account cabin noise requirements // Aerospace MAI Journal. – 2019. – Vol. 26. – N 4. – P. 28-41. – DOI: 10.34759/vst-2019-4-28-41

2. Moshkov P.A. On the development of the first Russian-Chinese aviation standard GOST R 70066-2022 "Aircraft engineering. Requirements for acoustic design of passenger cabin and crew cockpit of airplanes" // Dynamics and Vibroacoustics. – 2024. – Vol. 10. – N 2. – P. 27-34. – DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-2-27-34

3. GOST R 70066-2022. Aircraft engineering. Requirements for acoustic design of passenger cabin and crew cockpit of airplanes. – Moscow: Russian Institute of Standardization, 2022. – 24 p.

4. Lee S.Y., Chang J., Lee S. Deep learning-enhanced single point sound source localization for spherical microphone array // INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. – 2021. – Vol. 263. – N 4. – P. 2279-2283. – DOI: 10.3397/in-2021-2094

5. Moshkov P.A. Visualization of the sound field in the cabin of the Superjet 100 aircraft using a spherical microphone array // AIP Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3021. – N 020003. – DOI: 10.1063/5.0193040

6. Padois T., St-Jacques Ju., Rouard K., Quaegebeur N., Grondin F., Berry A., Nélisse H., Sgard F., Doutres O. Acoustic imaging with spherical microphone array and kriging // JASA Express Letters. – 2023. – Vol. 3. – N 4. – DOI: 10.1121/10.0017790

7. Navvab M., Meyer A., Heilmann G. Simulation, visualization and perception of sound in a real and virtual vehicle interior using beamforming // Proceedings of the Berlin Beamforming Conference. – 2016. – N BeBeC-2016.

8. Rafaely B. Fundamentals of Spherical Array Processing. – Singapore: Springer, 2019. – DOI: 10.1007/978-3-319-99561-8

9. Szwajcowski A., Makuch T., Celniak W. An iterative approach to sound source localization based on spherical beamforming // Vibrations in Physical Systems. – 2023. – Vol. 34. – N 2. – P. 2023216-1-2023216-12. – DOI: 10.21008/j.0860-6897.2023.2.16

10. Panov S.N., Vasilenkov D.A., Koganitsky Yu.S., Lesnykh T.O., Maslov G.A., Tokarev S.Yu., Mitenkov V.B. Methodology for noise source localization in vehicle interiors using microphone arrays // In: Acoustics of the Living Environment. Proceedings of the IX All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists. – Moscow, 2024. – P. 299-312.

11. Lesnykh T.O., Mitenkov V.B., Tokarev S.Yu., Pankov R.I., Vasilenkov D.A., Panov S.N., Mukhin S.A., Koganitsky Yu.S. Noise source localization in the cockpit and cabin of a civil aircraft using a spherical microphone array // In: Abstracts of the XX Scientific and Technical Conference on Aeroacoustics. – 2023. – P. 145-146.

12. Moshkov P.A., Vasilenkov D.A., Rubanovskiy V.V., Stroganov A.I. Noise source localization in the RRJ-95 aircraft fuselage using a spherical microphone array. Part 1. Crew

cockpit // Aerospace MAI Journal. – 2020. – Vol. 27. – N 2. – P. 37-51. – DOI: 10.34759/vst-2020-2-37-51

13. Moshkov P.A., Vasilenkov D.A., Rubanovskiy V.V., Stroganov A.I. Noise source localization in the RRJ-95 aircraft fuselage using a spherical microphone array. Part 2. Passenger cabin // Aerospace MAI Journal. – 2020. – Vol. 27. – N 3. – P. 60-72. – DOI: 10.34759/vst-2020-3-60-72

14. GOST 20296-2014. Civil aviation aircraft and helicopters. Permissible noise levels in cabins and crew cockpits and noise measurement methods. – Moscow: Standartinform, 2014. – 12 p.

15. Vance F., Young Ja. Design, development, and validation of acoustic insulation packages for business and VIP aircraft // INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 264. – N 1. – P. 800-809. – DOI: 10.3397/nc-2022-813

16. Kletschkowski T. Some insights in active control of noise and vibration in aircraft cabins // Noise Theory and Practice. – 2020. – Vol. 6. – N 4 (22). – P. 11-21.

17. Moshkov P.A. Method for determining vibroacoustic characteristics of a passenger cabin and crew cockpit of a civil aircraft and ranking the main noise sources by intensity based on flight test results // RU patent N 2843599 C1. – 2025. – Application N 2024139781 dated 26.12.2024. – Published 16.07.2025.

18. GOST R 57700.2-2017. Numerical modeling for the development and commissioning of high-tech industrial products. Software certification. General provisions. – Moscow: Standartinform, 2017. – 8 p.

19. Kopiev V.F., Palchikovskiy V.V., Belyaev I.V., Bersenev Yu.V., Makashov S.Yu., Khramtsov I.V., Korin I.A., Sorokin E.V., Kustov O.Yu. Construction of an anechoic chamber for aeroacoustic experiments and examination of its acoustic parameters // Acoustical Physics. – 2017. – Vol. 63. – N 1. – P. 113-124. – DOI: 10.1134/S1063771017010043

20. Kopiev V.F., Makashov S.Y., Belyaev I.V., Palchikovskiy V.V., Bersenev Y.V., Korin I.A., Sorokin E.V., Khramtsov I.V., Kustov O.Y. Design and qualification of an anechoic facility in PNRPU // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 176. – P. 264-272. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.317

21. Yang B., Shi S., Yang D. Acoustic source localization using the open spherical microphone array in the low-frequency range // MATEC Web of Conferences. – 2019. – Vol. 283. – 04001. – DOI: 10.1051/mateconf/201928304001

22. Huang Q., Wang T. Acoustic source localization in mixed field using spherical microphone arrays // Eurasip Journal on Advances in Signal Processing. – 2014. – Vol. 2014. – N 1. – P. 1-16. – DOI: 10.1186/1687-6180-2014-90

23. Demyanov M.A., Bychkov O.P. Generalization of the standard beamforming algorithm for identifying acoustic sources using asynchronous microphone array measurements // Acoustical Physics. – 2022. – Vol. 68. – N 2. – P. 138-146. – DOI: 10.1134/S1063771022020026

24. Lavrov V., Moshkov P., Popov V., Rubanovskiy V. Study of the sound field structure in the cockpit of a Superjet 100 // 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. – 2019. – AIAA Paper N 2019-2726. – DOI: 10.2514/6.2019-2726

25. Moshkov P. Contributions of different sources to cabin noise of a Superjet 100 in cruise flight condition // AIAA AVIATION Forum 2021. – 2021. – AIAA Paper N 2021-2272. – DOI: 10.2514/6.2021-2272

26. Moshkov P., Lavrov V. Analysis of Vibroacoustics of the Superjet 100 Aircraft // Proceedings of the 2022 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM). – 2022. – DOI: 10.1109/DVM55487.2022.9930929

27. Hu N., Buchholz H., Herr M., Spehr C., Haxter S. Contributions of Different

Aeroacoustic Sources to Aircraft Cabin Noise // Proceedings of the 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. – 2013. – AIAA Paper N 2013-2030. – DOI: 10.2514/6.2013-2030

28. Helffer E., Deille O., Briand J., Delverdier O. Fast and Light Acoustic Flight Test Measurements in Aircraft // AIAA Flight Testing Conference. – 2014. – AIAA Paper N 2014-2581. – DOI: 10.2514/6.2014-2581

29. Winter R., Norambuena M., Sinske Ju., Zettel S. High-resolution vibroacoustic characterization of DLR'S Falcon 2000LX ISTAR aircraft // CEAS Aeronautical Journal. – 2023. – Vol. 14. – N 4. – P. 953-963. – DOI: 10.1007/s13272-023-00676-9

30. Bismukhametov F.R., Kanev N.G. Anechoic sound-measuring chamber of the Research Institute of Building Physics: current acoustic characteristics // Noise Theory and Practice. – 2026. – Vol. 12. – N 1 (44). – P. 7-17. – DOI: 10.56408/2412-8627.2026.1.12.001

УДК: 691.58

OECD: 2.05 QH

DOI: 10.56408/2412-8627.2026.12.2.003

## Слоистые вибропоглощающие материалы

Черкасов В.Д.<sup>1</sup>, Тюрязкин М.А.<sup>2\*</sup><sup>1</sup>Д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Прикладная механика», <sup>2</sup>Аспирант<sup>1,2</sup>ФГБУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, РФ

### Аннотация

Для борьбы с вибрацией используют вибропоглощающие покрытия и конструкционные вибропоглощающие материалы. К конструкционным вибропоглощающим материалам относят слоистые вибропоглощающие материалы. Они обладают рядом преимуществ: высокие внутренние потери и возможность изготовления из них различных конструкций. Важным элементом для таких конструкций является промежуточный слой. В связи с этим был разработан вязкоупругий материал с высокими потерями ( $\eta = 0,8$ ), имеющий адгезионную прочность к стали 0,19 МПа, к дюралюминию 0,2 МПа, температурный диапазон работы материала  $-40 \div 80$  °С. Целью работы является разработка слоистого вибропоглощающего материала с применением нового самоклеящегося вязкоупругого материала и исследование его вибропоглощающих свойств. Задачами исследований являлись установление соотношения толщин слоев и исследование свойств. Показано, что при амплитуде колебаний 1 мм оптимальное соотношение толщин слоев  $h_2/h_1 = 2$ , а при амплитуде колебаний 2 мм оптимальное соотношение слоев  $h_2/h_1 = 4$ . Коэффициент потерь этих материалов соответственно равен 0,41 и 0,95.

**Ключевые слова:** наружный слой, промежуточный слой, слоистый материал, конструкция, вибропоглощающие свойства

## *Layered vibration-absorbing materials*

Cherkasov V.D.<sup>1</sup>, Tyuryakin M.A.<sup>2\*</sup><sup>1</sup> D.Sc., Professor, Head of the Department of Applied Mechanics, <sup>2</sup> Ph.D. student<sup>1,2</sup> Federal State Budgetary Institution of Higher Education 'National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev', Saransk, Russia

### Abstract

Vibration-absorbing coatings and structural vibration-absorbing materials are used to combat vibration. Structural vibration-absorbing materials include layered vibration-absorbing materials. They offer several advantages, including high internal losses and the ability to be fabricated into various structures. An important element in such structures is the intermediate layer. Therefore, a high-loss viscoelastic material ( $\eta = 0.8$ ) was developed. It has an adhesive strength of 0.19 MPa to steel and 0.2 MPa to duralumin, and a temperature range of 40 to 80 °C. The aim of this study was to develop a layered vibration-absorbing material using a new self-adhesive viscoelastic material and to investigate its vibration-absorbing properties. The objectives of the study were to determine the ratio of layer thicknesses and characterize the properties. It is shown that with an oscillation amplitude of 1 mm, the optimal ratio of layer thicknesses is  $h_2/h_1 = 2$ , and with an oscillation

---

\*E-mail: max5554284@ya.ru (Тюрязкин М.А.)

amplitude of 2 mm, the optimal ratio of layers is  $h_2/h_1 = 4$ . The loss coefficient of these materials is equal to 0.41 and 0.95, respectively.

**Keywords:** outer layer, intermediate layer, laminated material, construction, vibration-absorbing properties

## Введение

Большой интерес представляют трехслойные вибродемпфирующие материалы [1]-[8]. Такие материалы находят применение в различных конструкциях [3].

Важным элементом таких материалов является промежуточный слой [2], [3], [9]. В существующих слоистых вибропоглощающих материалах промежуточный слой изготавливают из битумной и поливинилацетатной мастик. Они имеют низкую адгезию к металлам и другим материалам [10]. Для устранения этого недостатка в них добавляют адгезионные добавки [2]. Однако это не решает указанную проблему. Существуют слоистые вибропоглощающие материалы с промежуточным слоем из стеклоткани и термопластика. Они крепятся к стальным листам с помощью эпоксидного клея. Это приводит к увеличению срока изготовления материала. Кроме этого, материалы с такими прослойками имеют низкий коэффициент потерь. В связи с этим разработан самоклеящийся вязкоупругий материал с адгезией к стали 0,19 МПа, к дюралюминию 0,2 МПа и имеющий коэффициент потерь 0,8. С применением этого материала сборка слоистых вибропоглощающих материалов производится значительно быстрее без использования различных приспособлений. С использованием этого вязкоупругого материала разработаны слоистые вибропоглощающие материалы.

В статье приведены результаты исследования вибропоглощающих свойств слоистых материалов.

## 1 Материалы и методы

Конструкция слоистого материала представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Слоистый материал: 1 – металлическая пластина толщиной 1 мм; 2 – промежуточный слой толщиной (1, 2, 3, 4, 5 мм)

Испытания проводились на образцах размером 250x20 мм. Толщина вязкоупругого слоя принималась 1, 2, 3, 4 и 5 мм. Образцы слоистого материала изготавливались следующим образом. На металлическую пластину укладывали ленту из вязкоупругого материала нужной толщины. Затем на вязкоупругий материал сверху укладывали вторую металлическую пластину. После этого материал прокатывали валиком для обеспечения хорошего сцепления металла с вязкоупругим слоем.

Коэффициент потерь определяли по методике, приведенной в [11]-[12].

Амплитуда колебаний корректировалась за счет изменений зазора между пластиной образца и датчиками (возбудителем колебаний и приемником сигнала) [11]-[13].

В качестве экспериментального оборудования использовалась резонансная установка с электромагнитными преобразователями для возбуждения и регулировки

частоты колебаний. Образец устанавливался на стенд в горизонтальном положении. Погрешность измерений составляла  $\pm 0,1$  Гц. Испытания образцов проводились при температуре  $20^{\circ}\text{C}$ , влажность в помещении составляла 60 – 70 %.

## 2 Результаты и обсуждения

Конструкция слоистого материала характеризуется соотношением слоев. Соотношение толщин слоев определяется условиями работы материала. Показано, что при амплитуде колебаний 1 мм –  $h_2/h_1 = 2$ , а при амплитуде колебаний 2 мм –  $h_2/h_1 = 4$ , результаты приведены на рисунках 2 и 3.



Рисунок 2 – Коэффициент потерь слоистого материала (амплитуда колебаний 1 мм)

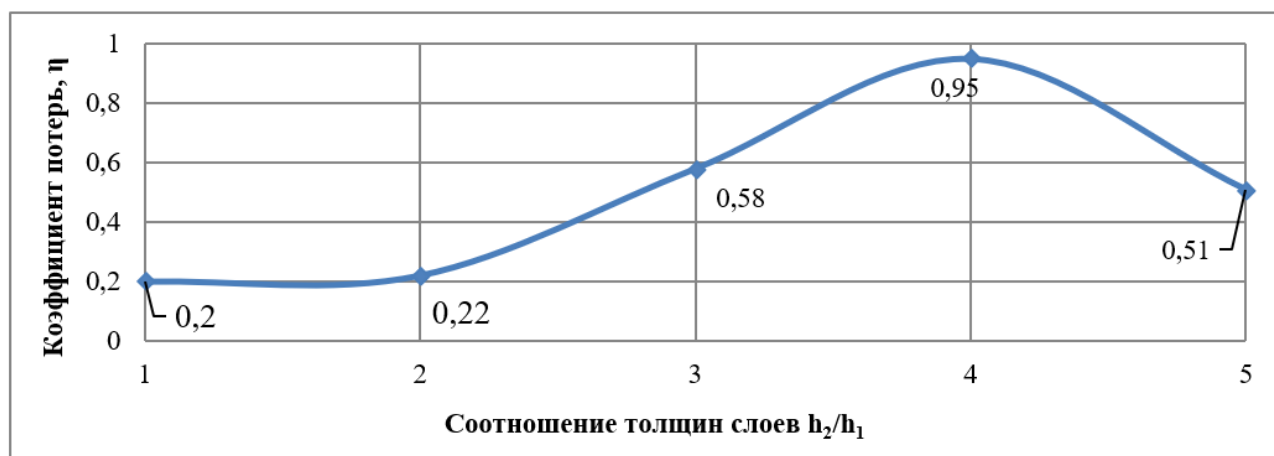


Рисунок 3 – Коэффициент потерь слоистого материала (амплитуда колебаний 2 мм)

Показано, что слоистые материалы более эффективно работают при больших вибрациях. Это вызвано тем, что возрастают сдвиговые деформации в промежуточном слое.

Проведены исследования влияния частоты колебаний на вибропоглощающие свойства слоистых материалов. Результаты представлены на рисунках 4 и 5.

Слоистые вибропоглощающие материалы с  $h_2/h_1 = 2$  (амплитуда колебаний 1 мм) эффективно работают на частоте 160,7 Гц, а слоистые материалы с  $h_2/h_1 = 4$  (амплитуда колебаний 2 мм) на частоте 430,6 Гц.

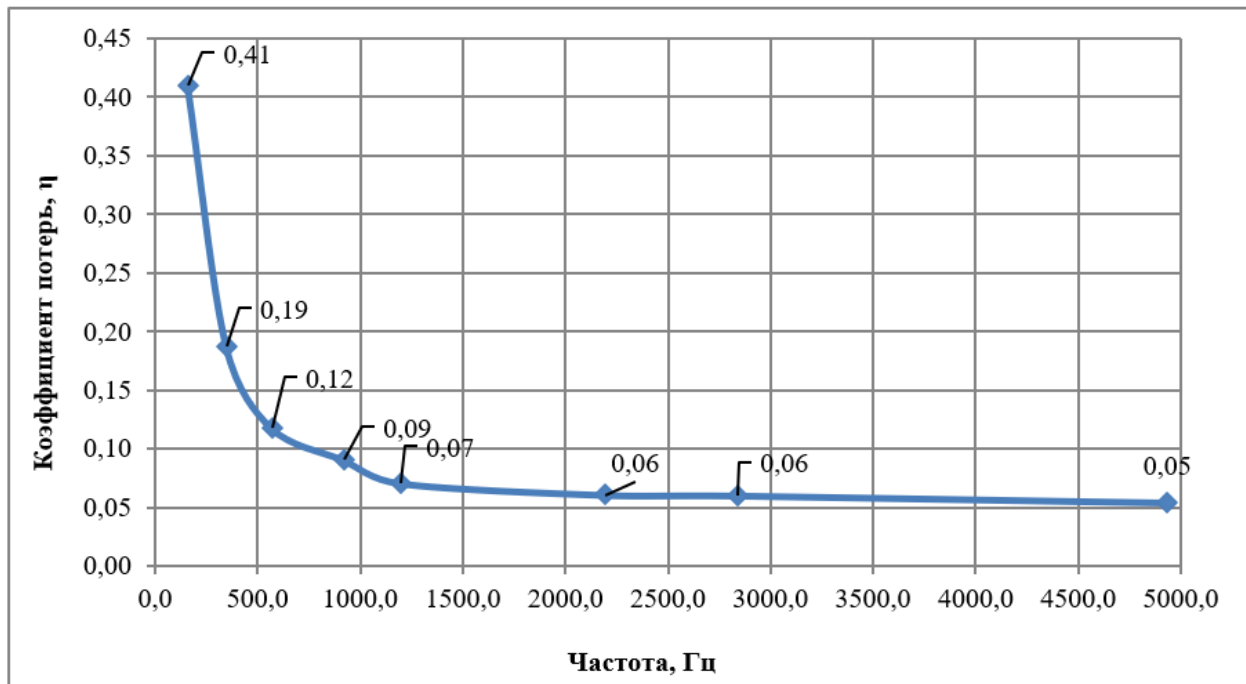


Рисунок 4 – Коэффициент потерь слоистого материала на различных частотах (амплитуда колебаний 1 мм,  $h_2/h_1 = 2$ )

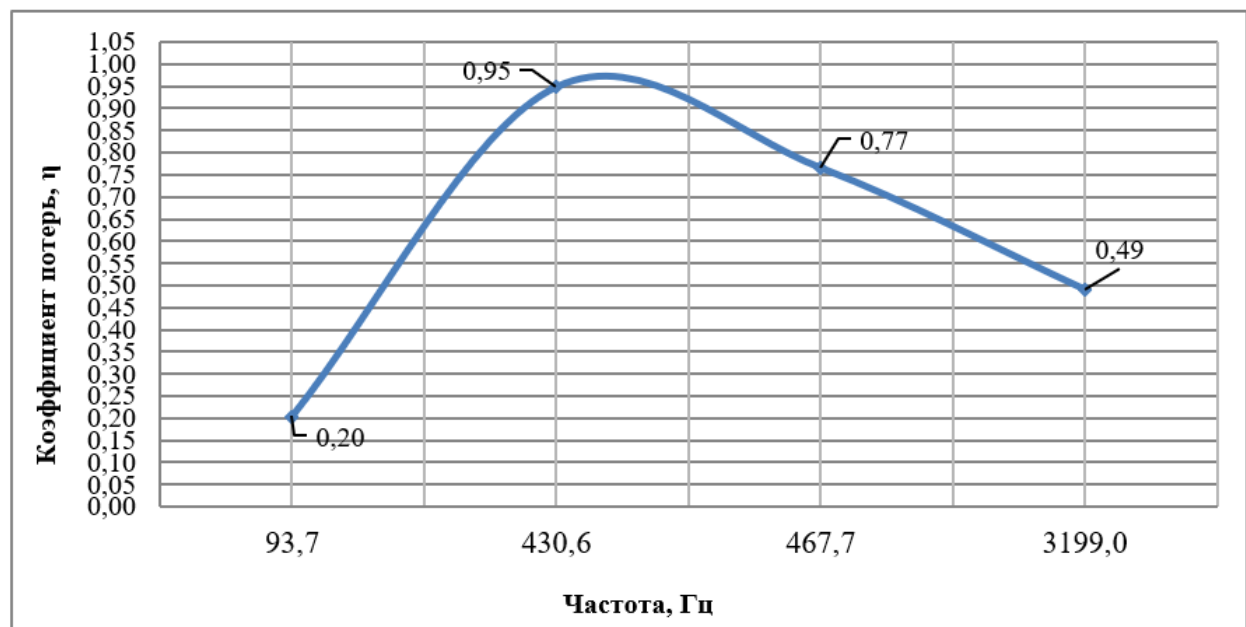


Рисунок 5 – Коэффициент потерь слоистого материала на различных частотах (амплитуда колебаний 2 мм,  $h_2/h_1 = 4$ )

### Заклучение

Разработаны новые слоистые вибропоглощающие материалы, которые, благодаря самоклеящемуся вязкоупругому слою, собираются без применения специального оборудования. Установлено, что при амплитуде колебаний 1 мм оптимальное соотношение толщин слоев  $h_2/h_1 = 2$  (коэффициент потерь  $\eta = 0,41$ , на частоте 160,7 Гц) и при амплитуде колебаний 2 мм оптимальное соотношение слоев  $h_2/h_1 = 4$  (коэффициент потерь  $\eta = 0,95$ , на частоте 430,6 Гц).

Рекомендуется использовать данные материалы в конструкциях транспортных средств, промышленного оборудования, а также в звукоизолирующих корпусах.

В перспективе предполагается создание слоистых материалов с наружными слоями из полимерных и других материалов.

### Список использованных источников

1. В.А. Гуляев, Н.И. Наумкина, М.И. Палей Конструкционные слоеные материалы с высокими потерями – М.: Наука, 1973. – С. 212–218.
2. В.Д. Черкасов, А.С. Смиркин, А.В. Бородин. Вибропоглощающие свойства слоеных материалов. – 2020. – №1 (42). – С. 45–51.
3. Khorasani, R. & Kordkheili, S. & Parviz, Hadi. (2021). An analytical and experimental study on dampening material effects on the dynamic behavior of free-free aluminum sheets. *Engineering Solid Mechanics*. 9. 111-122. 10.5267/j.esm.2021.1.002.
4. Huang, Zhi Cheng & Pan, Jinbo & Yang, Ziheng & Wang, Xingguo & Chu, Fulei. ransverse Vibration of Viscoelastic Sandwich Structures: Finite Element Modeling and Experimental Study. *Materials*. 14. 7751., 2021. DOI: 10.3390/ma14247751.
5. Li, Hao & Hu, Yabin & Chen, Jianlin & Shou, Dahua & li, Bing. (2022). Lightweight meta-lattice sandwich panels for remarkable vibration mitigation: Analytical prediction, numerical analysis and experimental validations. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 163. 107218. 10.1016/j.compositesa.2022.107218.
6. Тонкие пластинчатые сэндвич-конструкции с большим вибропоглощением / А. И. Сятковский, В. Ю. Кирпичников, В. Ю. Смольников, П. А. Упоров // *Noise Theory and Practice*. – 2025. – Т. 11, № 4(43). – С. 38-47. – EDN CFBHGE.
7. Кирпичников, В. Ю. Об эффективности вибропоглощающих покрытий / В. Ю. Кирпичников, И. О. Малинин, А. Ю. Олейников // *Noise Theory and Practice*. – 2024. – Т. 10, № 2(37). – С. 29-43. – EDN KMVIWP.
8. Сятковский, А. И. Влияние вязкоупругого полимерного слоя на эффективность диссипации энергии в трехслойных композитах металл-полимер-металл / А. И. Сятковский, И. Д. Симонов-Емельянов, В. Ю. Кирпичников // *Пластические массы*. – 2025. – № 3. – С. 15-17. – DOI 10.35164/0554-2901-2025-03-15-17. – EDN LSCJHD.
9. RU патент N 2 775 548 C2, от 15.09.2020 г. полиуретановый эластомерный материал для вибропоглощающих палубных покрытий / Н.М. Лисенков, П.А. Кузьменко, Ю.Н. Попов, А.В. Крылов, Ю.В. Евстратова; заявитель, патентобладатель ФГУП «Крыловский государственный научный центр». - 7 с.
10. Сагомонова, В. А. Влияние состава вибропоглощающих материалов на коэффициент механических потерь / В. А. Сагомонова, В. И. Кислякова, В. А. Большаков // *Функциональные материалы для снижения авиационного шума в салоне и на местности: Сборник докладов конференции, Москва, 12 марта 2015 года / ФГУП ВИАМ. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, 2015. – С. 6. – EDN UURUOX.*
11. Авдонин, В. В. Вибропоглощающие композиционные покрытия: специальность 05.23.05 "Строительные материалы и изделия": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Авдонин Валерий Викторович, 2015. – 123 с. – EDN MTCAA1.
12. Черкасов, В. Д. Исследование влияния наполнителей и модификаторов на демпфирующие свойства материала на основе ПВА / В. Д. Черкасов, М. В. Тюрин, В. В. Авдонин // *Инженерный вестник Дона*. – 2019. – № 8(59). – С. 36. – EDN ZMWROG.

13. Масеев, Д. В. Вибропоглощающие строительные композиты / Д. В. Масеев // Оригинальные исследования. – 2025. – Т. 15, № 2. – С. 108-117. – EDN OKSHCB.

## References

1. V. A. Gulyaev, N. I. Naumkina, M. I. Paley. Structural Layered Materials with High Losses. Moscow: Nauka, 1973. pp. 212–218.
2. V. D. Cherkasov, A. S. Smirkin, A. V. Borodin. Vibration-Absorbing Properties of Layered Materials. No. 1 (42) (2020). pp. 45–51.
3. Khorasani, R. & Kordkheili, S. & Parviz, Hadi. (2021). An analytical and experimental study on dampening material effects on the dynamic behavior of free-free aluminum sheets. *Engineering Solid Mechanics*. 9. 111-122. 10.5267/j.esm.2021.1.002.
4. Huang, Zhi Cheng & Pan, Jinbo & Yang, Ziheng & Wang, Xingguo & Chu, Fulei. Transverse Vibration of Viscoelastic Sandwich Structures: Finite Element Modeling and Experimental Study. *Materials*. 14, 7751, 2021. DOI: 10.3390/ma14247751.
5. Li, Hao & Hu, Yabin & Chen, Jianlin & Shou, Dahua & li, Bing. (2022). Lightweight meta-lattice sandwich panels for remarkable vibration mitigation: Analytical prediction, numerical analysis and experimental validations. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 163. 107218. 10.1016/j.compositesa.2022.107218.
6. Thin plate sandwich structures with high vibration absorption / A. I. Syatkovsky, V. Yu. Kirpichnikov, V. Yu. Smolnikov, P. A. Uporov // *Noise Theory and Practice*. - 2025. - Vol. 11, No. 4 (43). - P. 38-47. - EDN CFBHGE.
7. Kirpichnikov, V. Yu. On the efficiency of vibration-absorbing coatings / V. Yu. Kirpichnikov, I. O. Malinin, A. Yu. Oleynikov // *Noise Theory and Practice*. - 2024. - Vol. 10, No. 2 (37). - P. 29-43. - EDN KMVIWP.
8. Syatkovsky, A. I. Influence of viscoelastic polymer layer on the efficiency of energy dissipation in three-layer metal-polymer-metal composites / A. I. Syatkovsky, I. D. Simonov-Emelyanov, V. Yu. Kirpichnikov // *Plastics*. - 2025. - No. 3. - P. 15-17. - DOI 10.35164/0554-2901-2025-03-15-17. - EDN LSCJHD.
9. RU Patent No. 2 775 548 C2, dated September 15, 2020. Polyurethane elastomer material for vibration-absorbing deck coverings / N.M. Lisenkov, P.A. Kuzmenko, Yu.N. Popov, A.V. Krylov, Yu.V. Evstratova; applicant, patent holder FSUE Krylov State Research Center. - 7 p.
10. V.A. Samogonova, V.I. Kislyakova, T.Yu. Tyumeneva, V.A. Bolshakova. Effect of the composition of vibration-absorbing materials on the mechanical loss coefficient. *Proceedings of VIAM*. - 2015. - No. 10-10.
11. Avdonin, V. V. Vibration-Absorbing Composite Coatings: Specialty 05.23.05 "Building Materials and Products": Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences / Avdonin, Valery Viktorovich, 2015. – 123 p. – EDN MTCAAI.
12. Cherkasov, V. D. Study of the Influence of Fillers and Modifiers on the Damping Properties of PVA-Based Material / V. D. Cherkasov, M. V. Tyurin, V. V. Avdonin // *Engineering Bulletin of the Don*. – 2019. – No. 8 (59). – P. 36. – EDN ZMWROG.
13. Maseev, D. V. Vibration-absorbing building composites / D. V. Maseev // *Original research*. - 2025. - Vol. 15, No. 2. - P. 108-117. - EDN OKSHCB.

УДК: 534.6

OECD: 01.03.АА

DOI: 10.56408/2412-8627.2026.12.2.004

## Обзор методов оценки и снижения шума строительных площадок

Буторина М.В.<sup>1\*</sup>, Донцов С.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Д.т.н., доцент, профессор кафедры «Техносферная безопасность и вычислительная механика»

<sup>2</sup>К.т.н., доцент, доцент кафедры «Инженерная защита окружающей среды»

<sup>1</sup>Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»

им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), г. Санкт-Петербург, РФ

### Аннотация

Статья посвящена комплексной проблеме акустического воздействия строительных площадок на окружающую среду и здоровье населения в Российской Федерации. Рассматриваются физиологические последствия длительного интенсивного шума, включая нейросенсорную тугоухость, сердечно-сосудистые и когнитивные нарушения. Анализируется современное состояние нормативно-правовой базы России в области контроля строительного шума, выявляются ключевые недостатки: отсутствие систематического мониторинга, нормативный вакуум и несовершенство существующих методов расчёта распространения шума. Приводятся экспериментальные данные, демонстрирующие высокую погрешность традиционных акустических моделей (до 14 дБА) для линейных источников шума. Представлены результаты классификации строительной техники и площадок по уровням шумности, а также рекомендации по шумозащитным мероприятиям. Обозначен перспективный подход к моделированию, учитывающий последовательный переход типа звукового поля, и представлен проект, поддержанный Российским научным фондом, по созданию новой методики оценки шума строительных площадок с внедрением в программное обеспечение «Эколог-Шум».

**Ключевые слова:** строительная площадка, акустический мониторинг, строительная техника, распространение шума, методика расчёта, база данных шумовых характеристик

## *Review of Methods for Assessment and Reduction of Construction Sites' Noise*

*Butorina M.V.<sup>1\*</sup>, Dontsov S.A.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*D.Sc., Associate Professor, Professor of the Department of Technosphere Safety and Applied Mechanics*

<sup>2</sup>*Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Engineering environmental protection*

<sup>1</sup>*Baltic State Technical University 'VOENMEH' after D.F. Ustinov, St. Petersburg, Russia*

<sup>2</sup>*St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), St. Petersburg, Russia*

---

\*E-mail: marina\_butorina@inbox.ru (Буторина М.В.)

## Abstract

The article addresses the complex problem of acoustic impact from construction sites on the environment and public health in the Russian Federation. It examines the physiological consequences of prolonged intense noise, including sensorineural hearing loss, cardiovascular and cognitive disorders. The current state of the Russian regulatory framework in the field of construction noise control is analyzed, and key shortcomings are identified: the lack of systematic monitoring, regulatory gaps, and the imperfection of existing methods for calculating noise propagation. Experimental data demonstrating the high inaccuracy of traditional acoustic models (up to 14 dBA) for linear noise sources are presented. The results of classifying construction equipment and sites by noise levels are presented, along with recommendations for noise protection measures. A promising modeling approach that accounts for the sequential transition of the sound field type is outlined, and a project supported by the Russian Science Foundation to develop a new methodology for assessing construction site noise and implementing it into the "Ecology-Noise" software is introduced.

**Keywords:** construction site, acoustic monitoring, construction equipment, noise propagation, calculation method, noise emission database

## Введение

Воздействие продолжительного интенсивного шума вызывает необратимые изменения в организме человека, включая деструкцию волосковых клеток внутреннего уха с развитием нейросенсорной тугоухости и тиннитуса. Шум также выступает в роли мощного неспецифического стрессора, последствиями такого воздействия являются дисрегуляция сердечно-сосудистой системы (артериальная гипертензия, повышенный риск инфарктов и инсультов), когнитивные нарушения, расстройства сна, снижение иммунитета и метаболические изменения.

В России шумовое загрязнение доминирует среди физических факторов среды: под контролем Роспотребнадзора находится более 1,2 млн источников, однако лишь 1,8% объектов проверяются на шум, при этом 10,6% из них не соответствуют нормативам. Особенно неблагоприятна ситуация в жилых зонах (17,9% замеров выше нормы), откуда поступает почти 75% жалоб на физические факторы, при этом доля профилактических мероприятий не достигает 1% [1].

Интенсивный шум, являющийся неотъемлемым спутником строительства, закономерно вызывает многочисленные жалобы населения и представляет угрозу для здоровья и качества жизни горожан. Техника, такая как бульдозеры, экскаваторы и виброкатки, генерирует эквивалентные уровни звука в диапазоне 75-100 дБА, что существенно превышает допустимые санитарные нормы (55 дБА в дневное время). В результате зона акустического дискомфорта распространяется не только на прилегающие территории, но и на жилые дома, удаленные на сотни метров. Важной особенностью строительного шума является его высокая субъективная раздражительность (мешающая способность), которая часто превосходит воздействие от постоянно присутствующих в жизни человека источников, таких как транспортный поток.

Следует отметить, что в России постоянный акустический мониторинг не ведется. Измерения проводятся лишь при поступлении жалоб от населения или в рамках плановых проверок. В случае превышения ПДУ выдается предписание об устранении нарушений, может быть наложен штраф, а в крайних случаях работы приостанавливаются до решения проблемы.

Статистика мониторинга по Москве показывает, что основными источниками шума являются строительные площадки и дорожно-ремонтные работы. При этом почти половина стройплощадок нарушает нормы шума, что повлекло запрет на проведение строительных работ в ночное время [2].

Надзор за шумом строительства в Санкт-Петербурге с 2007 года осуществляет Госстройнадзор. В 2021 году Госстройнадзор провел 927 проверок, выявив нарушения по уровню шума, и возбудил 427 административных дел [3].

В настоящее время в сфере регулирования строительного шума в России наблюдается определенный нормативный вакуум и ряд технических ограничений. В отличие от развитой международной практики, в РФ отсутствует специализированное нормативное регулирование шума строительных площадок. Потенциал снижения шума лишь за счет модернизации парка техники ограничен, поскольку большинство машин по своей конструкции изначально являются источниками шума высокого уровня, который достаточно сложно и дорого снизить мероприятиями, применяемыми в источнике. Достижение нормативных показателей шума с помощью локальных мер, применяемых уже в процессе строительства, является неэффективным. Следовательно, комплексная оценка шумового воздействия и проектирование рациональных защитных мероприятий должны стать обязательным элементом проектной документации на стадии ее разработки. Однако данному процессу весьма препятствует несовершенство существующих методов расчета. Несмотря на то, что оценка шума является необходимым элементом проектов ОВОС, МООС и ПМООС, утвержденная на государственном уровне методика акустического расчета строительных площадок отсутствует.

Проведенные на базе БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова исследования по оценке шума дорожного строительства подтвердили фундаментальную ошибку существующих моделей. Установлено, что затухание звука от отдельной строительной машины достигает 5 дБА на удвоение расстояния (что близко к сферическому расхождению), а от протяженной площадки – до 4 дБА на удвоение расстояния (что более характерно для линейного источника). Применение в расчетах модели сферического затухания для линейного объекта приводит к ошибкам, достигающим 14 дБА на предельных расстояниях. Даже использование модели линейного источника снижает ошибку лишь до 7-10 дБА, что все равно многократно превышает допустимую точность инженерных расчетов ( $\pm 3$  дБА) [4].

Данный факт доказывает необходимость учета последовательного перехода типа источника от плоского через линейный к точечному, а также наличия переходных областей (квазиплоского и квазицилиндрического полей), которые действующими методиками не описываются. Совокупность указанных факторов приводит к систематическому и значительному расхождению между расчетными и экспериментальными данными. Существует насущная потребность в разработке принципиально нового подхода к акустическому моделированию строительных площадок. Такой подход позволит избежать критических ошибок при проектировании шумозащитных мероприятий, предотвратить превышение ПДУ в жилых зонах и минимизировать социальную напряженность.

В 2026 г. Российский научный фонд поддержал проект ученых БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, направленный на разработку новой современной методики оценки шума строительных площадок. В результате реализации проекта будет создана качественно новая высокотехнологическая продукция в виде программного обеспечения, которое позволит проектным организациям и контролирующим органам производить оценку шума строительства на более высоком уровне даже при отсутствии достаточного опыта в данном вопросе, что снизит ошибки процесса проектирования,

затраты застройщика на шумозащиту и обеспечит соблюдение ПДУ в жилой застройке. Исследование выполняется за счет гранта Российского научного фонда № 26-97-20003, <https://rscf.ru/project/26-97-20003>.

## 1 Методы оценки шумовой характеристики строительной площадки

В России действует ГОСТ 31325-2006 [5], который позволяет оценить уровни звуковой мощности каждой отдельной единицы строительной техники. Согласно ГОСТ определяется уровень шума источников строительного оборудования, который зависит от способа его крепления, режима работы и вспомогательного оборудования. Вспомогательные устройства, не являющиеся частью машины, должны размещаться вне измерительного пространства или акустически изолироваться. Во время испытаний источник работает в штатном режиме (при необходимости – на холостом ходу и под нагрузкой), причем учитывается шум от контактирующих инструментов, материалов и поверхностей.

Измерения проводятся на гипотетической измерительной поверхности (полусферической или в форме прямоугольного параллелепипеда), охватывающей источник. Для полусферы радиус выбирается не менее удвоенного наибольшего размера источника (из ряда 4, 6, 8, 10 м). Средний уровень звука вычисляется по энергетическому усреднению с коррекцией на фон и акустические условия, после чего рассчитывается скорректированный уровень звуковой мощности путем сложения полученного уровня с десятичным логарифмом площади измерительной поверхности. Полученное значение должно быть внесено в технический паспорт строительной техники.

Согласно результатам измерений, проведенных при помощи ГОСТ 31325-2006 в составе работы [4], уровни звука строительных машин варьируются в диапазоне от 63 до 99 дБА. Результаты анализа выборки из 50 объектов представлены на рисунке 1. Наименьшие уровни шума (до 75 дБА) характерны для машин без шумовиброактивных рабочих органов, выпускаемых зарубежными производителями.

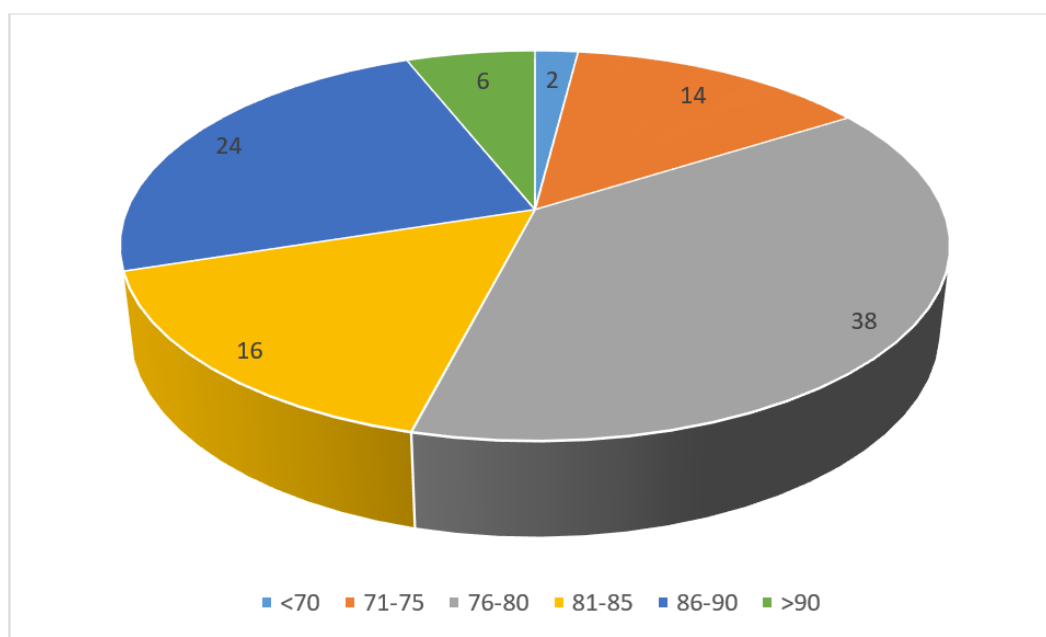


Рисунок 1 – Распределение строительной техники по уровням звука, дБА

Проведенное в составе работы [6] исследование позволило произвести классификацию наиболее распространенных видов строительной техники по уровням

шума, выделив шесть классов:

- первый класс – умеренно шумные машины с эквивалентным уровнем звука до 75 дБА включительно;
- второй класс – допустимо шумные, от 76 до 80 дБА;
- третий класс – шумные, от 81 до 85 дБА;
- четвёртый класс – повышенной шумности, от 86 до 90 дБА;
- пятый класс – высоко шумные, от 91 до 95 дБА;
- шестой класс – чрезвычайно высоко шумные, более 96 дБА.

Российский ГОСТ Р 53695-2009 [7] предусматривает натурные измерения для оценки шума строительной площадки в целом. Согласно стандарту, точки измерений располагаются снаружи стройплощадки напротив каждой стороны на расстоянии 15 м от её границы на высоте  $1,2 \pm 0,1$  м от поверхности земли (рисунок 2). Минимальное количество точек – три вдоль каждой стороны, равномерно распределённых при условии, что разность эквивалентных уровней звука в соседних точках не превышает 5 дБА, в противном случае добавляются промежуточные точки.

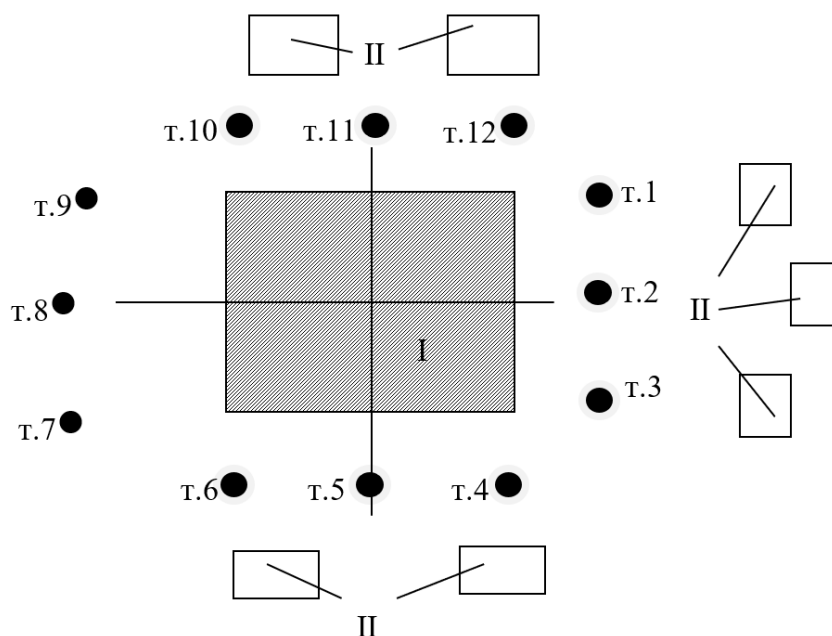


Рисунок 2 – Расположение измерительных точек [7]: т.1 – т.12 измерительные точки;  
I – стройплощадка, II – жилая застройка

Длительность измерений в точке составляет не менее 1 мин для постоянного шума и не менее 0,5 ч для непостоянного шума (при этом эквивалентный уровень звука при дальнейшем увеличении времени не должен изменяться более чем на 0,5 дБА). Рекомендуется проводить одновременные измерения в трёх точках. Если на площадке выполняются различные технологические операции с расхождением эквивалентных уровней звука на 3 дБА и более, измерения проводятся для каждой операции отдельно.

Полученные результаты измерений усредняют, а полученные средние эквивалентные и максимальные уровни звука, внося коррекции на фоновые уровни шума, акустические условия и неопределенность измерений, вносят в техническую документацию на строительную площадку.

На основе анализа результатов измерений, проведенных по ГОСТ Р 53695-2009 в составе работы [4] установлено, что эквивалентный уровень звука на расстоянии 15 м от строительной площадки существенно зависит от вида выполняемых работ.

Исследование позволило также произвести классификацию строительных площадок по уровням шума и оценить колебания уровней звука во времени. Наименьшие уровни шума (67 дБА) зафиксированы при погрузочных работах, что соответствует I классу – относительно малошумные (65-70 дБА). Земляные и подготовительные работы создают уровень 71-73 дБА (II класс – повышенной шумности). Асфальтоукладочные работы дают 76 дБА (III класс – шумные). Асфальтофрезерные работы и уплотнение грунта характеризуются уровнем 81-85 дБА (IV класс – очень шумные). Наибольший уровень шума (90 дБА) зафиксирован при установке свай, что относится к V классу – сверхшумные. В зависимости от вида операции изменение уровней звука строительных площадок происходит в течение смены на 3-5 дБА, а разность эквивалентного и максимального уровня звука не превышает 10 дБА, что позволяет использовать в качестве шумовой характеристики строительной площадки именно эквивалентные уровни звука.

В действующих МУК 4.3.3722-21 [8] указаны особенности измерения шума от строительных работ при проведении проверок Роспотребнадзором и другими контролирующими органами. МУК в целом повторяет требования ГОСТ Р 53695- 2009. При измерениях шума от строительной площадки контрольные точки выбирают в жилых зданиях и на селитебной территории при отсутствии экранирующих препятствий, ориентируя микрофон на наиболее мощный источник. Продолжительность измерений составляет не менее 1 мин (для постоянного шума) или 30 мин (для непостоянного), причем фоновые уровни фиксируют при неработающем оборудовании. В протокол обязательно включают схему расположения объектов, перечень источников шума, виды технологических операций, метеоусловия и временные параметры измерений.

Полученные при помощи измерений шумовые характеристики строительной техники и строительной площадки в целом являются исходной информацией для расчета дальнейшего распространения шума на местности.

## 2 Методы оценки распространения шума строительных работ

В России расчет шума строительных площадок ведется на основании ГОСТ 31295.2 [9]. В соответствии с данной методикой расчет уровней шума в точке, расположенной в жилой застройке, производится исходя из уровней звуковой мощности каждого вида оборудования. При расчете распространения шума учитывается дивергенция, поглощение звука подстилающей поверхностью, отражение звука, экранирование и другие эффекты, затем полученные вклады суммируются. Однако база данных по шумовым характеристикам строительной техники и стройплощадок в целом отсутствует. Существующие подходы, регламентированные ГОСТ 31295.2, рассматривают источники шума как стационарные точечные, что является грубым упрощением реальной картины.

В работе [4] на основании теории преобразования звуковых полей, современное представление о которой представлено в [10], был предложен расчетный метод для оценки распространения шума строительной площадки. Вместо шумовых характеристик отдельных машин и механизмов в качестве исходного параметра используется шумовая характеристика стройплощадки как пространственного источника, затухание шума на местности учитывается при помощи ряда поправок. Формула для расчета уровней шума в расчетной точке при условии расположения источника шума и точки на ровной местности выглядит как:

$$L_{PT} = L_{r0} + 10lg \operatorname{arctg} \frac{l}{2R} - 10lg \frac{R}{r_0} - 10lg \operatorname{arctg} \frac{l}{2r_0}, \quad (1)$$

где  $L_{r0}$  – шумовая характеристика строительной площадки, дБА;  $l$  – длина ИШ, м,  $R$  – расстояние от источника шума до расчетной точки, м;  $r_0$  – базовое расстояние, м, на котором определена шумовая характеристика строительной площадки (15 м).

Результаты экспериментальной проверки формулы представлены на рисунке 3. Результаты измерений наглядно показывают, что рассматривать строительную площадку как точечный источник шума неверно, т.к. закон снижения ее шума далек от идеальных 6 дБА на удвоение расстояния и приближается к 4 дБА на каждое удвоение расстояния, что также не соответствует закону затухания шума от линейного источника.

Разработанная формула позволяет получить высокую точность результата ( $\pm 0-3$  дБА). Она позволяет правильно учесть линейный тип источника шума на расстояниях от 15 до 100 м. На больших расстояниях наблюдается большее расхождение экспериментальных и расчетных данных, связанное с переходом типа поля в квазицилиндрическое и далее в сферическое. Также предложенный метод не позволяет оценить уровни шума строительной площадки на малых расстояниях, где тип звукового поля будет приближен к плоскому.

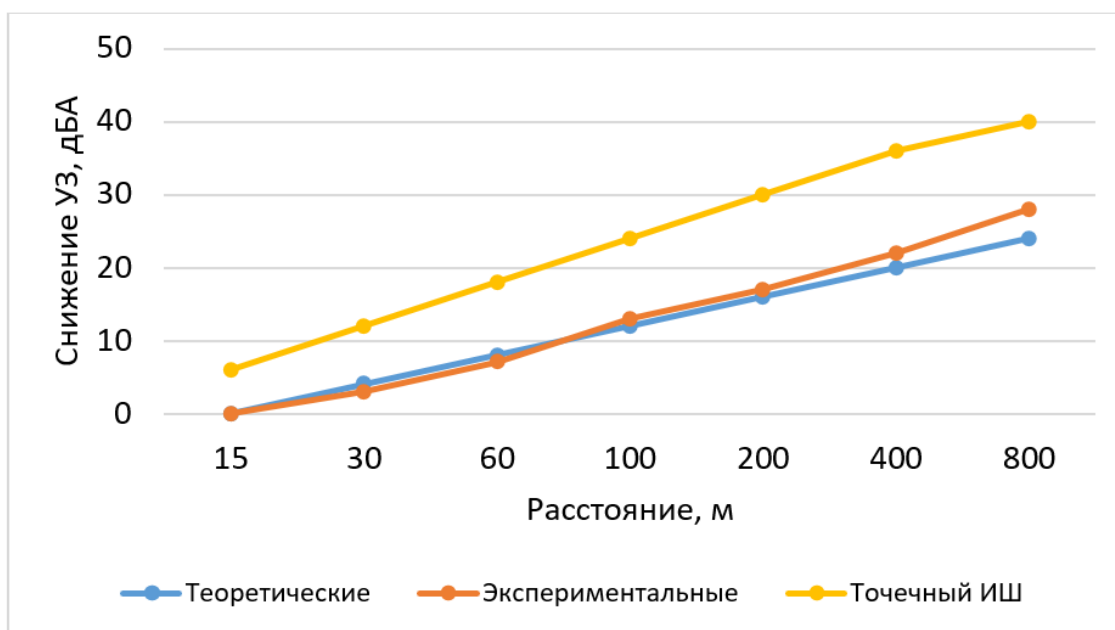


Рисунок 3 – Результаты расчета по формуле (1) и натуральных измерений

В реальности шумовое поле строительной площадки характеризуется значительно большей сложностью, связанной с:

- динамичностью – строительная площадка представляет собой протяженный линейный или плоский объект, где техника постоянно перемещается, изменяя расстояние до расчетных точек;
- нестационарностью – в процессе строительства меняются технологии и типы используемых механизмов;
- широким динамическим диапазоном – уровень шума одной строительной машины сильно варьируется в зависимости от выполняемой технологической операции.

За пределами России методы оценки шума строительной техники и площадок в целом являются более развитыми, стандартизированными и интегрированными

в процедуры экологического и градостроительного планирования. Их можно разделить на несколько взаимосвязанных направлений:

1. Измерения шумовых характеристик строительных машин по стандартизированным методикам. Этот подход фокусируется на измерении шумности самого оборудования в контролируемых условиях. Его цель – создание унифицированных данных для сравнения техники, ее маркировки и сертификации. В Европейском Союзе действует Директива по шуму машин 2000/14/ЕС [11]. Это законодательный акт, обязательный для всех стран ЕС. Он устанавливает предельные уровни звуковой мощности для широкого спектра оборудования, включая строительные машины (например, экскаваторы, бульдозеры, самосвалы). Производители обязаны проводить измерения по гармонизированным стандартам ISO 3744 [12], ISO 4871 [13] и указывать уровень звуковой мощности на изделии (СЕ-маркировка), который является исходными данными для последующего моделирования.

2. Методы прогнозного расчета шума от строительных площадок. Этот подход использует данные об уровне звуковой мощности техники для прогнозирования уровней шума в окружающей застройке при помощи ISO 9613-2:1996, известного в России как ГОСТ 31295.2 [9]. Как и российский ГОСТ, он предназначен для точечных стационарных источников шума.

В Великобритании действует BS 5228-1:2009 + A1:2014 [14]. Это всеобъемлющий руководящий документ, являющийся де-факто стандартом во многих странах, включающий:

- базу данных по уровням звуковой мощности для различных видов строительной техники;
- методики расчета для стационарных источников, мобильных источников, линейных объектов и пр.;
- учет временных характеристик: среднесуточный (дневной, ночной) эквивалентный уровень звука.

В Германии действует DIN 45645-2 [15], содержащий подробные процедуры для оценки шума от строительной деятельности, часто интегрированные в ПО для акустического моделирования (CadnaA, SoundPLAN).

В современных методах моделирования для учета шума мобильной техники используются методы, основанные на разбиении траектории движения на дискретные сегменты, каждый из которых рассматривается как стационарный источник на короткое время. Это позволяет рассчитать эквивалентный уровень звука с высокой точностью. К тому же, современные подходы, особенно в Великобритании и скандинавских странах, оценивают не только эквивалентный уровень звука, но и статистические показатели, такие как  $L_{A10}$  – уровень, превышаемый 10% времени, который лучше коррелирует с субъективным восприятием строительного шума.

Таким образом, в России существует значительный потенциал для разработки расчетного метода для оценки шума строительных площадок, который бы учитывал современные представления о распространении шума линейных, стационарных и мобильных источников.

### 3 Снижение шума строительных площадок

В настоящее время на стройплощадках России стараются использовать малозумные машины и механизмы. Для снижения шума строительных и дорожных машин (СДМ) применяются звукоизолирующие капоты силовой установки и гидравлики, глушители шума выпуска и всасывания, акустические экраны на отдельные источники.

Для шумозащиты стационарных установок используются звукоизолирующие кожухи (капоты). Применяются меры по вибродемпфированию звукоизлучающих поверхностей. Имеются немалые успехи в создании малошумных машин.

Анализ комплекса шумозащитных мероприятий, применяемых в строительстве, а также классификация строительных машин и механизмов по уровням шума, приведенная в [16], позволили определить общие рекомендации по снижению шума для различных категорий строительной техники на рабочих местах как внутри кабины, так и в окружающей среде (таблица 1). При категорировании выделяется строительная техника, имеющая превышение ПДУ по уровням вибрации. Для нее к категории добавляется знак «\*», а в качестве дополнительных мероприятий – виброизоляция кабины или источника вибрации.

Таблица 1 – Рекомендации по снижению шума различных категорий строительной техники

Категория	Эквивалентный УЗ, дБА	Шумо - виброзащитные мероприятия
1 умеренно шумные	менее 75 дБА	Не требуются
2 допустимо шумные	от 76 до 80 дБА	Не требуются
3 шумные	от 81 до 85 дБА	Повышение звукоизоляции кабины, применение глухого остекления (с использованием кондиционирования с установкой салонного фильтра)
4 повышенной шумности	от 86 до 90 дБА	Повышение звукоизоляции кабины, применение глухого остекления (с использованием кондиционирования с установкой салонного фильтра), установка или повышение звукоизоляции капота на ДВС и/или ГН
5 высоко шумные	от 91 до 95 дБА	Повышение звукоизоляции кабины, применение глухого остекления (с использованием кондиционирования с установкой салонного фильтра), установка или повышение звукоизоляции капота ДВС и/или ГН, применение глушителей выхлопа с повышенной эффективностью
6 чрезвычайно высоко шумные	более 96 дБА	Повышение звукоизоляции кабины, применение глухого остекления (с использованием кондиционирования с установкой салонного фильтра), установка или повышение звукоизоляции капота на ДВС, применение глушителей выхлопа с повышенной эффективностью, применение СИЗ

Сравнительный анализ показал, что снижение шума в источнике может обеспечить некоторое снижение шума стройплощадок. В реальных условиях для современной техники максимальное снижение шума стройплощадки не превышает 4-5 дБА (для большинства практически реализуемых случаев). В [4] предложен рекомендуемый типовой набор мероприятий по снижению шума строительных площадок в зависимости от класса шумности осуществляемых циклов строительства, который включает

как мероприятия в источнике шума, так и на пути его распространения:

- для площадок I класса (относительно малошумные) при требуемом снижении шума на 5-10 дБА рекомендуются посадка зеленых насаждений, создание земляных валов или установка простых преград, таких как строительные вагончики и бетонные заборы. Если же шум нужно снизить уже на 10-15 дБА, то вместо простых преград потребуется установка акустических экранов, в сочетании с зелеными насаждениями или звукоизолирующими капотами для техники;

- для площадок II класса (повышенной шумности) при требуемом снижении шума на 15-20 дБА, необходима установка акустических экранов в комбинации с зелеными насаждениями;

- для площадок III класса (шумные) при требуемом снижении шума на 20-25 дБА к акустическим экранам добавляют шумозащитное остекление;

- для площадок IV и V классов (очень шумные и сверхшумные), где уровень шума необходимо снизить на 25-30 дБА и более, единственным эффективным решением становится комплекс из акустических экранов в сочетании с шумозащитным остеклением. При этом для сверхшумных объектов требуется устройство специального остекления со звукоизоляцией не менее 35 дБА.

Международные подходы к снижению шума на уровне проектной документации реализуют:

- систему шумовых квот: для всей стройплощадки устанавливается общий «лимит» шума – предельный уровень, который не должен быть превышен на границе участка. Подрядчик обязан планировать работы, выбирать технику и методы так, чтобы их совокупный шум укладывался в этот лимит. Это стимулирует использование более тихой техники и оптимизацию графика работ;

- на строительных площадках используются системы мониторинга шума в реальном времени. В густонаселенных городах (Лондон, Нью-Йорк, Гонконг) требуется установка вокруг стройплощадки автоматических датчиков шума, передающих данные в режиме 24/7 в контролирующие органы и подрядчику. Это позволяет оперативно реагировать на превышения ПДУ;

- приоритет на тихую технику (Buy Quiet): во многих странах (США, ЕС) существуют программы, поощряющие или обязывающие государственные закупки и крупные проекты использовать технику с пониженным уровнем шума. При этом используются добровольные схемы экологической маркировки, например, немецкая схема Blue Angel для малошумной строительной техники.

Ключевые отличия зарубежной и российской практики, заключаются в том, что на Западе существуют не просто разрозненные документы и стандарты, а целостные руководящие документы, которые объединяют базы данных, методы расчетов и рекомендации по снижению шума. Шум строительства рассматривается как параметр, которым необходимо управлять на всех этапах жизненного цикла строительства – от проектирования и выбора техники до контроля во время производства и ликвидации работ (шумовые квоты, мониторинг). Расчетные методы реализованы в специализированном программном обеспечении для акустического моделирования, которое является стандартным инструментом для проектировщиков и экологов. Таким образом, международный опыт демонстрирует эволюцию от простого контроля к комплексному управлению акустическим воздействием строительства, основанному на глубокой стандартизации, мощном инструментарии прогнозирования и проактивных стратегиях снижения рисков.

В настоящее время на территории Российской Федерации отсутствуют аналоги зарубежных баз данных, расчетных методик и ПО для оценки шума строительной техники. С учетом вышеуказанного, целью работы является разработка базы данных шумовых характеристик строительной техники, а также методики расчёта распространения шума строительных площадок, которые будут внедрены в ПО «Эколог-Шум» фирмы «Интеграл», которая стала квалифицированным заказчиком по проекту. На основании проведенных исследований будут также разработаны научно обоснованные мероприятия по снижению шума строительных площадок.

### Заключение

Проведённый анализ показывает, что шумовое воздействие строительных площадок является серьёзной и недостаточно решённой проблемой в Российской Федерации. С одной стороны, доказано, что длительное интенсивное акустическое воздействие вызывает необратимые изменения в организме человека. С другой стороны, существующая в России система контроля строительного шума характеризуется рядом системных недостатков: отсутствием постоянного акустического мониторинга, низким охватом проверок (менее 2% от общего числа источников), значительной долей нарушений (особенно в жилых зонах – до 17,9% замеров) и крайне малым объёмом профилактических мероприятий (менее 1%).

Ключевой проблемой является нормативный вакуум и несовершенство расчётных методов. В отличие от международной практики (директивы ЕС, стандарты Великобритании и Германии), в России отсутствует специализированное нормативное регулирование шума стройплощадок, нет утверждённой государственной методики акустического расчёта для протяжённых и подвижных источников, а также отсутствуют базы данных по шумовым характеристикам строительной техники. Экспериментально подтверждено, что традиционное представление строительной площадки как набора точечных источников сферических волн ведёт к ошибкам, достигающим 14 дБА, что делает проектирование шумозащиты малоэффективным.

На основе выполненных исследований предложены научно обоснованные подходы: классификация строительных площадок по классам шумности (от I до V), дифференцированные рекомендации по шумозащитным мероприятиям (от посадки зелёных насаждений до комплексного применения акустических экранов и шумозащитного остекления эффективностью не менее 35 дБА), а также усовершенствованная формула расчёта распространения шума, учитывающая переход типа источника от плоского к линейному и далее к точечному, что обеспечивает сходимость с экспериментальными данными в пределах  $\pm 0-3$  дБА на расстояниях от 15 до 100 м. Однако даже данный подход не позволяет учесть все нюансы распространения шума строительной площадки.

Важным итогом данного исследования является поддержка Российским научным фондом (грант № 26-97-20003) проекта учёных БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, направленного на разработку современной методики оценки шума строительных площадок и создание программного обеспечения (на базе ПО «Эколог-Шум»). Реализация этого проекта позволит проектным и контролирующим организациям выполнять акустические расчёты на качественно новом уровне, снизить ошибки проектирования, оптимизировать затраты застройщиков на шумозащиту и, главное, обеспечить соблюдение предельно допустимых уровней шума в жилой застройке, что в конечном счёте уменьшит социальную напряжённость и сохранит здоровье населения.

### Список использованных источников

1. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году. Проект Государственного доклада. – М.: Минприроды России; ООО «Интеллектуальная аналитика»; ФГБУ «Дирекция НТП»; Фонд экологического мониторинга и международного технологического сотрудничества, 2024. – 707 с.
2. Доклад о состоянии окружающей среды в городе Москве в 2024 году. Департамент природопользования и охраны окружающей среды города Москвы, 2024. – 225 с.
3. Госстройнадзор Санкт-Петербурга провел в 2021 году 927 проверок : [Электронный ресурс]. - URL: <https://gsnspb.ru/news/gosstroyнадзор-sankt-peterburga-provel-v-2021-godu-927-proverok/> (дата обращения: 10.10.2025).
4. Минина, Наталия Николаевна. Проблема снижения акустического воздействия на жилую застройку при проектировании, строительстве и функционировании транспортных сооружений : диссертация ... доктора технических наук : 01.04.06 / Минина Наталия Николаевна; [Место защиты: ГОУВПО "Балтийский государственный технический университет "Военмех"]. - Санкт-Петербург, 2012.- 241 с.: ил.
5. ГОСТ 31325-2006 (ИСО 4872:1978) Шум. Измерение шума строительного оборудования, работающего под открытым небом. Метод установления соответствия нормам шума
6. Буторина М.В., Донцов С.А. Шум и вибрация как приоритетные факторы безопасности труда при строительстве транспортно-пересадочных кластеров. *Noise Theory and Practice*, 2025; 3 (11), Стр. 152-165.
7. ГОСТ Р 53695-2009 Шум. Метод определения шумовых характеристик строительных площадок
8. МУК 4.3.3722-21 Контроль уровня шума на территории жилой застройки, в жилых и общественных зданиях и помещениях (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 27 декабря 2021 г.)
9. ГОСТ 31295.2-2005 Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 2. Общий метод расчета
10. Основы виброакустики. Теория и практика борьбы с шумом и вибрацией [Текст]: учебник [для вузов]. Т. 1 / М. В. Буторина, Н. И. Иванов, А. Е. Шашурин ; БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова. - Санкт-Петербург: Изд-во БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова, 2024. - 391 с.
11. Директива Европейского Парламента и Совета Европейского Союза 2000/14/ЕС от 8 мая 2000 г. о сближении законодательства государств - членов Европейского Союза, касающегося шума, производимого в окружающей среде оборудованием, предназначенным для использования вне помещений
12. ISO 3744:2010: Акустика – Определение уровней звуковой мощности и звуковой энергии источников шума по звуковому давлению – Технические методы для свободного звукового поля над отражающей плоскостью
13. ISO 4871:2023: Акустика – Декларирование и проверка значений эмиссии шума машин и оборудования
14. BS 5228-1:2009 + A1:2014 Кодекс правил по контролю шума и вибрации на строительных и открытых площадках
15. DIN 45645-2 Определение номинального уровня шума по данным измерений. Часть 2. Эмиссия шума на рабочих местах
16. Донцов, Сергей Александрович. Концептуальные основы безопасности труда при строительстве транспортно-пересадочных кластеров : диссертация ... доктора технических наук : 1.3.7 / Донцов Сергей Александрович; [Место защиты: ФГБОУ ВО

"Балтийский государственный технический университет "Военмех"]. - Санкт-Петербург, 2026. - 456 с.: ил.

## References

1. On the State and Protection of the Environment of the Russian Federation in 2023. Draft State Report. Moscow: Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation; Intellectual Analytics LLC; Scientific and Progress Directorate; Foundation for Environmental Monitoring and International Technological Cooperation, 2024. 707 p.
2. Report on the State of the Environment in Moscow in 2024. Department of Nature Management and Environmental Protection of the City of Moscow, 2024. 225 p.
3. The St. Petersburg State Construction Supervision Authority conducted 927 inspections in 2021: [Electronic resource]. - URL: <https://gsnspb.ru/news/gosstroynadzor-sankt-peterburga-provel-v-2021-godu-927-proverok/> (date of reference 10.10.2025).
4. Minina, Natalia Nikolaevna. The problem of reducing acoustic impact on residential development during the design, construction and operation of transport facilities: dissertation ... Doctor of Technical Sciences: 01.04.06 / Minina Natalia Nikolaevna; [Place of defense: State Educational Institution of Higher Professional Education "Baltic State Technical University "Voennmeh""]. - Saint Petersburg, 2012. - 241 p.
5. GOST 31325-2006 (ICO 4872:1978) Noise. Measurement of noise emitted by construction equipment intended for outdoor use. Method for determining compliance with noise limits
6. Butorina M.V., Dontsov S.A. Noise and vibration as priority factors of occupational safety during construction of transport interchange clusters. *Noise Theory and Practice*, 2025; 3 (11), pp. 152-165.
7. GOST R 53695-2009 Noise. Method for determining noise characteristics of construction sites
8. Methodological Guidelines MUK 4.3.3722-21 "Noise Level Control in Residential Areas, Residential and Public Buildings, and Premises" (approved by the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare on December 27, 2021)
9. GOST 31295.2-2005 Noise. Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2. General method of calculation
10. Fundamentals of Vibroacoustics. Theory and Practice of Noise and Vibration Control [Text]: Textbook [for universities]. Vol. 1 / M. V. Butorina, N. I. Ivanov, A. E. Shashurin; BSTU 'VOENMEH' named after D. F. Ustinov. - Saint Petersburg: Publishing House of BSTU 'VOENMEH' named after D. F. Ustinov, 2024. - 391 p.
11. DIRECTIVE 2000/14/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 8 May 2000 on the approximation of the laws of the Member States relating to the noise emission in the environment by equipment for use outdoors
12. ISO 3744:2010 Acoustics - Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane
13. ISO 4871:2023: Acoustics - Declaration and verification of noise emission values of machinery and equipment
14. BS 5228-1:2009 + A1:2014 Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites
15. DIN 45645-2 Determination of rating levels from measurements - Part 2: Noise immissions at the work place

16. Dontsov, Sergey Alexandrovich. Conceptual Foundations of Occupational Safety in the Construction of Transport-Transfer Clusters: Dissertation ... Doctor of Technical Sciences: 1.3.7 / Dontsov Sergey Alexandrovich; [Place of defense: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Baltic State Technical University "Voenmeh"]. - Saint Petersburg, 2026. - 456 p.: ill.

УДК: 699.844

OECD: 2.01

DOI: 10.56408/2412-8627.2026.12.2.005

## Сопоставительный анализ нормативных требований СП 51.13330.2011 «Защита от шума» и международного стандарта WELL v.2

Васильев М.Д.<sup>1\*</sup>, Шишкина П.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Руководитель отдела городских исследований, <sup>2</sup>Инженер

<sup>1,2</sup>Архитектурное бюро RVLN, Москва, РФ

### Аннотация

Отечественный СП 51.13330.2011 предъявляет достаточно высокие нормативные требования, обеспечивающие защиту здоровья человека, однако в меньшей степени обеспечивает создание акустически комфортного пространства, отсюда возникает потребность в дополнении и развитии российской практики акустического проектирования. В связи с этим в статье проведен сравнительный анализ нормативных требований СП 51.13330.2011 «Защита от шума» и международной системы «зеленой» сертификации WELL-стандарт: к эквивалентному и максимальному уровню проникающего шума для различных помещений, индексу изоляции воздушного шума дверными блоками, ограждающими конструкциями различных функциональных помещений, предъявляемых к ним конструктивных требований, проведено сравнение требуемого (оптимального) времени реверберации для различных типов функциональных помещений. Отдельно изучены и представлены новые для российской практики подходы к определению потенциала речевой приватности, систем маскировки звука и к нормированию площади звукопоглощающей отделки. Обнаружено, что СП 51.13330.2011 предъявляет более высокие требования к звукоизоляции жилых помещений, однако требования стандарта WELL строже к уровню проникающего шума для жилых помещений в дневное время, к нормированию времени реверберации.

**Ключевые слова:** акустический комфорт, зеленые стандарты, комфортная среда, устойчивое развитие, сравнение нормативной документации

## *Comparative analysis of the regulatory requirements of SP 51.13330.2011 "Noise Protection" and the WELL v.2 Building Standard*

*Vasiliev M.D.<sup>1\*</sup>, Shishkina P.V.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Head of the urban research department, <sup>2</sup>Engineer*

*<sup>1,2</sup>Architectural bureau RVLN, Moscow, Russia*

### **Abstract**

*Domestic SP 51.13330.2011 imposes fairly strict regulatory requirements for the protection of human health. However, it provides less assurance of creating an acoustically comfortable space, which necessitates supplementing and developing Russian acoustic design practices. In this regard, this article provides a comparative analysis of the regulatory requirements of SP 51.13330.2011 "Noise Protection" and*

the international WELL-standard "green" certification system. This analysis examines the equivalent and maximum levels of penetrating noise for various rooms, the airborne noise insulation index of door units and enclosing structures of various functional spaces, and the design requirements imposed on them. A comparison of the required (optimal) reverberation time for various types of functional spaces is also provided. New approaches to determining speech privacy potential, sound masking systems, and standardizing the area of sound-absorbing finishes, which are new to Russian practice, are separately studied and presented. It was found that SP 51.13330.2011 imposes higher requirements for soundproofing of residential premises, however, the requirements of the WELL standard are stricter regarding the level of penetrating noise for residential premises during the daytime and regarding the standardization of reverberation time.

**Keywords:** acoustic comfort, green standards, comfortable environment, sustainable development, comparison of regulatory documentation

## Введение

Архитектурная среда оказывает прямое влияние на психофизиологическое состояние человека [1], [2], поэтому при проектировании зданий необходимо минимизировать любые негативные факторы и формировать оптимальные условия для продуктивной работы и полноценной жизнедеятельности [3]. В связи с этим акустический режим выступает одним из ключевых критериев качества архитектурного пространства. Научно подтверждено, что акустический дискомфорт и пролонгированное шумовое воздействие наносят существенный ущерб организму [4], провоцируя развитие артериальной гипертензии, инсультов и депрессивных состояний у взрослого населения, а также нарушения сна, снижение когнитивных функций и повышение риска возникновения диабета у детей школьного возраста [5], [6].

В современной строительной практике наблюдается устойчивая тенденция к проектированию открытых многофункциональных пространств (опенспейсов) и применению облегченных, сборно-разборных ограждающих конструкций [7], [8]. С одной стороны, это отвечает требованиям экономии и энергоэффективности, но с другой – критически усложняет задачу обеспечения акустической приватности и защиты от шума. Создание акустически благополучной и безопасной среды представляет собой комплексную многокритериальную задачу, требующую пристального внимания на всех этапах разработки проекта, включая тщательный акустический расчет и подбор ограждающих конструкций: межэтажных перекрытий, внутренних перегородок, а также многослойных систем пола и потолка [9].

Устранение акустических дефектов, заложенных на стадии проектирования, на последующих этапах строительства или эксплуатации требует значительных финансовых затрат и зачастую оказывается малоэффективным, что диктует необходимость превентивного и системного подхода к акустическому проектированию зданий (смотри рисунок 1).

Обеспечение здоровой акустической среды в Российской Федерации регулируется основными требованиями СП 51.13330.2011 «Защита от шума» [10]. Однако в мировой практике наметился сдвиг от «базовой защиты» к проактивному «управлению здоровьем и продуктивностью», что реализуется через международные системы зеленой сертификации: WELL [11], BREEAM [12], LEED [13]. Несмотря на наличие исследований, посвященных общим принципам «зеленого» строительства, детальный сравнительный анализ акустических требований отечественной нормативной базы и передовых международных стандартов сертификации в отечественной литературе освещен недостаточно.

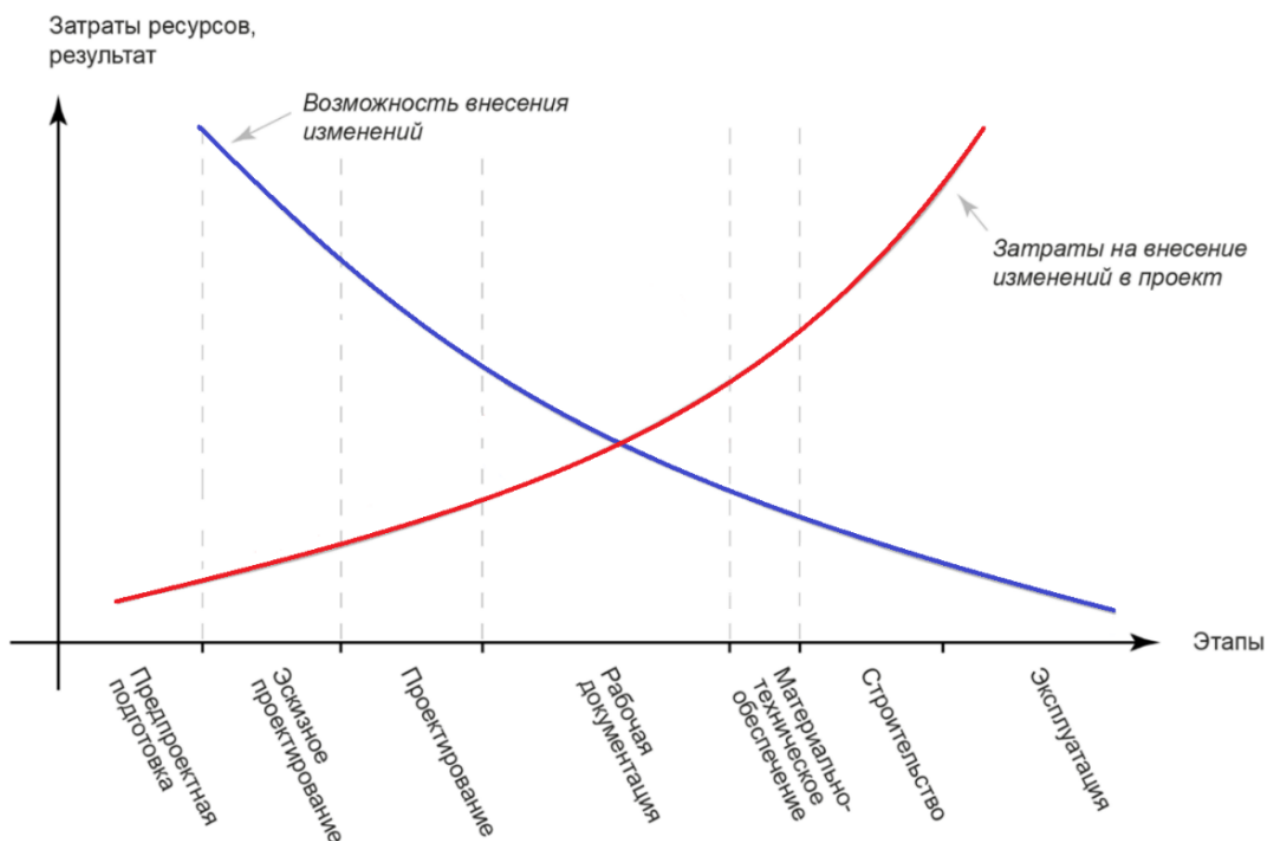


Рисунок 1 – Стоимость исправления ошибок на различных этапах проектирования

Актуальность данной работы заключается в сопоставлении российской практики с передовыми международными стандартами создания здоровьесберегающей среды. Научная новизна исследования состоит в проведении первого комплексного сопоставительного анализа ключевых нормируемых акустических показателей СП 51.13330.2011 «Защита от шума» и стандарта WELL v.2. Выбор стандарта WELL v.2 обусловлен тем, что в отличие от других рейтинговых систем, он в первую очередь сфокусирован на здоровье, психофизиологическом комфорте и когнитивной продуктивности пользователей здания. Настоящее исследование призвано сформировать научно обоснованную аналитическую базу для последующего создания акустически комфортной и безопасной архитектурной среды.

## 1 Сравнение нормируемых показателей уровней проникающего шума по СП 51.13330.2011 «Защита от шума» и стандарта WELL v.2

Проектирование акустической среды здания не должно сводиться исключительно к формальному выполнению требований санитарных норм [14] и СП 51.13330.2011 [10] по снижению проникающего шума до предельно допустимых значений. Приоритетной задачей является формирование архитектурного пространства, активно способствующего сохранению и поддержанию психофизиологического здоровья человека.

В таблице 1 представлено сравнение основных нормируемых показателей уровней проникающего шума по СП 51.13330.2011 «Защита от шума» и «зелёного» стандарта WELL v.2 для различных помещений. Отметим, что в таблице 1 представлены требования только к тем помещениям, которые указаны в обоих нормативных документах.

Таблица 1 – Эквивалентные и максимальные уровни звука проникающего шума в помещениях жилых и общественных зданий

Назначение помещения	Время суток, ч	Уровень звука А, дБА			
		Средний (эквивалентный) уровень звука А ( $L_{Aeq}$ )		Максимальный уровень звука А ( $L_{Amax}$ )	
		WELL v.2	СП 51.13330.2011	WELL v.2	СП 51.13330.2011
Жилые комнаты квартир	7:00-23:00	40	40	50	55
	23:00-7:00	35	30	45	45
Офис типа «опенспейс» (в СП 51.13330.2011 тоже, что и офисные помещения)	-	45	50	55	65
Офисные помещения	-	40	50	50	65
Учебные помещения, конференц и читальные залы	-	35	40	45	55
Залы кафе, ресторанов	-	45	55	55	70

Анализ данных, представленных в таблице 1, свидетельствует о высокой степени схождения нормативных требований СП 51.13330.2011 и стандарта WELL v.2. Тем не менее, международная система сертификации устанавливает более строгие ограничения для максимального уровня проникающего звука А ( $L_{Amax}$ ) в дневные часы: 50 дБА против 55 дБА, допускаемых российским сводом правил. В целях создания не просто комфортной, но и продуктивной, здоровьесберегающей среды в офисах открытого типа (опенспейсах), образовательных учреждениях, а также в залах предприятий общественного питания, стандарт WELL v.2 выдвигает более жесткие акустические критерии.

## 2 Сравнение нормируемых показателей индекса звукоизоляции ограждающих конструкций по СП 51.13330.2011 «Защита от шума» и стандарта WELL v.2

При проектировании акустически комфортной и здоровьесберегающей среды здания, необходимо уделять пристальное внимание звукоизоляции помещений, так как звук, передающийся между ними через перекрытия, стены и перегородки, является одной из основных причин дискомфорта пользователей зданий [2]. Поскольку в последнее время при проектировании и строительстве предпочтение отдается облегченным и/или сборно-разборным конструкциям стен и перекрытий [7], актуальной становится потребность в акустической приватности помещений – одним из основных показателей стандарта WELL v.2. В международном «зеленом» стандарте WELL для определения уровня изоляции воздушного шума ограждающими конструкциями используется безразмерный показатель «Потенциальная приватность разговора (Speech privacy potential –  $SPP$ )», выражаемый суммой (1) индекса изоляции воздушного шума

внутренними ограждающими конструкциями  $R_w$  и эквивалентного уровня звукового давления  $L_{Aeq}$  (дБА):

$$SPP = R_w + L_{Aeq}. \quad (1)$$

В таблице 2 приведены уровни потенциальной приватности разговора ( $SPP$ ) в соответствии со стандартом WELL v.2.

Таблица 2 – Уровни потенциальной приватности разговора ( $SPP$ )

Уровень приватности	$SPP$	Описание
Полная приватность	90	Едва слышен крик.
Высокая конфиденциальность	85	Нормальный уровень голоса не слышен. Повышенный голос слышен, но неразборчив.
Отлично	80	Нормальный уровень голоса едва слышен. Повышенный голос слышен, но, в основном, неразборчив.
Хорошо	75	Нормальный уровень голоса слышен, но неразборчив. Повышенный голос частично разборчив.
Удовлетворительно	70	Нормальный уровень голоса слышен и частично разборчив.
Плохо	65	Нормальный уровень голоса слышен и разборчив.
Отсутствует	60	Отсутствует приватность разговора.

В соответствии с исследованием [5], данные уровни показывают, что, если помещение не является приватным, то люди менее склонны разглашать личную информацию врачу, коллеге, члену семьи и т.д., что в отдельных ситуациях может быть критически важно для здоровья и безопасности человека.

В таблице 3 представлено сравнение показателей нормативных требований изоляции воздушного шума внутренними ограждающими конструкциями  $R_w$  по СП 51.13330.2011 «Защита от шума» и  $R'_w$  «зеленому» стандарту WELL v.2, а также уровни потенциальной приватности разговора ( $SPP$ ) в соответствии со стандартом WELL v.2 для различных помещений, требования к которым представлены в обоих нормативных документах. Однако стоит заметить главное различие между документами, стандарт WELL v.2 предъявляет требования к индексу изоляции воздушного шума конструкции, измеренной в лабораторных условиях  $R'_w$ .

На основании сравнительного анализа, представленного в таблице 3 можно сделать вывод о более высоких требованиях СП 51.13330.2011 к звукоизоляции перегородок между квартирами, квартирами и офисами, квартирами и местами общественного пользования (МОП), а также к звукоизоляции ограждающих конструкций офисов, однако стоит отметить, что в стандарте WELL v.2 требования предъявляются к более широкому перечню помещений. Тем не менее по сравнению с СП 51.13330.2011, стандарт WELL v.2 имеет более высокие требования к звукоизоляции учебных помещений.

Таблица 3 – Сравнение показателей нормативных требований изоляции воздушного шума внутренними ограждающими конструкциями  $R_w$  по СП 51.13330.2011 «Защита от шума» и  $R'_w$  «зеленому» стандарту WELL v.2, а также уровни потенциальной приватности разговора ( $SPP$ ) в соответствии со стандартом WELL v.2 для различных помещений

Наименование и расположение ограждающей конструкции	$SPP_{min}$ WELLv.2	$R'_{wmin}$ WELLv.2	$R_{wтреб}$ СП 51.13330.2011
Стены и перегородки между кабинетами	75	35	45
Стены и перегородки между кабинетом и конференц-залом	85	50	-
Стены и перегородки между кабинетом и зоной «опенспейс» (рабочими комнатами в соответствии с СП 51.13330.2011)	70	25	45
Стены и перегородки между конференц-залами (Переговорными)	80	35	-
Стены и перегородки между конференц-залом и зоной «опенспейс»	70	25	-
Стены и перегородки между квартирами, между помещениями квартир и офисами; между помещениями квартир и лестничными клетками, холлами, коридорами, вестибюлями	-	50	52
Перегородки без дверей между комнатами, между кухней и комнатой в квартире	-	45	43
Стены и перегородки между кабинетами и аудиториями, отделяющие эти помещения от помещений общего пользования	-	45	48
Стены и перегородки между классами	-	50	48
Стены и перегородки между классом и санузлом	-	53	48
Стены и перегородки между музыкальными классами образовательных организаций среднего общего образования и отделяющие эти помещения от помещений общего пользования	-	60	55
Стены и перегородки между музыкальными классами образовательных организаций высшего образования	-	60	57

Звукоизоляция воздушного шума  $R_w$  конструкции стены главным образом определяется конструкцией дверного блока. В таблице 4 представлены требования к конструкциям дверных блоков стандарта WELL v.2 и СП 51.13330.2011.

Как видно из таблицы 4, СП 51.13330.2011 предъявляет к звукоизоляции воздушного шума дверного блока практически такие же требования, что и стандарт WELL v.2: 32 дБ против 30 дБ соответственно. Для достижения акустического комфорта в помещениях стандартом WELL v.2 регламентируется применение дверных полотен со встроенными автоматически опускающимися, в закрытом положении двери, порожками с уплотнительной прокладкой, или дверных полотен со стационарной уплотнительной прокладкой внизу (рисунок 2).

Таблица 4 – Требования к конструкциям дверных блоков стандарта WELL v.2 и СП 51.13330.2011

Требования	WELL v.2	СП 51.13330.2011
Индекс изоляции воздушного шума	30 ( $R'_{wmin}$ )	32 ( $R_{wmpреб}$ )
Дверное полотно должно быть не пустотелым	+	-
Наличие уплотнительных прокладок между дверной коробкой и дверным блоком	+	-
Автоматически опускающийся порожек с уплотнительной прокладкой или стационарная уплотнительная прокладка	+	-

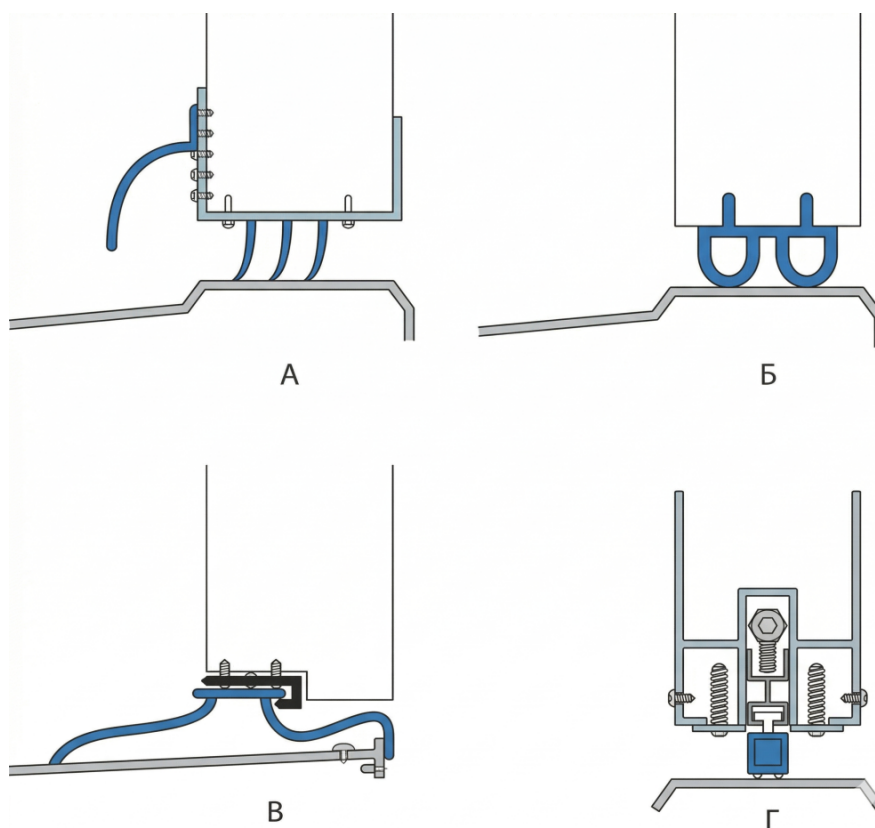


Рисунок 2 – Конструкции дверей с уплотнительными прокладками. А, Б, В – стационарные уплотнительные прокладки; Г - автоматический порожек с уплотнительной прокладкой (дверь в закрытом положении)

### 3 Сравнение нормируемых показателей времени реверберации T60 по СП 51.13330.2011 «Защита от шума» и стандарта WELL v.2

Следующие параметры проектирования акустически комфортной и здоровьесберегающей среды устанавливают требования к времени реверберации в зависимости от функционального значения помещений с учетом их акустической отделки. Например, в лекционных аудиториях и конференц-залах время реверберации должно способствовать высокой разборчивости речи и уровню артикуляции выступающего, то есть слова и звуки, произносимые в помещении, должны слышаться и восприниматься одинаково всеми людьми, находящимися в помещении. В учебных помещениях (классах) подходящим будет малое время реверберации, чтобы обеспечить

четкую разборчивость речи, но в то же время достаточное для диффузности звука. Также стоит отметить случаи, когда высокая разборчивость речи неуместна, например, в офисных помещениях и ресторанах, где требуется высокая степень приватности для работы или времяпрепровождения с друзьями и близкими. В таблице 5 приведено сравнение требований оптимального времени реверберации для помещений различного функционального назначения и объема международного «зеленого» стандарта WELL v.2 и СП 51.13330.2011.

Таблица 5 – Оптимальное время реверберации  $T_{60}$  для помещений различного функционального назначения и объема по стандарту WELL v.2 и СП 51.13330.2011

Назначение помещения	Объем по WELL v.2, м <sup>3</sup>	$T_{60}$ по WELL v.2, с	$T_{60}$ по СП 51.13330.2011, с
Конференц-залы (многоцелевые залы по СП 51.13330.2011 объемом более 500 м <sup>3</sup> )	-	0.6	0.9 - 1.6
Учебные помещения (не нормируются по СП 51.13330.2011)	280	0.6	-
	280-570	0.5 - 0.8	-
	570	0.6 - 1.0	-
Лекционные залы (нормируются по СП 51.13330.2011 объемом более 500 м <sup>3</sup> )	280	0.7	-
	280-570	0.6 - 0.9	-
	570	0.7 - 1.3	0.8 - 1.3
Музыкальные концертные залы (залы для камерной музыки по СП 51.13330.2011 объемом более 500 м <sup>3</sup> )	280	1.1	-
	280-570	1.0 - 1.4	1.2 - 1.4
Спортивные залы	280	0.7 - 0.8	-
	280-570	0.8 - 1.1	0.8
	570	1.0 - 1.8	-

Исходя из требований, представленных в таблице 5, мы видим, что в СП 51.13330.2011 не нормируется время реверберации для учебных помещений, а также для прочих помещений объемом менее 500 м<sup>3</sup>. В международном «зеленом» стандарте WELL v.2 также регламентируются требования к применению звукопоглощающих потолков и звукопоглощающих облицовочных стеновых панелей.

Звукопоглощающие покрытия [15] могут быть классифицированы по ряду показателей, международный стандарт EN ISO 11654 [16] определяет коэффициент звукопоглощения по итогам лабораторных испытаний конструкции ( $\alpha_w$ ) и фактический коэффициент звукопоглощения ( $\alpha_r$ ). Классы звукопоглощения от А до Е соответствуют фактическому коэффициенту звукопоглощения ( $\alpha_r$ ), график приведен на рисунке 3. Стандарт ASTM C 423 [17] определяет значения для двух разных величин: коэффициента звукопоглощения (NRC) и средней величины звукопоглощения (SAA). Значения обеих величин определяются как средние (применительно к диапазонам частот 250-2000 Гц и 200-2500 Гц соответственно).

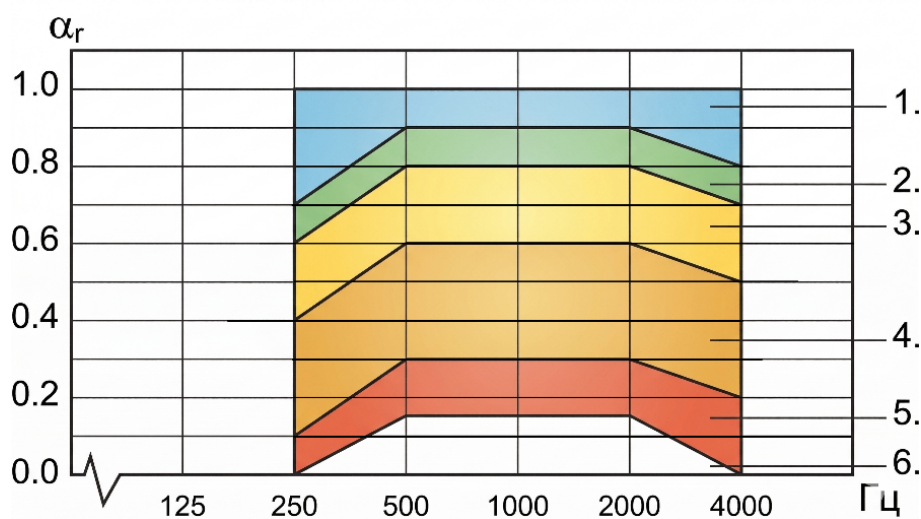


Рисунок 3 – Классы звукопоглощения: 1 - звукопоглощение класса А, 2 - звукопоглощение класса В, 3 - звукопоглощение класса С, 4 - звукопоглощение класса D, 5 - звукопоглощение класса E, 6 – не классифицировано

Для достижения наилучших результатов звукопоглощающие покрытия должны крепиться на поверхности, расположенные напротив более твердых поверхностей. Подвесной звукопоглощающий потолок напротив деревянного пола, полированного бетона (смотри рисунок 4). Аналогично, звукопоглощающая отделка стен должна дополнять противоположные стены, от которых отражаются звуковые волны, например, стеклянные перегородки в офисах, кирпичную кладку, полированный бетон [18].

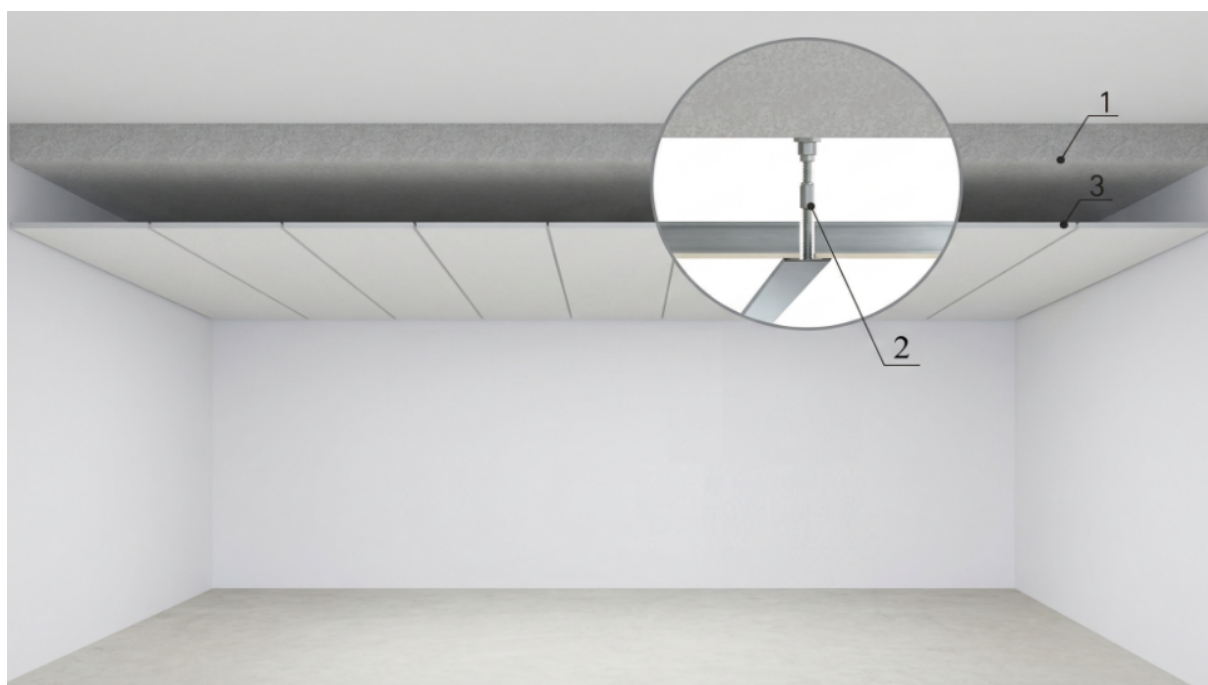


Рисунок 4 – Схема размещения звукопоглощающего потолка: 1 – поверхность потолка помещения, 2 – высота подвесной системы, 3 – звукопоглощающая панель

Международный «зеленый» стандарт WELL v.2 регламентирует минимальные значения коэффициента звукопоглощения ( $NRC/\alpha_w$ ). Требования к минимальным коэффициентам звукопоглощения потолков во всех типах помещений кроме жилых приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Минимальные коэффициенты звукопоглощения потолков

Наименование помещений	$NRC/\alpha_w$ WELL v.2	СП 51.13330.2011
Офисы, офисы типа "опенспейс", рестораны	0.7 минимум для 75 % S потолка	-
Конференц-залы, учебные помещения	0.7 минимум для 50 % S потолка	-

Отметим, что СП 51.13330.2011 не предъявляет подобных требований к минимальным коэффициентам звукопоглощения облицовочных панелей ни потолков, ни стен. Требования к минимальным коэффициентам звукопоглощения облицовочных звукопоглощающих панелей стен во всех типах помещений кроме жилых приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Минимальные коэффициенты звукопоглощения облицовочных панелей стен

Наименование помещений	$NRC/\alpha_w$ WELL v.2	СП 51.13330.2011
Офисы, рестораны	0.7 минимум для 25 % S минимум одной стены	-
Конференц-залы, учебные помещения	0.7 минимум для 25 % S минимум двух стен	-

#### 4 Система маскировки звука Soundmasking

Система маскировки звука Soundmasking используется в офисных пространствах типа «опенспейс» в качестве средства приглушения речи или других маскирующих шумы звуков путем равномерного увеличения уровня фонового шума во всем помещении (рисунок 5). Уровни шума в здании или группе помещений варьируются в зависимости от функционального назначения помещения, в определенное время дня или года на 15 дБА и более [18]. Инженерные системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха не всегда работают в звуковом спектре, способствующем приватности (конфиденциальности) речи. Напротив, звук, исходящий от инженерного оборудования, в значительной степени произвольный и варьируется от помещения к помещению и с течением времени, а также напрямую зависит от типа используемого оборудования.

При проектировании системы маскировки звука следует учитывать следующие параметры: звуковая маскировка должна быть равномерно распределена по помещению либо со смещением в 30 или 60 градусов на расстоянии пропорциональном высоте потолка и высоте подвесной системы, источник звука системы маскировки расположен вдали от строительных конструкций в центральной области помещения для наиболее равномерного покрытия. Динамики системы маскировки звука могут быть установлены за подвесным потолком, вмонтированы в подвесной потолок, установлены перед подвесным потолком или установлены за фальшполом для достижения наилучшего результата [9].

СП 51.13330.2011 пока не нормирует саундмаскинг в офисных помещениях. В то время как стандарт WELL v.2 предъявляет следующие требования к уровням звука, производимым системами маскировки звука:

- Офисы типа «опенспейс», библиотеки, столовые, коридоры: 45–48 дБА;
- Кабинеты в офисе, учебные помещения, номера гостиниц: 40–42 дБА.



Рисунок 5 – Радиусы воздействия отвлекающего шума на сотрудника офиса без использования и с использованием системы маскировки звука

### Заключение

Сравнение российского СП 51.13330.2011 и стандарта WELL v.2 позволяет определить базовую разницу в подходах к нормированию акустики и защите от шума: если российские нормативные требования сфокусированы на защите здоровья человека от вредного воздействия шума, то стандарт WELL рассматривает акустическую среду как инструмент управления стрессом, продуктивностью, здоровьем и общим самочувствием людей.

Выявлено, что часть показателей проникающего шума нормируемых помещений СП 51.13330.2011 и WELL v.2 совпадает, однако WELL v.2 предъявляет повышенные требования к учебным помещениям и читальным залам для повышения внимания и концентрации учеников, ограничивая средний уровень звука А до 35 дБА (против 40 дБА в СП), а максимальный – до 45 дБА (против 55 дБА в СП). Такая же ситуация и для жилых помещений в дневное время:  $L_{max}$  – 50 дБА по WELL v.2 против 55 дБА по СП.

Одним из основных отличий подходов является определение акустической приватности  $SPP$  стандартом WELL v.2, который учитывает и звукоизоляцию конструкции, и фоновый шум. Однако не смотря на это, российский СП 51.13330.2011 предъявляет более высокие требования к жилью: звукоизоляции стен между квартирами и местами общего пользования – 52 дБ против 50 дБ по WELL v.2, но уступает требованиям WELL v.2 к звукоизоляции стен между учебными классами – 48 дБ против 50 дБ по WELL, и между музыкальными классами – 55–57 дБ против 60 дБ по WELL. Нормативные показатели звукоизоляции дверей близки (30 дБ в WELL и 32 дБ в СП), однако WELL v.2 предъявляет еще конструктивные требования к дверному блоку:

наличие полнотелого полотна и встроенных автоматически опускающихся порожков с уплотнителем.

В ходе исследования также выявлено, что СП 51.13330.2011 нормирует время реверберации только для многоцелевых залов объемом более 500 м<sup>3</sup>, не учитывая конференц-залы, учебные классы и МОП, в то время как стандарт WELL v.2 нормирует не только учебные классы объемом до 280 м<sup>3</sup>, но еще предъявляет требования к площади звукопоглощающих покрытий (минимум на 75% площади потолка в офисах типа «опенспейс» и ресторанах) и к коэффициенту звукопоглощения отделочных материалов. Также стандарт WELL v.2 предписывает использование системы искусственного фонового шума Soundmasking как средства повышения акустического комфорта, нормирует рабочие диапазоны: 45–48 дБА для открытых пространств и 40–42 дБА для закрытых кабинетов.

Полученные сравнительные таблицы могут использоваться как практический инструмент при проектировании, позволяя сопоставлять и выбирать оптимальные параметры акустического комфорта. При проектировании открытых пространств рекомендуется уделить особое внимание расчету потенциала речевой приватности и внедрению системы саундмаскинга. Представленные в исследовании данные позволяют вести превентивный учет акустических требований стандарта WELL v.2 на стадиях эскизного проектирования и разработки рабочей документации, избегая финансовых затрат на дальнейшее исправление проектных ошибок на этапе строительства и эксплуатации, а также оказывать экономический эффект за счет снижения заболеваемости, минимизации стресса и повышения когнитивной продуктивности пользователей зданий.

#### Список использованных источников

1. Абекеева А. А., Ктайбекова Г. Архитектура эмоций: влияние городской среды на психологическое состояние человека // *ReFocus*. – 2025. – № 5. – С. 285–289.
2. Зенкина В. Г., Захарченко Д. О. Шумовое загрязнение и работоспособность студентов // *Амурский медицинский журнал*. – 2024. – № 2 (37). – С. 50–56.
3. Chen X., Liu M., Zuo L. Environmental noise exposure and health outcomes: an umbrella review of systematic reviews and metaanalysis // *European Journal of Public Health*. – 2023. – Vol. 33, № 4. – P. 725–731.
4. Каменская, Е. Н. Влияние шума на здоровье человека // *Труды РГУПС*. – 2024. – № 1 (66). – С. 76–81.
5. Nahad O., Kuntic M., AlKindi S. Noise and mental health: evidence, mechanisms, and consequences // *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*. – 2025. – Vol. 35. – P. 16–23. – DOI: 10.1038/s41370-024-00642-5.
6. Gilbertson P., Forrester S., Andrews L. The National Children's Study Archive Model: A 3Tier Framework for Dissemination of Data and Specimens for General Use and Secondary Analysis // *Frontiers in Public Health*. – 2021. – 15 p.
7. Шубин, И. Л., Аистов В. А., Пороженко М. А. Звукоизоляция ограждающих конструкций в многоэтажных зданиях. Требования и методы обеспечения // *Construction materials*. – 2019. – № 3. – С. 33–43.
8. Гуреев, К. А., Трящин Д. В. Способы повышения звукоизоляции в домах, построенных по монолитно каркасной технологии // *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. – 2022. – № 2 (40). – С. 31–36.
9. Белолипецкая, В. А., Кривошапов А. М., Весова Л. М. Особенности применения различных звукоизолирующих материалов в монолитном строительстве // *ИВД*. – 2022. – № 5 (89). . – 7 с.

10. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с Изменениями № 1, 2, 3, 4) : свод правил : утверждён Приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 28 декабря 2010 г. № 825 : дата введения 2011-05-20. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 42 с.
11. WELL Building Standard v.2 : international standard / International WELL Building Institute (IWBI). – Updated 2023.
12. BREEAM International New Construction 16: technical standard / BRE Global Ltd.
13. LEED v4.1 Building Design and Construction: reference guide / U.S. Green Building Council (USGBC). – 2023.
14. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 г. № 2 : дата введения 2021-03-01. – Москва : Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти, 2021. – 436 с.
15. Васильев, М. Д., Маркина Ю. В., Шмагин Е. И. Исследование физикомеханических и волновых характеристик пористоволокнистых материалов // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 11. – 20 с.
16. EN ISO 11654:1997. Acoustics – Sound absorbers for use in buildings – Rating of sound absorption : international standard / International Organization for Standardization (ISO). – Geneva : ISO, 1997. – 12 p.
17. ASTM C423-22. Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method : technical standard / ASTM International. – West Conshohocken, PA : ASTM International, 2022. – 18 p.
18. Oxenham, A. J. Mechanisms and mechanics of auditory masking / A. J. Oxenham // The Journal of Physiology. – 2013. – Vol. 591, № 10. – P. 2375. – DOI: 10.1113/jphysiol.2013.254490.

## References

1. Abekeyeva A. A., Ktaybekova G. Architecture of emotions: The influence of the urban environment on the human psychological state // ReFocus. - 2025. – N. 5. – P. 285–289.
2. Zenkina V. G., Zakharchenko D. O. Noise pollution and students' performance // Amur Medical Journal. – 2024. – N. 2 (37). – P. 50–56.
3. Chen X., Liu M., Zuo L. Environmental noise exposure and health outcomes: an umbrella review of systematic reviews and meta-analysis // European Journal of Public Health. – 2023. – Vol. 33, N. 4. – P. 725–731.
4. Kamenskaya, E. N. The impact of noise on human health // Proceedings of the Russian State Transport University. – 2024. – N. 1 (66). – pp. 76–81.
5. Nahad O., Kuntic M., Al Kindi S. Noise and mental health: evidence, mechanisms, and consequences // Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology. – 2025. – Vol. 35. – P. 16–23. – DOI: 10.1038/s41370-024-00642-5.
6. Gilbertson P., Forrester S., Andrews L. The National Children's Study Archive Model: A 3 Tier Framework for Dissemination of Data and Specimens for General Use and Secondary Analysis // Frontiers in Public Health. – 2021. – 15 p.
7. Shubin, I. L., Aistov, V. A., Porozhenko, M. A. Soundproofing of Enclosing Structures in Multi-Story Buildings. Requirements and Methods of Ensuring it // Construction Materials. – 2019. – N. 3. – P. 33–43.
8. Gureev, K. A., Tryastsin, D. V. Ways to Improve Soundproofing in Houses Built Using

Monolithic Frame Technology // Caspian Engineering and Construction Bulletin. – 2022. – N. 2 (40). – P. 31–36.

9. Belolipetskaya, V. A., Krivoshchapov, A. M., Vesova, L. M. Features of the Application of Various Soundproofing Materials in Monolithic Construction // IVD. – 2022. – N. 5 (89). – 7 p.

10. SP 51.13330.2011. Noise Protection. Updated version of SNiP 23-03-2003 (with Amendments No. 1, 2, 3, 4): set of rules: approved by Order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation (Ministry of Regional Development of Russia) dated December 28, 2010, No. 825: date of introduction: 2011-05-20. – Moscow: Standartinform, 2011. – 42 p.

11. WELL Building Standard v.2: international standard / International WELL Building Institute (IWBI). – Updated 2023.

12. BREEAM International New Construction 16: technical standard / BRE Global Ltd.

13. LEED v4.1 Building Design and Construction: reference guide / U.S. Green Building Council (USGBC). – 2023.

14. SanPiN 1.2.3685–21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans: approved by the Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated January 28, 2021, No. 2: date of introduction March 1, 2021. – Moscow: Bulletin of regulatory acts of federal executive bodies, 2021. – 436 p.

15. Vasiliev, M. D., Markina Yu. V., Shmagin E. I. Study of the physical, mechanical and wave characteristics of porous fibrous materials // Engineering Bulletin of the Don. – 2023. – N. 11. – 20 p.

16. EN ISO 11654:1997. Acoustics – Sound absorbers for use in buildings – Rating of sound absorption : international standard / International Organization for Standardization (ISO). – Geneva: ISO, 1997. – 12 p.

17. ASTM C423-22. Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method: technical standard / ASTM International. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022. – 18 p.

18. Oxenham, A. J. Mechanisms and mechanics of auditory masking / A. J. Oxenham // The Journal of Physiology. – 2013. – Vol. 591, N. 10. – P. 2375. – DOI: 10.1113/jphysiol.2013.254490.

УДК: 534.13

OECD: 2.03 PU

DOI: 10.56408/2412-8627.2026.12.2.006

## Вибродемпфирование подкрепленной пластины

В.Ю. Кирпичников<sup>1</sup>, А.В. Кудяев<sup>2\*</sup>, А.Ю. Олейников<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Д.т.н., профессор, <sup>2,3</sup>К.т.н., доцент

<sup>1,2,3</sup>Кафедра «Техносферная безопасность и вычислительная механика», Балтийский Государственный Технический Университет "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова

### Аннотация

Объектом исследования является подкрепленная пластина, для которой выполнено экспериментальное определение эффективностей уменьшения вибрации и шумоизлучения, установленным на ее внешнюю поверхность резонансным пластинчатым вибропоглотителем с нанесенным на него армированным вибропоглощающим покрытием на основе полимерной пленки. Представлены узкополосные спектры входной вибровозбудимости пластины при отсутствии и при наличии резонансных пластинчатых вибропоглотителей с армирующим слоем покрытия. Выявлены зависимости эффективности малогабаритного пластинчатого вибропоглотителя от толщины армирующего слоя покрытия.

**Ключевые слова:** пластина, вибрация, диссипативный слой, шумоизлучение, вибропоглощающее покрытие, эффективность, резонансная частота

## *Vibration damping of a reinforced plate*

V. Yu. Kirpichnikov<sup>1</sup>, A.V. Kudaev<sup>2\*</sup>, A. Yu. Oleinikov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>D.Sc., Professor, <sup>2,3</sup>Ph.D., Associate Professor

<sup>1,2,3</sup>Department 'Technosphere Safety and Computational Mechanics', Baltic State Technical University the 'Voenmeh'

### Abstract

The object of this study is a reinforced plate, for which the vibration and noise reduction efficiency was experimentally determined using a resonant plate vibration absorber mounted on its outer surface with a reinforced vibration-absorbing coating based on a polymer film. Narrowband spectra of the plate's input vibration excitability are presented with and without resonant plate vibration absorbers with a reinforcing coating layer. The dependence of the effectiveness of a small-sized plate vibration absorber on the thickness of the reinforcing coating layer is determined.

**Keywords:** plate, vibration, dissipative layer, noise emission, vibration-absorbing coating, efficiency, resonant frequency

---

\*E-mail: ksiombarg1@yandex.ru (Кудяев А.В.)

## Введение

Корпусные и внутрикорпусные конструкции транспортных средств и сооружений различного функционального назначения выполняют, как правило, в виде плоских или имеющих кривизну подкрепленных пластин. Элементы подкрепляющего, обычно перекрестного, набора таких пластин оказывают определяющее влияние как на уровни вибровозбудимости и шумоизлучения, так и на значения резонансных частот изгибных колебаний конструкций и их элементов.

При этом наибольшее негативное влияние на окружающую среду и обслуживающий персонал часто оказывают низкочастотные тональные (дискретные) составляющие (далее ДС) в спектрах вибрации и шума, особенно ДС на низшей резонансной частоте  $f_{11}$  изгибных колебаний подкрепленной пластины в целом с формой, имеющей одну полуволну в направлении кромок. Снижение уровней ДС на указанной  $f_{11}$  и других низших резонансных частотах, из-за малой эффективности существующих вибропоглощающих покрытий даже при их большой (до 50%) относительной массе, представляет значительные трудности [1], [2].

Приоритетным направлением улучшения акустических характеристик инженерных подкрепленных пластин является разработка с последующим практическим применением малогабаритных и высокоэффективных на низких частотах средств вибродемпфирования

Одним из таких средств являются резонирующие (далее резонансные) пластинчатые вибропоглотители (РПВ), в конструкцию которых входят закрепленная с зазором от демпфируемой конструкции металлическая (далее основная) пластинка. На одну или обе ее поверхности наносится армированное вибропоглощающее покрытие (АВП) с диссипативным слоем в виде полимерной пленки из поливинилацетата и с более тонкой, чем основная, пластинкой из металла в качестве армирующего слоя. Сравнивая поливинилацетат с другими существующими материалами, можно отметить значительные (коэффициент  $\eta$  от 1 до 3) потери колебательной энергии в диапазоне рабочих температур [3].

Функциональность описанных РПВ обусловлена интенсивным поглощением ими колебательной энергии, поступающей от демпфируемой конструкции на резонансной частоте  $f_p$  (например,  $f_{11}$ ) при настройке на нее низшей резонансной частоты  $f_1$  изгибных колебаний вибропоглотителя.

Высокая вибродемпфирующая эффективность подобных малогабаритных РПВ с одним (в зоне геометрического центра основной пластинки) или двумя (у коротких кромок) механическими соединениями при установке на однородные (без подкреплений) пластины подтверждена результатами экспериментальных исследований, которые содержатся, например, в работах [4], [5].

Экспериментальные исследования уменьшения уровней низкочастотной вибрации и шумоизлучения подкрепленных пластин с помощью описанных малогабаритных РПВ на основе полимерной пленки из поливинилацетата до настоящего времени не проводились.

Основной целью настоящей работы являлось натурное определение влияния толщины армирующего слоя вибропоглощающего покрытия описанного РПВ с одноточечным соединением на эффективность уменьшения уровней ДС на частоте низшего резонансного максимума изгибных колебаний находящейся в воздухе модели типовой подкрепленной пластины.

## 1 Описание модели подкрепленной пластины и вибропоглотителя

Модель демпфируемой подкрепленной пластины имела размеры в плане 1,59×1,09 м и толщину 4 мм. Подкрепление пластины было выполнено в виде перекрестного набора, содержащего пять подкреплений (ребер жесткости), ориентированных вдоль ее длинных кромок, и пятнадцать ребер жесткости, параллельных коротким кромкам. Высота первых равнялась – 80 мм, а вторых – 40 мм. Толщина всех элементов набора в форме однородных полос составляла 2 мм. Расстояние между более высокими ребрами жесткости равнялось ~160 мм, а между более низкими – примерно 100 мм.

Фото пластины с установленным на нее малогабаритным резонансным вибропоглотителем изображено на рисунке 1.

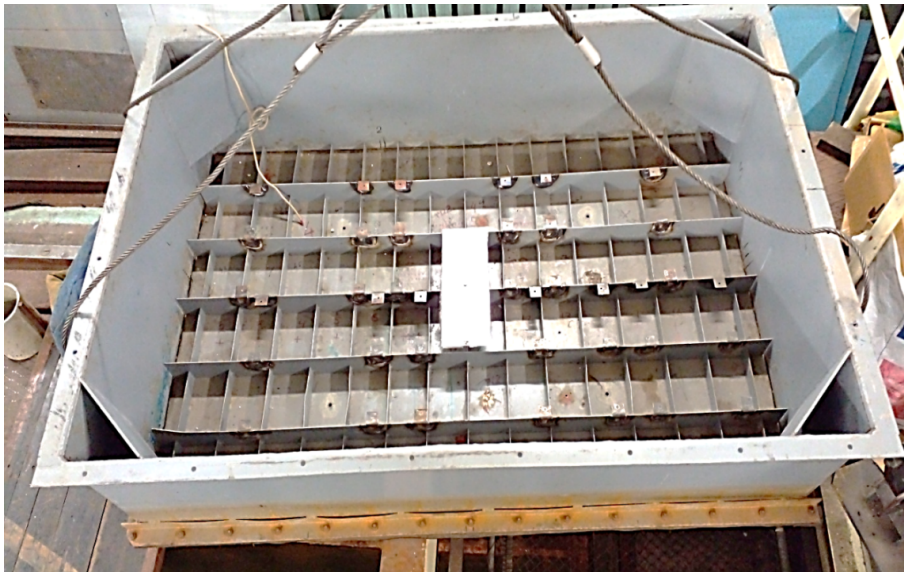


Рисунок 1 – Фото модели подкрепленной пластины

Кромки пластины с помощью болтовых соединений были закреплены к коробу прямоугольной формы, моделирующему участки соседних с пластиной конструкций.

Испытанные РПВ содержали основную стальную пластинку и установленное на нее армированное вибропоглощающее покрытие на основе полимерной пленки марки ВПС-2,5 из поливинилацетата толщиной 0,5 мм.

Крепление основной пластинки РПВ к демпфируемой пластине осуществлялось с помощью специального кронштейна, установленного на кромке среднего высокого ребра жесткости над его пересечением с ребром жесткости, имеющим меньшую высоту. Геометрические центры (ГЦ) пластины и РПВ находились на одной линии, перпендикулярной их параллельным поверхностям.

## 2 Вибрационные характеристики подкрепленной пластины и вибропоглотителя

В качестве исследуемой вибрационной характеристики подкрепленной пластины был выбран частотный спектр ее входной вибровозбудимости, под которой подразумевается выраженный в дБ уровень виброускорения

$$A/F = 20 \lg(AF_0/\alpha_0 F), \text{ дБ}, \quad (1)$$

где  $A$ ,  $\text{м}/\text{с}^2$  – уровень виброускорения в месте возбуждения силой,  $F$ , Н;

$\alpha_0 = 10^{-6}$  м/с<sup>2</sup> – пороговое значение виброускорения;  $F_0 = 1$  Н), измеренного в зоне геометрического центра пластины у пересечения элементов подкрепляющего набора. Возбуждение пластины осуществлялось с использованием вибромолотка с датчиком силы.

В приведенном на рисунке 2 (кривая 1) низкочастотном спектре  $A/F$  при отсутствии РПВ наблюдается ряд максимумов; наиболее заметные зарегистрированы на частотах 95,8; 360,5 и 388,5 Гц. Измерения показали, что указанные частоты совпадают с собственными частотами первых форм изгибных колебаний всей подкрепленной пластины.

Коэффициент потерь  $\eta$  колебательной энергии в пластине на указанных частотах, определенный по формуле  $\Delta f_p/f_p$  ( $\Delta f_p$  – ширина резонансного максимума на уровне -3 дБ от его наибольшего значения), оказался практически одинаковым и равным примерно 0,014.

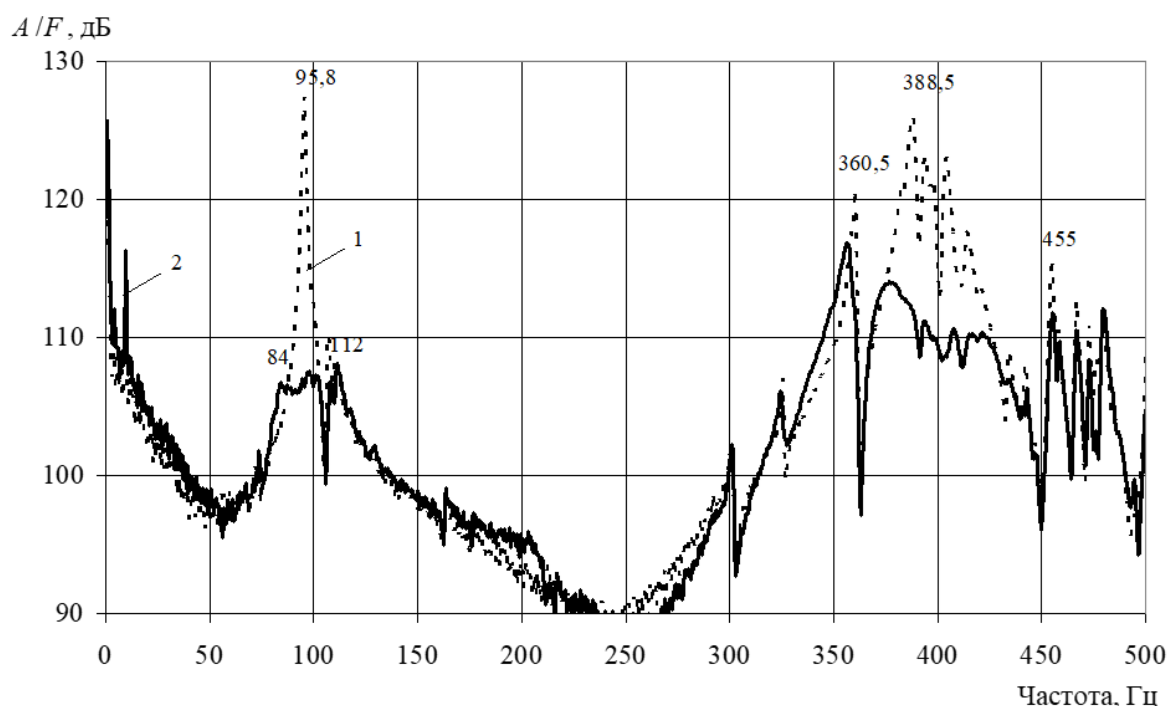


Рисунок 2 – Узкополосные спектры входной вибровозбудимости пластины при отсутствии (1) и при наличии РПВ с армирующим слоем покрытия толщиной  $h_A = 2$  мм (2)

Для достижения наибольшей эффективности уменьшения уровней  $A/F$ , дБ, на низшей резонансной частоте колебаний пластины, размеры РПВ определялись с учетом настройки на указанную частоту низшей резонансной частоты  $f_1$  изгибных колебаний вибропоглотителя.

Оценка  $f_1$  наиболее малогабаритных испытанных вибропоглотителей с основным элементом в виде полоски (соотношение длины пластинки к ее ширине не менее чем в 2,5 раза) осуществлялась в предположении малого влияния АВП на их инерционно-жесткостные характеристики. Вычисление частоты  $f_1$  колебаний одинаковых участков длиной  $l$  между креплением РПВ и его короткими кромками выполнялось с использованием следующей формулы для низшей резонансной частоты колебаний полосы (стержня) с одной жестко закрепленной короткой кромкой:

$$f_1 = \alpha_1 \sqrt{\frac{B}{ml^4}}, \quad (2)$$

где  $\alpha_1$  – безразмерный коэффициент, зависящий от вида механического крепления полосы к демпфируемой конструкции, принимался равным 0,57;  $B$  и  $m$  – изгибная жесткость  $Eh^3b/12$  и масса единицы длины  $\rho hb$  полосы ( $b \leq l/2,5$  – ширина полосы,  $E$  и  $\rho$  – модуль Юнга и плотность ее материала).

При длине  $l$  участка РПВ, равной расстоянию (0,16 м) между высокими подкреплениями, толщина:

$$h = \frac{f_1 l^2 \sqrt{12}}{a_1 c_{\text{пр}}}, \quad (3)$$

где  $c_{\text{пр}}$  – скорость продольных волн в стали, 5000 м/с основной полосы ( $b \leq 0,065$  м) вибропоглотителей оказалась равной  $3 \cdot 10^{-3}$  м.

Были испытаны 15 РПВ, имеющих общую ( $2l$ ) длину 0,32 м и толщину основной пластинки или полосы ( $b \leq l/2,5$ )  $h = 3 \cdot 10^{-3}$  м.

Влияние на эффективность РПВ толщины  $h_A$  армирующего слоя покрытия исследовалось с использованием двух групп вибропоглотителей со значениями  $h_A$ , равными 0,18; 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 мм в каждой группе. Ширина вибропоглотителей одной группы равнялась 0,065 м и удовлетворяла условию, что основная пластинка их участков является полоской, а значение ширины вибропоглотителей другой группы составляло 0,12 м и условию  $b \leq l/2,5$  не удовлетворяло. Все РПВ по соотношению их общей ( $2l$ ) длины к ширине являлись полосами.

Определенные экспериментально значения низшей резонансной частоты  $f_1$  и коэффициента потерь  $\eta_1$  колебательной энергии вибропоглотителей определялись при их установке на диск из стали, имеющий диаметр 0,41 м и толщину 40 мм. При возбуждении диска виброшумом были выполнены измерения частотного спектра переходной вибровозбудимости  $A/F$ , дБ, одной из коротких кромок основной пластинки каждого испытанного РПВ.

Анализ измеренных спектров  $A/F$ , дБ, показал, что облицовка основной пластинки РПВ вибропоглощающим покрытием с разной толщиной армирующего слоя приводит к следующим изменениям вибрационных характеристик:

- уменьшение частоты  $f_1$  низшего резонансного максимума от значения  $\sim 102$  Гц при  $h_A = 0,18$  мм до мало отличающихся, близких к  $f_{11}$  значений  $\sim 93$  Гц ( $b = 0,065$  м) и  $\sim 96$  Гц ( $b = 0,12$  м) при больших толщинах армирующего слоя покрытия;

- последовательное снижение с повышением толщины  $h_A$  уровня резонансного максимума на величину от  $\sim 7$  дБ при  $h_A = 0,18$  мм до 20 дБ ( $b = 0,065$  м) и 24 дБ ( $b = 0,12$  м) при  $h_A = 2,0$  мм;

- рост коэффициента потерь  $\eta_1$  колебательной энергии РПВ от значения 0,01 при отсутствии покрытия до практически одинаковых значений примерно 0,05; 0,09; 0,08; 0,09 и 0,10 в обеих группах РПВ при толщинах  $h_A$ , равных 0,18; 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 мм соответственно;

- появление при всех значениях  $h_A$  дополнительного к  $f_1 \approx f_p$ , с меньшей частотой, резонансного максимума, обусловленного с высокой вероятностью взаимодействием входящих в РПВ элементов между креплением и короткими кромками; негативное влияние на вибрацию демпфируемой пластины колебаний РПВ на частоте дополнительного максимума не обнаружено.

### 3 Результаты измерений эффективности РПВ

Установка даже малогабаритных вибропоглотителей на демпфируемые конструкции, особенно с креплением в пучности формы колебаний гасимого резонансного максимума, приводит к изменению инерционно-жесткостных свойств конструкции и к появлению в спектрах ее вибрации двух, а иногда большего числа максимумов, смещенных от частоты гасимого. Под условной эффективностью  $\mathcal{E}$ , дБ, РПВ нами будет подразумеваться разница уровня гасимого максимума на низшей резонансной частоте  $f_{11}$  демпфируемой пластины при отсутствии на ней РПВ и уровня возникающего при его установке смещенного по частоте от  $f_{11}$  наибольшего максимума.

Зависимости эффективности вибропоглотителей первой и второй групп от толщины  $h_A$  пластинки армирующего слоя покрытия приведены на рисунке 3. Изображенные точками результаты измерений соединены линиями 1 и 2. Обращаясь к рисунку, видим существенный, от 6–7 до 14 дБ, рост практически одинаковой в группах эффективности РПВ при увеличении толщины армирующего слоя их покрытия от 0,18 до 0,5 мм. Дальнейшее повышение толщины  $h_A$  до 1; 1,5 и 2,0 мм приводит к последовательному росту эффективности до 16, 17 и 18 дБ только вибропоглотителей второй группы. Эффективность РПВ первой группы с теми же толщинами  $h_A$  оказывается практически такой же, как у вибропоглотителей со значением  $h_A = 0,5$  мм. Учитывая ранее приведенные одинаковые значения коэффициента потерь  $\eta_1$  вибропоглотителей с одинаковыми толщинами  $h_A$  в группах, можно предположить, что повышенная эффективность РПВ с размерами в плане  $0,32 \times 0,12$  м обусловлена их большей массой, чем у вибропоглотителей первой группы с меньшей шириной, удовлетворяющей условию  $b \leq l/2,5$ .

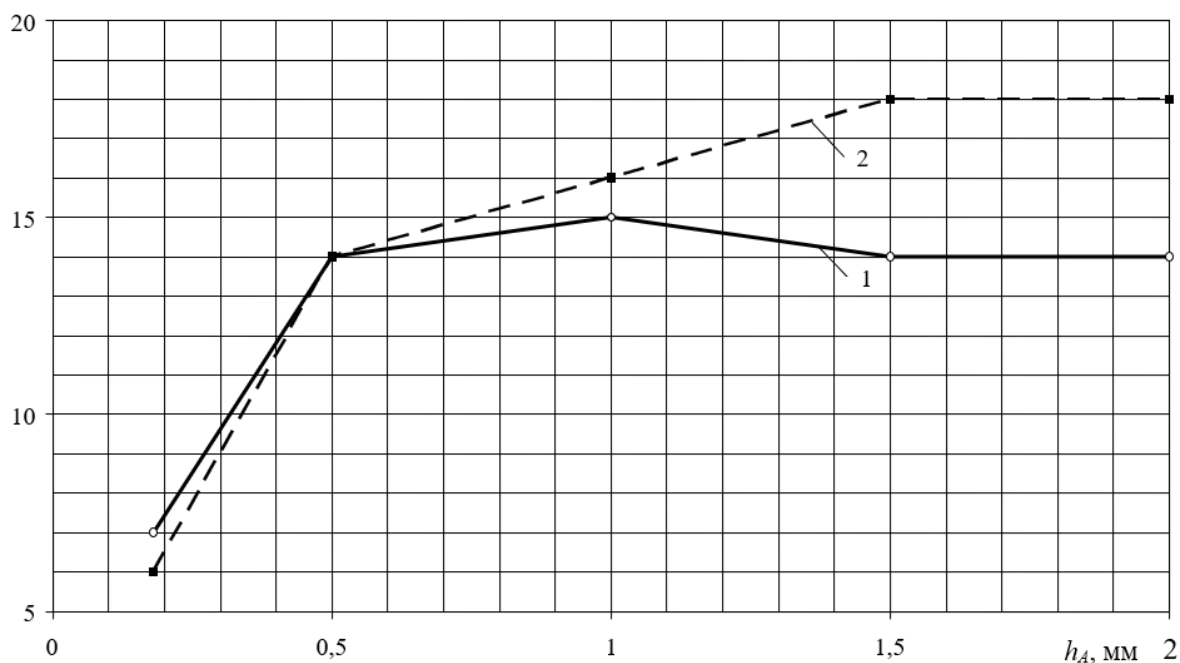


Рисунок 3 – Эффективность вибропоглотителей первой (кривая 1) и второй (кривая 2) групп в зависимости от толщины  $h_A$  армирующего слоя покрытия

Размещение на подкрепленной пластине РПВ привело к значительному увеличению в ней потерь колебательной энергии. Значения коэффициента  $\eta$  пластины на низшей резонансной частоте ее колебаний в сравнении со значением при их отсутствии выросли не менее чем в 5 раз. При увеличении толщины армирующего слоя  $h_A$  покрытия

от 0,18 до 2 мм значения  $\eta$  пластины при установке на нее РПВ первой и второй групп последовательно повысились от одинаковой величины  $\sim 0,05$  до  $\sim 0,1$  и  $\sim 0,15$  соответственно.

Отметим, что уменьшение уровней вибрации вибропоглотителями обеих групп наблюдалось не только на низшей резонансной частоте  $f_{11}$  пластины, но и на ее более высоких резонансных частотах.

В качестве примера на рисунке 2 представлены узкополосные спектры входной вибровозбудимости пластины в частотном диапазоне до 500 Гц при отсутствии (1) и наличии РПВ с шириной 0,12 м и толщиной  $h_A = 2$  мм. Полученная эффективность вибропоглотителя на частотах 360,5 и 388,5 Гц с наиболее высокими уровнями  $A/F$  составила примерно 3 и 14 дБ соответственно.

### Заключение

Из полученных в работе результатов выделим наиболее значительные:

- представлена осуществимость снижения уровней низкочастотных дискретных составляющих в спектре вибрации пластины малогабаритным резонансным вибропоглотителем, установленным на ее подкрепляющий элемент;
- практически реализовано заметное (14–18 дБ) уменьшение уровней низшего резонансного максимума изгибных колебаний подкрепленной пластины резонансным вибропоглотителем, имеющим массу не более  $\sim 2\%$ ;
- выявлены зависимости эффективности малогабаритного РПВ от толщины армирующего слоя покрытия на полосовом и пластинчатом основном элементе вибропоглотителя.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке малогабаритных средств вибродемпфирования, уменьшающих вибрации и шумоизлучение подкрепленных конструкций в широком частотном диапазоне, включающем их низшие резонансные частоты.

### Список использованных источников

1. Никифоров А.С. Акустическое проектирование судовых конструкций Справочник. – Л. : Судостроение, 1990. – 198, [1] с. ил.; 22. – ISBN 5-7355-0188-7.
2. Никифоров А.С. Вибропоглощение на судах. – Ленинград : Судостроение, 1979. – 184 с. ил.; 21.
3. Алексеев С.А., Сятковский А.И. Вибродемпфирующие свойства полимерных пленок // Судостроение. 2015. Вып. 6. С. 45–46.
4. Кирпичников В.Ю., Петров А.А., Олейников А.Ю. Экспериментальные исследования эффективности пластинчатых (полосовых) вибропоглотителей // Noise Theory and Practice. 2022. V. 8, № 3, pp. 7-15.
5. Кирпичников В.Ю. Вибродемпфирование инженерных конструкций. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2025. 259 с.

### References

1. Nikiforov A.S. Acoustic design of ship structures Directory. – L. : Shipbuilding, 1990. – 198, [1] p.; 22. – ISBN 5-7355-0188-7.

2. Nikiforov A.S. Vibration absorption on ships. – Leningrad: Shipbuilding, 1979. – 184 p.; 21.
3. Alekseev S.A., Syatkovsky A.I. Vibro-damping properties of polymer films // Shipbuilding. 2015. № 6. pp. 45–46.
4. Kirpichnikov V.Yu., Petrov A.A., Oleinikov A.Yu. Investigations of the effectiveness of resonant plate (band) vibration dampers. Noise Theory and Practice. 2022. V. 8, № 3 pp. 7-15.
5. Kirpichnikov V.Yu.. Vibration Absorption on Ships and Engineering Structures. SPb.: Federal State Unitary Enterprise ‘State Scientific Center Krylovsky’, 2025, 259 p.

УДК: 621.9  
OECD: 1.03 AA  
DOI: 10.56408/2412-8627.2026.12.2.007

## Экспериментальные исследования виброакустических характеристик гаммы расточных станков

Стуженко Н.И.

К.т.н., доцент кафедры «Строительство и техносферная безопасность»,  
Донской государственной технической университет, Институт сферы обслуживания  
и предпринимательства (филиал) ДГТУ в г. Шахты, РФ

### Аннотация

В статье представлены результаты экспериментальных исследований виброакустических характеристик станков расточной группы, включающих горизонтально-расточные, отделочно-расточные, координатно-расточные и алмазно-расточные станки различных компоновок. Измерения уровней звука проводились в условиях производственной эксплуатации при выполнении операций сверления, растачивания, зенкерования и нарезания резьбы. На основе анализа полученных данных вся гамма станков разделена на шесть групп по уровням создаваемого шума. В ходе экспериментов выявлены закономерности распределения уровней звука в зависимости от типа станка, вида технологической операции, мощности привода главного движения и режимов резания. Полученные результаты могут быть использованы для разработки мероприятий по снижению шума на рабочих местах операторов расточных станков.

**Ключевые слова:** экспериментальные исследования, расточные станки, уровни звука, сверление, растачивание

## *Experimental studies of vibroacoustic characteristics of a range of boring machines*

*Stuzhenko N.I.*

*Ph.D., Associate Professor of the Department of Construction and Technosphere Safety,  
Don State Technical University, Institute of Service Sector and Entrepreneurship (branch)  
of DSTU in Shakhty, Russia*

### **Abstract**

*This article presents the results of experimental studies of the vibroacoustic characteristics of boring machines, including horizontal boring machines, finishing boring machines, jig boring machines, and diamond boring machines of various configurations. Sound level measurements were conducted under production conditions during drilling, boring, countersinking, and thread cutting operations. Based on an analysis of the obtained data, the entire range of machines was divided into six groups based on noise levels. The experiments revealed patterns in the distribution of sound levels depending on the machine type, the type of technological operation, the power of the main drive, and the cutting modes. The obtained results can be used to develop noise reduction measures in the boring machine operator workstations.*

**Keywords:** *experimental studies, boring machines, sound levels, drilling, boring*

## Введение

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию виброакустических характеристик широкой гаммы расточных станков, эксплуатируемых на машиностроительных предприятиях. Экспериментальные исследования уровней шума и вибрации проводились на горизонтально-расточных, отделочно-расточных для горизонтальной и вертикальной компоновки изделий, координатно-расточных, алмазно-расточных станков одно и двусторонней компоновки, а также специальных станков в условиях их реальной эксплуатации на предприятиях. На этих станках реализуется обработка отверстий в корпусных деталях для операций растачивания, сверления, зенкерования и нарезания резьбы. Следует отметить, что при зенкеровании и нарезании резьбы при токарной обработке уровни шума и вибрации значительно ниже, чем при сверлении и, в особенности, при растачивании вследствие малых скоростей резания и амплитуд силового воздействия. Поэтому анализ закономерностей формирования виброакустических характеристик выполнен для операций сверления и растачивания. На вышеуказанной гамме станков обрабатывается широкая номенклатура, отличающаяся габаритными размерами, массами, а также параметрами режимов резания, такими как глубина, скорости резания и подачи, что существенно влияет на разброс акустических и вибрационных характеристик. Поэтому на первом этапе экспериментальных исследований измерялись только уровни звука (дБА) для различных условий реализации технологических процессов растачивания и сверления [1], [2].

Актуальность темы обусловлена тем, что расточные станки относятся к категории металлорежущего оборудования, работающего, как правило, в условиях интенсивных режимов резания, что сопровождается генерацией высоких уровней шума и вибрации, оказывающих неблагоприятное воздействие на операторов и окружающую производственную среду. В связи с ужесточением санитарно-гигиенических нормативов и переходом к концепции «зеленого» производства задача снижения шумности станочного парка приобретает первостепенное значение. Однако для разработки эффективных мероприятий по снижению шума необходимо располагать достоверными данными об источниках, уровнях и спектрах акустического излучения, полученными в реальных условиях эксплуатации.

## 1 Методика проведения исследований

Методика проведения экспериментальных исследований предусматривала выбор типовых представителей расточного оборудования, охватывающих все основные компоновочные схемы и размерные группы. Объектами измерений стали горизонтально-расточные станки моделей 2А620Ф1, 2А691, 2А692, отделочно-расточные станки моделей 285, 2А78Н, 2А710, координатно-расточные станки моделей 2421, 2431, 2Д450, 2Е440А, а также алмазно-расточные станки 278 и 280. Общее количество обследованных единиц оборудования составило несколько десятков экземпляров, что обеспечило репрезентативность выборки.

Измерения уровней звука проводились в условиях реальной производственной эксплуатации на предприятиях при выполнении различных технологических операций: сверления, растачивания, зенкерования и нарезания резьбы. Использовалась стандартная измерительная аппаратура, включающая прецизионные шумомеры с октавными фильтрами. Точки измерений располагались в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.050-86 на расстоянии 1 м от контуров оборудования и на высоте 1,5 м от уровня пола, что соответствует положению органов слуха оператора. Дополнительно проводились измерения в ближнем поле для локализации основных источников шума.

Регистрация параметров режимов резания осуществлялась по показаниям встроенных датчиков и данных технологической документации [3]-[5].

## 2 Результаты исследований

Результаты измерений показали, что уровни звука, создаваемые расточными станками, варьируются в широком диапазоне. На основании статистической обработки массива экспериментальных данных вся обследованная гамма станков может быть разделена на шесть групп по величине порождаемого шума. В первую группу попадают расточные станки, уровень шума которых не превышает 80 дБА, то есть находится в допустимых пределах. Вторую группу составляют станки, издающие звук в диапазоне от 80 до 85 дБА. К третьей издающие звук в диапазоне от 85 до 90 дБА, четвертой – от 90 до 95 дБА, пятой – от 95 до 100 дБА. Шестая группа - это станки, генерирующие шум более 100 дБА. Анализ частотных спектров показал, что максимум акустической энергии приходится на средне- и высокочастотные октавные полосы с частотами от 500 до 8000 Гц, что наиболее неблагоприятно с точки зрения слухового восприятия [6], [7].

Сопоставление полученных значений с требованиями гигиенических нормативов СанПиН 1.2.3685-21 выявило, что лишь в 5-15 % случаев уровни звука не превышают предельно допустимых значений (80 дБА). В остальных 85-95 % случаев фиксируется превышение нормативных уровней. Причем наибольшие превышения – от 19 до 26 дБА – зарегистрированы при выполнении операций чернового и получистового растачивания на станках большой мощности (от 37 до 55 кВт). Превышение на 15-18 дБА характерно для отделочно-расточных станков при обработке точных отверстий в корпусных деталях, а на 10-14 дБА – для координатно-расточных станков при выполнении ответственных операций.

По результатам измерений уровней звука гамма обследованных станков разбита на шесть групп. В частности, в первую группу, гистограмма распределения уровней приведена на рисунке 1, вошли следующие модели: 278 и 280 алмазно-расточного станки, а также координатно-расточные 2421, 2431, 2Д450.

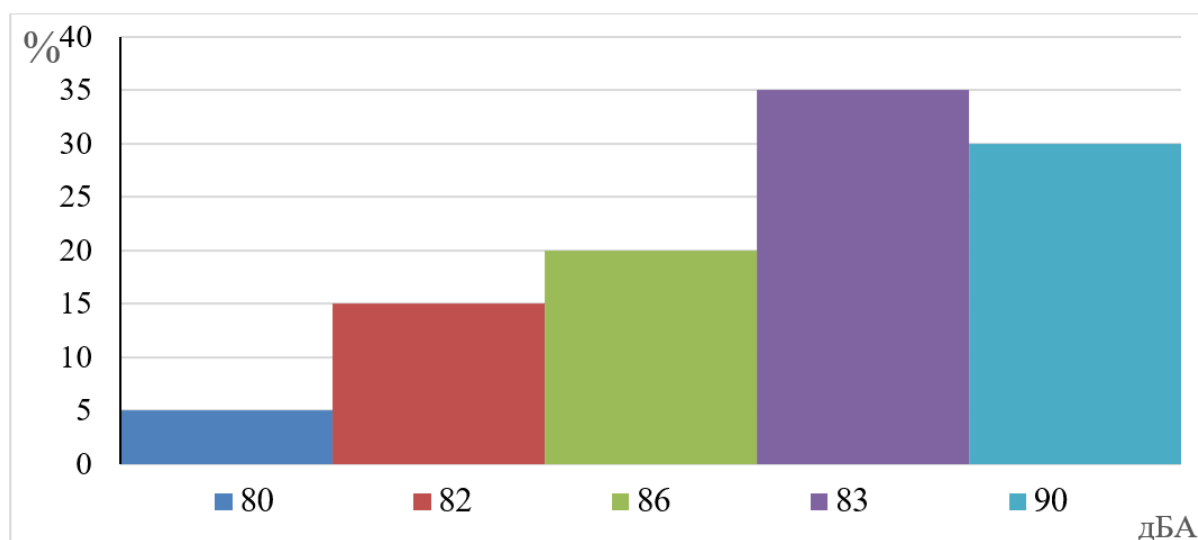


Рисунок 1 – Распределение уровней звука станков 1 группы

Фактически только 5 % ситуаций реализации технологических процессов уровни звука соответствуют предельно-допустимым значениям. В 15% ситуаций величины превышения уровней звука составляют 2 дБ, что соответствует погрешности проведения

эксперимента. В 20 % ситуаций уровни звука достигают значения 86 дБ дБА, что на 6 дБА превышает допустимое значение. Важно подчеркнуть, что эти данные относятся к сверлению отверстий диаметром 10 мм. Наиболее высокие показатели шума наблюдаются именно при сверлильных работах: в 35% вариантов уровень достигает 83 дБА, а в 30% – 90 дБА, что превышает предельно допустимые значения на 8 и 10 дБА соответственно.

Вторая группа включает горизонтально-расточные станки 2М615, отделочно-расточные с горизонтальным расположением шпинделя 2705, 2706, 2711, 2712, 2713, 2714; отделочно-расточные в вертикальном расположении шпинделя 2776, 2777, 2Е470. Гистограмма распределения уровней звука приведена на рисунке 2.

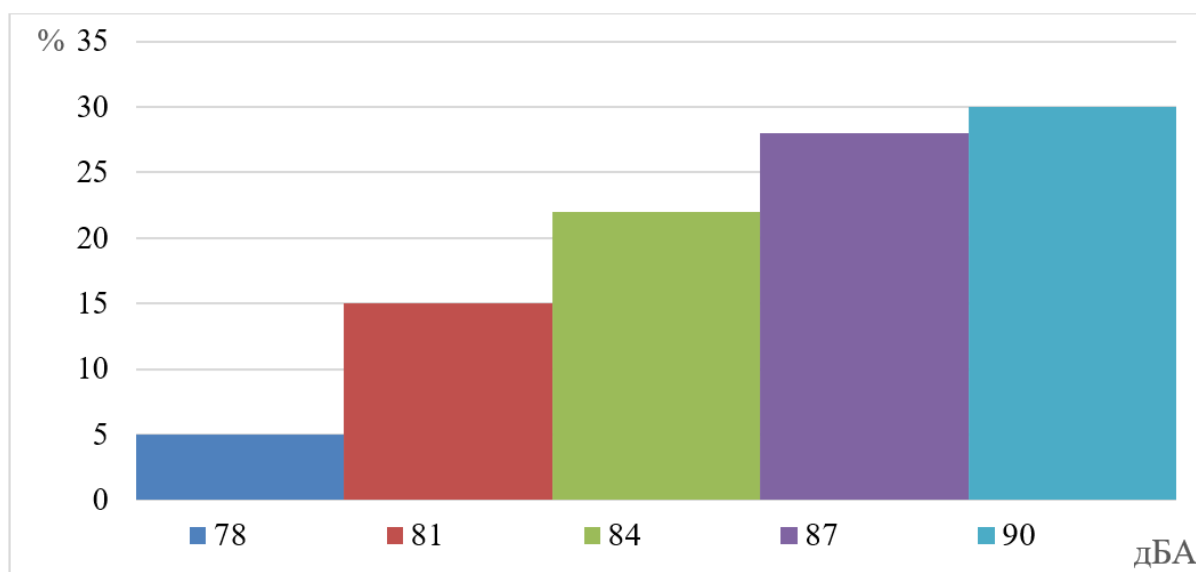


Рисунок 2 – Распределение уровней звука станков 2 группы

Аналогично приведенным выше данным измерений, для станков 2 группы только 5% реализаций технологических процессов уровни звука не превышают предельно допустимой величины. Следует отметить, что эти результаты получены при зенкеровании и нарезании резьбы, поскольку эти процессы выполняются при невысоких оборотах режущего инструмента. В 15 % случаев уровни звука достигают значений 84 дБА и, как в вышеуказанной 1 группе, что создается при сверлении заготовок. При выполнении расточных работ уровни звука достигают величин 87 дБА в 22% ситуаций, 90 дБА в 28% ситуаций и 93 дБА в 30% ситуаций. Таким образом, 80% ситуаций превышения уровней звука составляют 87-93 дБ и максимальным значениям (10-13 дБА) соответствуют 58%.

В третью группу входят горизонтально-расточные станки моделей 2622, координатно-расточный 2Е450 и двухсторонние алмазно-расточные модели 2706, 2А715, 2708, 2712, 2А716 и 2792. Распределение уровней звука отражено на рисунке 3. Для данной группы станков результаты измерений показали, что уровни звука превышают допустимое значение на 4-16 дБА. Лишь в 10% случаев уровни звука превышают 4 дБА, 15% ситуаций соответствуют превышению до 7 дБА, причем это соответствует процессу сверления, при котором превышение уровней звука достигает 4-5 дБА. В 55% ситуаций реализации процесса расточки зафиксированы превышения уровня звука 10-16 дБА, причем в 30% случаев превышения составляют 8-10 дБА, а в 25% – 13-16 дБА.

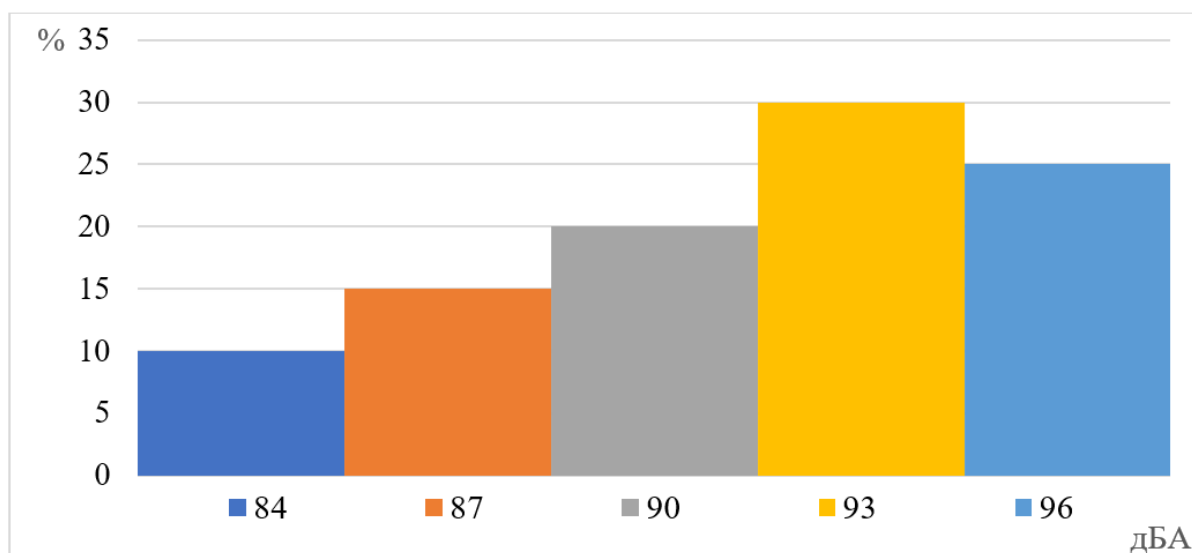


Рисунок 3 – Распределение уровней звука станков 3 группы

В четвертую группу входят станки горизонтально расточные моделей 2А620, 2Н614, 2620 мощность главного привода которых составляет от 8,3 до 11 кВт. Гистограмма распределения уровней звука приведена на рисунке 4.

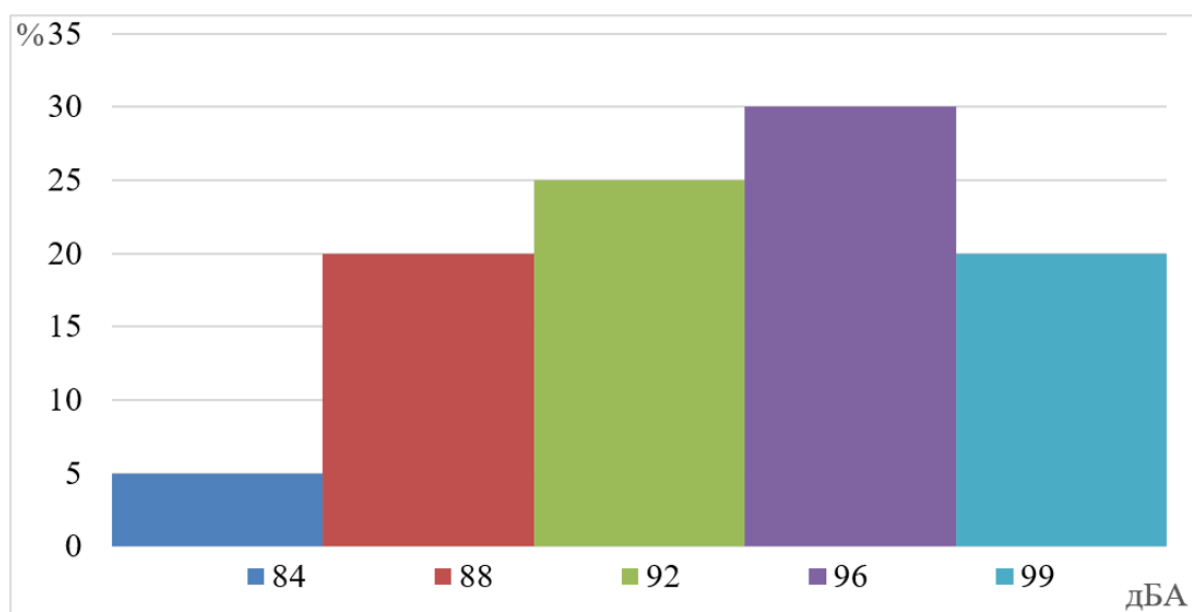


Рисунок 4 – Распределение уровней звука станков 4 группы

Для станков данной группы установлен разброс уровней звука в диапазоне 4-19 дБА. По процентному соотношению установлены следующие закономерности: в 5% ситуаций превышение составляет до 4 дБА, до 8 дБА – 20%, до 92 дБА – 25%, до 96 дБА – 30%, до 99 дБА – 20%. Следует отметить, что в 75% ситуациях уровни звука превышают предельно-допустимое значение на 10-19 дБА, что соответствует процессам растачивания. При сверлении уровни звука достигают значений 84-86 дБА, что соответствует превышению до 6 дБА.

В пятую группу станков входят горизонтально-расточные станки моделей 2636, 2637 и 2Е656, мощность привода главного движения которых составляет 19 кВт. Распределение уровней звука приведено на рисунке 5.

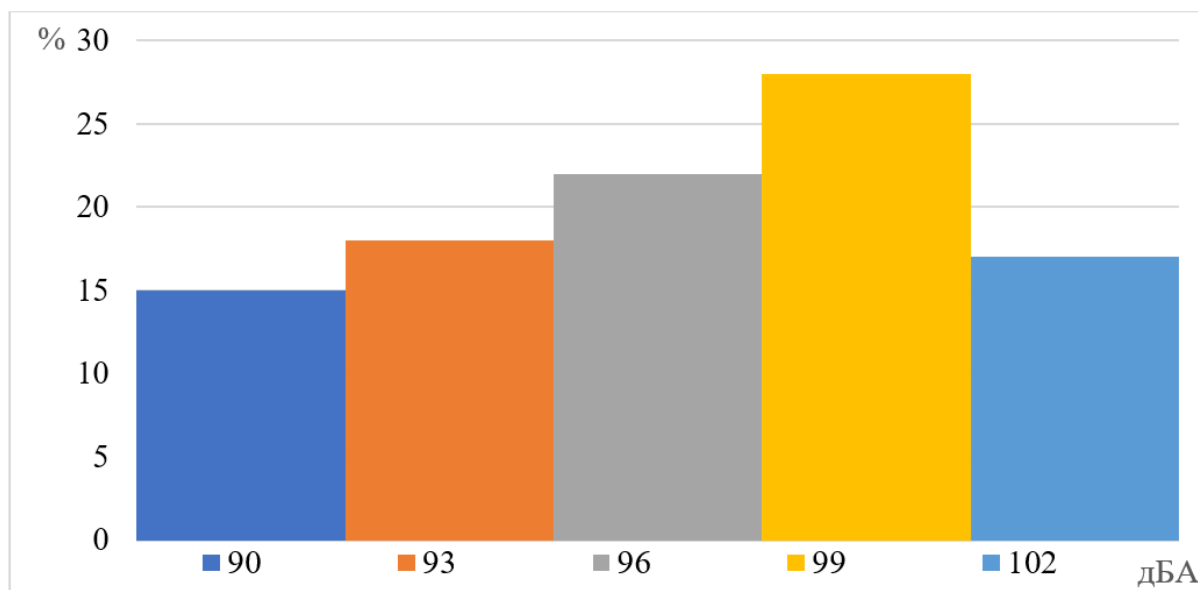


Рисунок 5 – Распределение уровней звука станков 5 группы

Диапазон превышений уровней звука составляет 7-22 дБА. До 10 дБА превышения зафиксированы в 15% ситуаций, до 13 дБА в 18%, до 16 дБА в 22%, до 19 дБА 28% и до 10 дБА в 17% ситуаций. Причем все вышеуказанные закономерности соответствуют процессам растачивания.

В шестую группу входят горизонтально расточные станки большой мощностью 2650, 2651 (мощность привода 37 кВт) и 2Б660 (мощность привода 55 кВт). Несмотря на значительные различия, в мощностях уровни звука данных станков практически равны, поскольку их соотношение по критерию:

$$\frac{N_1 n_1}{N_2 n_2} = \frac{800 \cdot 37}{510 \cdot 55} = 1,05(1)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – мощность привода станков 2651 и 2Б660, кВт соответственно;  $N_1$  и  $N_2$  – частоты вращения шпинделя,  $\text{мин}^{-1}$ .

Это объясняется конструктивными особенностями и режимами работы. Станок 2Б660, обладая более мощным приводом, работает при пониженных оборотах шпинделя ( $510 \text{ мин}^{-1}$ ), что смещает спектр шума в низкочастотную область, тогда как 2651 с меньшей мощностью (37 кВт) развивает  $800 \text{ мин}^{-1}$ , генерируя более высокочастотные вибрации. В результате интегральные уровни звукового давления оказываются сопоставимыми, хотя субъективно характер шума различен. Расчет по формуле (1) показывает, что разница в акустической энергоэффективности не превышает 5%, что находится в пределах погрешности измерений.

Гистограмма распределения уровней звука приведена на рисунке 6.

Уровни звука вышеуказанных станков достигают 106 дБА, что на 26 дБА превышает предельно допустимые величины. Следует отметить, что в 15% ситуаций уровни звука достигают 106 дБА, в 20 % 103 дБА (что на 23 дБА превышает допустимое значение), в 25% ситуаций до 100 дБА, в 15% – 97дБА, в 12% 94 – дБА, в 8% – 91 дБА и 5% – 88 дБА. Максимальные уровни, превышающие допустимое значение на 10-26 дБА, создаются в 93% ситуациях реализации технологических процессов растачивания для данной группы.

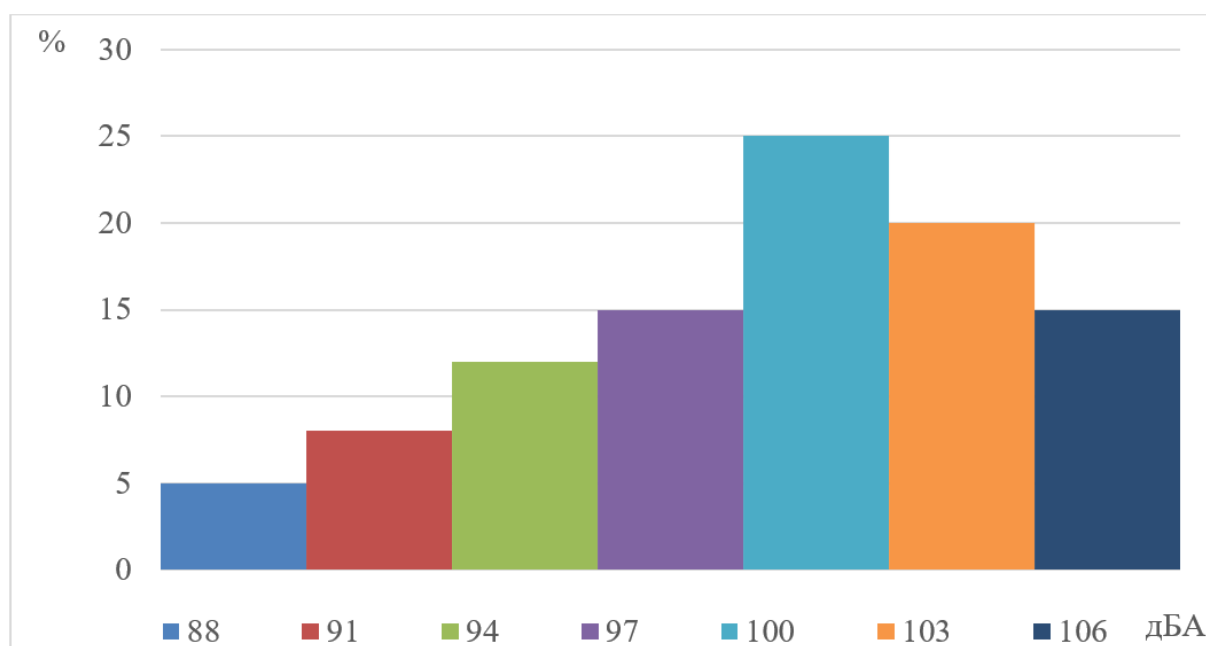


Рисунок 6 – Распределение уровней звука станков 6 группы

### Заключение

Таким образом, результаты экспериментальных исследований закономерностей распределения уровней звука в процессе эксплуатации гаммы расточных станков, показали, что фактически только не более, чем в 15% ситуаций уровни звука превышают допустимые значения до 8 дБА и это соответствует операциям сверления. Наиболее высокие уровни звука, превышающие предельно-допустимую величину до 26 дБА создаются при операциях растачивания [8]-[10].

Результаты работы могут быть использованы для оценки шумности эксплуатируемого оборудования, выбора рациональных режимов резания с точки зрения акустической безопасности, а также для разработки мероприятий по снижению шума на рабочих местах операторов расточных станков. Таким образом, экспериментальное исследование подтвердило нелинейный характер виброакустических процессов в расточных станках и их прямую зависимость от конструктивных особенностей.

### Список использованных источников

1. Баланова, М. В. Методика и техническое обеспечение проведения экспериментальных исследований по определению шума на рабочих местах / М.В. Баланова, Т.А. Финоченко, И.А. Яицков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 1(46). – С. 5-7. – ISSN 1818-5509

2. Финоченко, Т.А. Методика проведения экспериментальных исследований шума прутковых токарных автоматов / Т. А. Финоченко // Инновационные технологии в машиностроении и металлургии : Материалы IV Международной научно-практической конференции, Ростов-на Дону, 05-07 сентября 2012 года. – Ростов-на Дону: Донской государственный технический университет, 2012. – С. 263-268.

3. Стуженко, Н. И. Исследования и анализ закономерностей формирования акустических характеристик несущей системы станков расточной группы /

Н. И. Стуженко, А. Е. Шашурин, А. Н. Чукарин // *Noise Theory and Practice*. – 2025. – Т. 11, № 4(43). – С. 275-281.

4. Набоков, А.Е. Экспериментальные исследования шума на рабочих местах станочников резьбообрабатывающих и шлицефрезерных станков / А. Е. Набоков // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2023. – № 5. – С. 77-84. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-5-77-78.

5. Морозов, С.А. Экспериментальные исследования шума и вибрации при местном упрочнении деталей шарико-стержневым упрочнителем / С.А. Морозов, А.Н. Чукарин, Т.А. Финоченко // *Мониторинг. Наука и технологии*. – 2019. – № 1(39). – С. 65-69. – DOI 10.25714/MNT.2019.39.009.

6. Стуженко, Н. И. Анализ акустических характеристик при растачивании деталей типа колец / Н. И. Стуженко, А. Н. Чукарин, Т. А. Финоченко // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2024. – № 9. – С. 239-243. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-9-240-241.

7. Яицкова, Н. М. Снижение шума металлорежущих станков / Н. М. Яицкова, Т. А. Финоченко, И. Г. Переверзев // *Труды Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2020. – № 2(51). – С. 112-115.

8. Borisova A.V., Finochenko T.A., Finochenko V.A. The Use of the Expert Method in Solving the Issues of Choosing the Instrumentation of the Procedure for Controlling Production Factors. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; IOP Publishing* ([Bristol, UK], England) – 2021. Vol. 666, № 2. DOI:10.1088/1755-1315/666/2/022022.

9. Theoretical study of the vibration excitation and noise generation processes of the grinding wheels of thread and spline grinding machines / Kurchenko P.S., Shashurin A.E., Razakov Zh.P., Chukarin A.E. // *AKUSTIKA*. 2021 Vol. 39. С.175-178. DOI 10.36336/akustika202139173.

10. Исаев, А.Г. Исследования виброакустических характеристик в рабочей зоне оператора при абразивной обработке сварных швов / Чукарин А.Н., Бескопыльный А.Н., Исаев А.Г. // *Безопасность труда в промышленности*. 2019. – № 11 – С. 7-12. – DOI: 10.24000/0409-2961-2019-11-712.

## References

1. Balanova, M. V. Methodology and technical support for conducting experimental studies to determine noise in the workplace / M. V. Balanova, T. A. Finochenko, I. A. Yaitskov // *Proceedings of the Rostov State Transport University*. - 2019. - No. 1. - Pp. 5-7.

2. Finochenko, T. A. Methodology for conducting experimental studies of the noise of bar turning machines / T. A. Finochenko // *Innovative technologies in mechanical engineering and metallurgy: Proceedings of the IV International scientific and practical conference, Rostov-on-Don, September 5–7, 2012*. – Rostov-on-Don: Don State Technical University, 2012. – Pp. 263-268.

3. Stuzhenko, N. I. Research and analysis of patterns of formation of acoustic characteristics of the supporting system of boring machine tools / N. I. Stuzhenko, A. E. Shashurin, A. N. Chukarin // *Noise Theory and Practice*. - 2025. - Vol. 11, No. 4 (43). - Pp. 275-281.

4. Nabokov, A.E. Experimental studies of noise at the workplaces of thread-processing and spline-milling machine operators / A. E. Nabokov // *Bulletin of Tula State University. Technical sciences*. - 2023. - No. 5. - Pp. 77-84. - DOI 10.24412/2071-6168-2023-5-77-78.

5. Morozov, S. A. Experimental studies of noise and vibration during local hardening of parts with a ball-and-rod hardener / S. A. Morozov, A. N. Chukarin, T. A. Finochenko

// Monitoring. Science and Technology. - 2019. - No. 1 (39). - Pp. 65-69. - DOI 10.25714/MNT.2019.39.009.

6. Stuzhenko, N. I. Analysis of acoustic characteristics during boring of ring-type parts / N. I. Stuzhenko, A. N. Chukarin, T. A. Finochenko // Bulletin of Tula State University. Technical sciences. - 2024. - No. 9. - Pp. 239-243. - DOI 10.24412/2071-6168-2024-9-240-241.

7. Yaitskova, N. M. Noise reduction of metal-cutting machines / N. M. Yaitskova, T. A. Finochenko, I. G. Pereverzev // Transactions of Rostov State Transport University. - 2020. - No. 2 (51). - Pp. 112-115.

8. Borisova A.V., Finochenko T.A., Finochenko V.A. The Use of the Expert Method in Solving the Issues of Choosing the Instrumentation of the Procedure for Controlling Production Factors. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; IOP Publishing ([Bristol, UK], England) – 2021. Vol. 666, No. 2. DOI:10.1088/1755-1315/666/2/022022.

9. Theoretical study of the vibration excitation and noise generation processes of the grinding wheels of thread and spline grinding machines / Kurchenko P.S., Shashurin A.E., Razakov Zh.P., Chukarin A.E. // AKUSTIKA. 2021 Vol. 39. P.175-178. DOI 10.36336/akustika202139173.

10. Isaev, A.G. Research of vibroacoustic characteristics in the operator's working area during abrasive processing of welded seams / Chukarin A.N., Beskopylny A.N., Isaev A.G. // Occupational safety in industry. 2019. - No. 11 - P. 7-12. - DOI: 10.24000/0409-2961-2019-11-712.

УДК: 534.2, 504.064

OECD: 1.03

DOI: 10.56408/2412-8627.2026.12.2.008

## Сравнительный анализ отечественных и зарубежных методик учёта метеорологических факторов при прогнозировании акустического загрязнения

Себурев А.В.

Аспирант, кафедра Е5, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

### Аннотация

В статье сопоставляются подходы к прогнозированию акустического загрязнения, закрепленные в российских (ГОСТ 31295.2-2005) и европейских (CNOSSOS-EU) нормативах. Актуальность исследования определяется значительными погрешностями (до 15-20 дБА), к которым приводит применение отечественных детерминированных методик в сложных метеоусловиях, характерных для климата РФ. Цель – выявить методологические ограничения российского стандарта и обосновать необходимость его гармонизации с передовой зарубежной практикой. С помощью системного анализа и численного моделирования на эталонных волновых моделях продемонстрировано, что упрощения в ГОСТ 31295.2 не дают корректно описать ветровую рефракцию. Это приводит к переоценке уровня шума в зоне акустической тени и недооценке его при попутном ветре. Сделан вывод о перспективности адаптации вероятностного подхода CNOSSOS-EU для повышения точности и достоверности прогнозов при проектировании санитарно-защитных зон.

**Ключевые слова:** акустическое загрязнение, санитарно-защитная зона, ветровая рефракция, ГОСТ 31295.2, CNOSSOS-EU, моделирование шума

## *Comparative analysis of domestic and foreign methods for considering meteorological factors in predicting acoustic pollution*

*Seburev A.V.*

*Ph.D. student, Department E5, D.F. Ustinov Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia*

### **Abstract**

*The article compares the approaches to acoustic pollution prediction, established in the Russian (GOST 31295.2-2005) and European (CNOSSOS-EU) regulatory frameworks. The relevance of the study is determined by significant discrepancies (up to 15-20 dB) resulting from the application of domestic deterministic methods in complex meteorological conditions, characteristic of the Russian climate. The aim is to identify the methodological limitations of the Russian standard and to substantiate the need for its harmonization with advanced foreign practices. Through systematic analysis and numerical modeling using reference wave models, it is demonstrated that the simplifications in GOST 31295.2 do not allow for a correct description of wind refraction. This leads to an overestimation of the noise level in the acoustic shadow zone and an underestimation*

in downwind conditions. A conclusion is drawn about the prospects of adapting the CNOSSOS-EU probabilistic approach to improve the accuracy and reliability of forecasts when designing sanitary protection zones.

**Keywords:** acoustic pollution, sanitary protection zone, wind refraction, GOST 31295.2, CNOSSOS-EU, noise modeling

## Введение

Акустическое загрязнение урбанизированных территорий становится все более острой проблемой в связи с ростом городов и развитием промышленных зон в непосредственной близости от жилой застройки. Обеспечение санитарно-эпидемиологического благополучия населения требует точного прогнозирования уровней шума, что является ключевой задачей при обосновании размеров санитарно-защитных зон (СЗЗ) промышленных предприятий [1], [2]. Точность таких прогнозов напрямую зависит от корректности учёта факторов, влияющих на распространение звука в атмосфере.

Ключевым фактором, определяющим дальнейшее распространение звука, является состояние атмосферного пограничного слоя. Наличие вертикальных градиентов скорости ветра и температуры приводит к явлению рефракции (искривления) звуковых лучей [3]. В условиях попутного ветра (downwind) или при температурной инверсии звуковая энергия «прижимается» к земле, создавая эффект «звукового канала» и приводя к аномальному повышению уровней шума. В условиях встречного ветра (upwind) формируется так называемая метеорологическая зона акустической тени с резким падением уровня звука [4]. Следует пояснить, что в отличие от строительной нормативной базы, где под акустической тенью понимается исключительно пространство за физическим экраном-препятствием, в атмосферной акустике данный термин обозначает область у поверхности земли, в которую не попадают прямые звуковые лучи вследствие их искривления вверх. Игнорирование этих эффектов, особенно на расстояниях свыше 500 м, может приводить к ошибкам прогнозирования, достигающим 15-20 дБА.

В отечественной практике для расчёта шума применяется ГОСТ 31295.2-2005, реализующий детерминированный подход. Он учитывает метеорологические условия через единую усреднённую поправку  $C_{met}$ , что является значительным упрощением и не позволяет адекватно моделировать сложные сценарии ветровой рефракции. В то же время, в странах Европейского Союза внедрена и утверждена единая методика CNOSSOS-EU (Common Noise Assessment Methods in Europe), основанная на вероятностном подходе. В современных зарубежных исследованиях подчеркивается, что переход на этот метод со старых детерминированных стандартов (включая ISO 9613-2, аналогичный отечественному ГОСТ) выявляет существенные различия в расчетах из-за принципиально иных моделей распространения звука и оценки его затухания поверхностью на больших расстояниях [13]. Данная методика разделяет все метеоусловия на классы (например, благоприятные и однородные) и рассчитывает долгосрочные уровни шума с учётом вероятности возникновения каждого класса, что обеспечивает более высокую физическую адекватность [6].

В результате формируется научно-техническое противоречие. С одной стороны, технологии дистанционного зондирования, как, например, лидарное сканирование, уже сегодня позволяют получать детальные вертикальные профили ветра [7], [8]. Одновременно с этим теория распространения волн в неоднородных средах также хорошо развита [9], [10]. Однако, с другой стороны, в инженерной практике продолжают доминировать нормативные методики, использующие упрощенные модели. Эти модели неспособны ассимилировать точные метеорологические данные. Такое

несоответствие снижает точность экологических экспертиз, что, в свою очередь, ведет либо к необоснованным затратам на шумозащиту, либо к повышенным рискам для здоровья населения [11], [12]. Научная новизна данной работы состоит в том, что проводится системный анализ и дается количественная оценка ограничениям отечественного норматива на фоне современных моделей.

Поэтому цель настоящей работы – сопоставить отечественный (ГОСТ 31295.2) и зарубежный (CNOSSOS-EU) подходы к учёту метеорологических факторов. Это позволит выявить ограничения российской инженерной методики и обосновать необходимость её гармонизации с передовыми вероятностными моделями.

## 1 Методологические подходы к учёту метеорологических факторов

В данном разделе проведён детальный анализ двух ключевых подходов к прогнозированию затухания звука на местности: детерминированного, закреплённого в российском стандарте ГОСТ 31295.2-2005, и вероятностного, лежащего в основе европейской методики CNOSSOS-EU.

### 1.1 Отечественный подход: детерминированная модель по ГОСТ 31295.2-2005

Российская нормативная база основывается на инженерном (энергетическом) методе, который идентичен международному стандарту ISO 9613-2. Основным принцип – расчёт долгосрочного усреднённого уровня звука  $L_{AT}(LT)$  путём введения единой поправки  $C_{met}$  на метеорологические условия к базовому расчёту, выполненному для благоприятных условий распространения (попутный ветер)  $L_{AT}(DW)$ .

Расчёт производится по формуле:

$$L_{AT}(LT) = L_{AT}(DW) - C_{met}, \quad (1)$$

где  $L_{AT}(LT)$  – долгосрочный усреднённый уровень звука на длительном интервале времени, дБА;

$L_{AT}(DW)$  – эквивалентный уровень звука, рассчитанный для благоприятных условий распространения, дБА;

$C_{met}$  – поправка на метеорологические условия, дБА.

Ключевым элементом модели является сама поправка  $C_{met}$ , которая рассчитывается эмпирически и зависит исключительно от геометрии расположения источника и приёмника. Методика разделяет все сценарии на два условия:

1. Малые расстояния (или большие высоты источника/приёмника), где влиянием метеорологии пренебрегают:

$$C_{met} = 0 \text{ при } d_p \leq 10 \cdot (h_s + h_r), \quad (2)$$

2. Значительные расстояния. В этом случае для учета метеоусловий вводится поправочный коэффициент, рассчитываемый по формуле:

$$C_{met} = C_0 \cdot [1 - 10 \cdot (h_s + h_r) / d_p] \text{ при } d_p > 10 \cdot (h_s + h_r), \quad (3)$$

где  $C_0$  – эмпирический фактор, зависящий от местных метеорологических условий (статистики ветра, температурных градиентов), дБА;

$d_p$  – проекция расстояния от источника до расчётной точки на горизонтальную плоскость, м;

$h_s$  – высота источника шума над землёй, м;

$h_r$  – высота приёмника (расчётной точки) над землёй, м.

Главным ограничением данного подхода является отсутствие строгой формулы для вычисления величины  $C_0$  в условиях РФ. Стандарт предписывает использование приближенных значений (в диапазоне от 0 до 5 дБА) или опору на локальный опыт. Применение такого детерминированного подхода, где все многообразие метеорологических явлений усредняется до одного коэффициента, не дает возможности адекватно оценить риски, возникающие при редких, но акустически значимых погодных условиях.

## 1.2 Зарубежный подход: вероятностная модель CNOSSOS-EU

Ключевое отличие европейской методики CNOSSOS-EU от отечественного стандарта заключается в использовании принципов геометрической акустики и вероятностного анализа. Предложенный подход опирается не на привычное усреднение метеорологических параметров, а на их четкое разделение на два типа. Первый – это благоприятные условия (сюда мы относим попутный ветер и температурную инверсию), из-за которых звуковые лучи изгибаются к поверхности земли. Второй тип – однородные условия, соответствующие штилю или встречному ветру. В этом случае лучи либо распространяются прямолинейно, либо уходят вверх. По сути, мы имеем дело с физически обоснованным разделением состояний атмосферы.

Расчёт итогового долгосрочного уровня звука  $L_{LT}$  выполняется как вероятностно-взвешенная сумма:

$$L_{LT} = 10 \cdot \lg [p \cdot 10^{0,1 \cdot L_F} + (1 - p) \cdot 10^{0,1 \cdot L_H}], \quad (4)$$

где  $L_F$  – уровень звука при благоприятных условиях (F), дБА;

$L_H$  – уровень звука при однородных условиях (H), дБА;

$p$  – вероятность появления благоприятных условий за рассматриваемый период (будь то год или сезон), безразмерная величина ( $0 \leq p \leq 1$ ).

Примечательно, что вместо эмпирического коэффициента  $C_0$ , который используется в российском ГОСТ, здесь вводится параметр  $p$ . Значение вычисляется на базе детального анализа климата конкретной местности – изучается «роза ветров» и статистика температурных инверсий. Важно, что учет кривизны звуковых лучей (рефракции) делает модель физически адекватной, что подтверждается современными исследованиями [3], [9]. Если условия благоприятны, радиус кривизны луча  $R$  можно аппроксимировать следующей формулой:

$$R = C_0 / \alpha_{lin}, \quad (5)$$

где  $C_0$  – скорость звука в неподвижной среде, м/с;

$\alpha_{lin}$  – линейный градиент эффективной скорости звука, зависящий от вертикального профиля ветра, 1/с.

Примечательно, что моделирование подобных искривленных траекторий позволяет довольно наглядно описать физику процесса. Становится понятно, как вообще возникают зоны акустической тени. И где именно формируются области усиления шума (рисунок 1).

Переход к вероятностному методу дает возможность наконец-то отказаться от жесткой оценки по принципу «наихудшего случая». На смену ей приходит куда более взвешенный анализ долгосрочных акустических рисков. Для регионов с переменчивой погодой это критически важно. Ведь только так получается полноценно учесть их реальную климатическую специфику [10], [11]. Что немаловажно, точные данные о

профиле ветра сегодня можно получить, используя методы дистанционного зондирования [7], [8]. Это делает модель еще более прикладной.

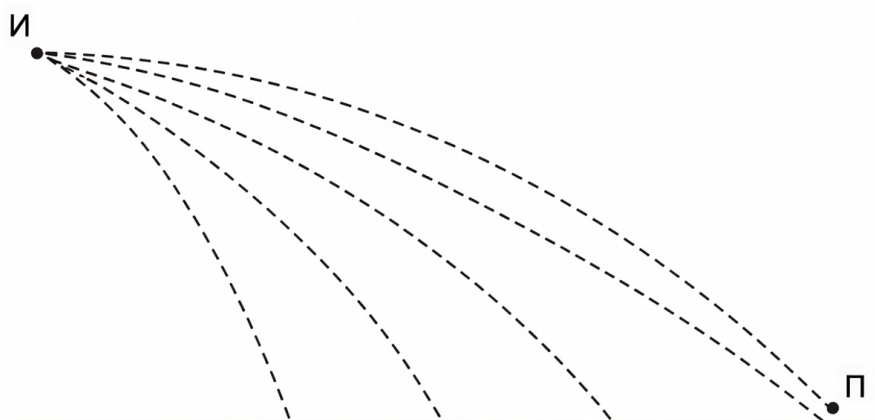


Рисунок 1 – Схема рефракции звуковых лучей при благоприятных метеоусловиях.

Траектории (пунктирные линии), исходящие от источника (И), изгибаются к земле и достигают приёмника (П) как напрямую, так и после отражений (составлено автором на основе [5])

Таким образом, проведённый анализ выявляет фундаментальные различия в детерминированном и вероятностном подходах. Для наглядного сопоставления ключевых концепций, используемых в российской и европейской нормативных базах, сведём их основные характеристики в сравнительную таблицу (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнительная характеристика методологических подходов к учёту метеорологических факторов

Параметр сравнения	ГОСТ 31295.2 (РФ)	CNOSSOS-EU (ЕС)	Ключевое различие
Основной подход	Детерминированный, оценка по «наихудшим» условиям.	Вероятностный, оценка долгосрочного риска.	Фундаментальное различие в философии оценки: от фиксации одного значения к управлению рисками.
Модель атмосферы	Упрощённая, однородная среда.	Стратифицированная среда, учёт рефракции (искривления лучей).	Европейский подход физически более корректен, позволяет моделировать зоны тени и усиления звука.
Метеорологическая коррекция	Эмпирическая поправка $C_{met}$ , основанная на коэффициенте $C_0$ без строгой методики расчёта.	Вероятностный класс $r$ , рассчитываемый на основе анализа розы ветров и статистики инверсий.	Подход ЕС требует детальных климатических данных, но обеспечивает более точный и адекватный прогноз.

Продолжение таблицы 1

Результат расчёта	Единый усреднённый уровень звука $L_{AT}(LT)$ .	Вероятностная сумма уровней для разных классов условий	Модель ЕС позволяет оценить не только средний уровень, но и распределение шумовой нагрузки во времени.
-------------------	---	--	--

## 2 Количественная оценка расхождений методик

Для количественной оценки расхождений между детерминированным отечественным подходом и более физически адекватными моделями было выполнено численное моделирование. В качестве эталонной модели, способной точно описывать волновые эффекты в движущейся среде (включая рефракцию и дифракцию), был использован метод параболического уравнения (PE, Parabolic Equation), который в современной атмосферной акустике считается «золотым стандартом» для задач прогнозирования на больших расстояниях [3], [4]. В зарубежной практике модели на основе широкоугольного параболического уравнения (WPE) активно применяются в целях точного описания акустического поля сложных источников над поглощающей и шероховатой поверхностью земли в рефракционной атмосфере [14]. При этом современные модификации математического аппарата PE направлены на создание фазосохраняющих алгоритмов, исключающих накопление кумулятивных фазовых погрешностей при дальнем распространении звука в стратифицированной движущейся среде с произвольными градиентами скорости ветра и звука [15].

Моделирование проводилось для точечного источника шума (на расчетной частоте 500 Гц) на высоте  $h_s = 2$  м над акустически мягкой поверхностью (трава) на расстояниях до 600 м. Сравнение проводилось для двух принципиально разных метеорологических сценариев, которые наиболее ярко демонстрируют ограничения инженерного подхода.

### 2.1 Сценарий 1: Распространение против ветра

Этот сценарий имитирует формирование зоны акустической тени. Ветер направлен от приёмника к источнику, что приводит к искривлению звуковых лучей вверх, от поверхности земли.

При сопоставлении теоретических результатов расчёта затухания звука для инженерной модели (ГОСТ 31295.2) и эталонных волновых моделей на базе параболического уравнения (PE) выявляются принципиальные физические расхождения. Инженерная модель ГОСТ 31295.2, построенная на детерминированном энергетическом подходе, описывает только плавное и монотонное затухание звука. В свою очередь, строгие волновые решения, представленные в современной литературе по вычислительной атмосферной акустике, демонстрируют совершенно иную физическую картину. На расстоянии около 400 м волновые модели фиксируют резкое падение уровня звука, которое соответствует физической границе формирования зоны метеорологической акустической тени.

Уровень звука внутри этой зоны, в отличие от результатов расчёта по ГОСТ, оказывается значительно ниже. Согласно верифицированным теоретическим данным, в этой области расхождение уровней звукового давления (на частоте 500 Гц) может достигать 15-25 дБ. Данный факт свидетельствует о том, что отечественная методика, неспособная описать эффект рефракции вверх, приводит к существенной переоценке уровня шума на наветренной стороне от источника. Это, в свою очередь, может стать

причиной необоснованного увеличения расчётных размеров СЗЗ и избыточных затрат на шумозащитные мероприятия.

## 2.2 Сценарий 2: Распространение по ветру

В данном сценарии имитируется формирование «звукового канала» за счёт рефракции лучей вниз. При определённых градиентах скорости ветра становится возможным многократное отражение звука от земли, что является причиной интерференции прямой и отражённых волн.

Сопоставление теоретических подходов показывает, что инженерная модель ГОСТ 31295.2 описывает только усреднённое энергетическое затухание, полностью игнорируя фазовые взаимодействия. В то же время точные волновые решения на базе параболического уравнения (PE) способны в полной мере описать сложную интерференционную структуру поля [14]. Данная структура проявляется в выраженном чередовании пространственных максимумов и минимумов уровня звукового давления, обусловленных конструктивным и деструктивным сложением волн.

Хотя энергетическая модель ГОСТ в среднем неплохо описывает уровень «по ветру», она не может предсказать локальные интерференционные максимумы. Если жилая застройка попадает в такой максимум, то в случае тонального шума (например, от трансформаторов [12]) это может вызвать превышение нормативов и жалобы населения, даже при формальном соблюдении ПДУ в усреднённом расчёте. Следовательно, недооценка пиковых уровней шума отечественной методикой в подобных условиях формирует риски для акустического комфорта и здоровья населения.

## Заключение

Проведенный в работе сравнительный анализ выявляет системное методологическое противоречие в отечественной практике прогнозирования шума. На первый взгляд, нормативная база РФ (ГОСТ 31295.2-2005) устанавливает предельно жесткие требования к соблюдению ПДУ. Но при этом сама же опирается на сильно упрощённую детерминированную модель. Физика ветровой и температурной рефракции здесь полностью игнорируется. В условиях сложного климата, типичного для множества российских регионов, такое допущение ведёт к серьёзным проблемам. На средних и больших расстояниях в прогнозах вылезают огромные погрешности – вплоть до 15–25 дБА.

Что примечательно, численное моделирование вскрыло двойственную природу этих самых погрешностей:

1. С одной стороны, при встречном ветре отечественная методика сильно завышает прогнозируемый шум в зоне акустической тени. Как результат – мы часто получаем совершенно необоснованное увеличение размеров СЗЗ;

2. В то же время пиковые уровни шума в зонах интерференционных максимумов при попутном ветре она, наоборот, занижает. Так формируются реальные риски для здоровья населения. Особенно если речь идет о тональном шуме промышленных объектов.

Европейский же подход (методика CNOSSOS-EU) на этом фоне демонстрирует куда более высокую физическую адекватность. Потому что он изначально базируется на вероятностной оценке погоды и учитывает ту самую кривизну звуковых лучей.

Подводя итог, всё это прямо указывает на острую необходимость разработки адаптированной методики. Иначе повысить достоверность экологических экспертиз в РФ просто не выйдет. Суть ее должна заключаться в интеграции вероятностного подхода к анализу метеоданных. А также во внедрении алгоритмов расчета кривизны звуковых

лучей прямо в отечественную нормативную практику. Подобный шаг наконец-то позволит уйти от устаревшей оценки по принципу «наихудшего случая». Мы сможем перейти к более обоснованному анализу долгосрочных акустических рисков. Причем используя ту климатическую информацию, которая уже давно доступна в России.

### Список использованных источников

1. Ветрова Н.М., Вереха Т.В., Меннанов Э.Э., Судьева Д.В. Экологическая безопасность урбанизированных рекреационных территорий в зоне влияния объектов транспортного строительства // Экономика строительства и природопользования. - 2022. - N 1-2 (82-83). - С. 145-151.
2. Саулова Т.А., Ефремова И.С. Оценка акустического комфорта центральных районов города Красноярска // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. - 2022. - Т. 2. - С. 703-705.
3. Долгушин Д.М., Долгушина О.В., Извеков Ю.А. Лучевая модель траектории упругих волн в неоднородной среде // Международный научно-исследовательский журнал. - 2024. - N 6 (144). - С. 1-8. DOI: 10.60797/IRJ.2024.144.6.
4. Шуруп А.С. Акустическая томография природных сред // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. - 2024. - Т. 79, N 6. - Артикул 2460301. - 20 с.
5. Commission Directive (EU) 2015/996 of 19 May 2015 establishing common noise assessment methods according to Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council // Official Journal of the European Union. - 2015. - L 168. - P. 1-82.
6. ГОСТ 31295.2-2005 (ИСО 9613-2:1996) Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 2. Общий метод расчета. - М.: Стандартинформ, 2006. - 23 с.
7. Баранов Н.А. Восстановление вектора скорости ветра по данным лидарного зондирования методом сплайн-аппроксимации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. - 2023. - N 2(30). - С. 83-97. DOI: 10.25729/ESI.2023.30.2.009.
8. Сущенко А.А. Об актуальности исследования задач акустической томографии методами теории переноса излучения // Вестник ДВО РАН. - 2021. - N 2. - С. 104-114.
9. Семенова И.В., Корнеева А.А. Поле направленного низкочастотного акустического излучателя в пограничном слое атмосферы // Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия. - 2023. - Т. 29, N 1. - С. 64-73. DOI: 10.18287/2541-7525-2023-29-1-64-73.
10. Васильева А.В., Забалканская Л.Э., Буторина М.В., Васильев А.П. Расчет затухания шума железнодорожного транспорта в условиях сельской застройки // Noise Theory and Practice. - 2024. - Т. 10, N 4. - С. 59-68.
11. Терехов А.Л. Разработка методов снижения шума на газотранспортных предприятиях и внедрение полученных результатов // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». - 2024. - N 4 (60). - С. 223-236.
12. Буторина М.В., Васильев А.П., Васильева А.В. Расчет распространения внешнего шума промышленного предприятия // Noise Theory and Practice. - 2025. - Т. 11, N 3. - С. 32-42.
13. Kok A., Bakermans M., Buitelaar S. Noise mapping 2021: how to compare results to previous rounds? // Proceedings of the 10th Convention of the European Acoustics Association (Forum Acusticum). - Turin, Italy, 2023. - P. 2347-2354. DOI: 10.61782/fa.2023.0202.

14. Kayser B. Open access of a wide-angle parabolic equation model for sound propagation in a moving atmosphere above an absorbing and rough ground // Proceedings of the 10th Convention of the European Acoustics Association (Forum Acusticum). - Turin, Italy, 2023. - P. 5539-5544. DOI: 10.61782/fa.2023.0369.

15. Ostashev V.E., Colas J., Dragna D., Wilson D.K. Phase-preserving narrow- and wide-angle parabolic equations for sound propagation in moving media // The Journal of the Acoustical Society of America. - 2024. - Vol. 155, N 2. - P. 1086-1102. DOI: 10.1121/10.0024460.

## References

1. Vetrova N.M., Verekha T.V., Mennanov E.E., Sudyeva D.V. Environmental safety of urbanized recreational territories in the influence zone of transport construction objects // Economics of construction and nature management. - 2022. - N 1-2 (82-83). - P. 145-151.

2. Saulova T.A., Efremova I.S. Acoustic comfort assessment of the central districts of Krasnoyarsk // Actual problems of aviation and cosmonautics. - 2022. - Vol. 2. - P. 703-705.

3. Dolgushin D.M., Dolgushina O.V., Izvekov Y.A. Ray model of the trajectory of elastic waves in an inhomogeneous medium // International Research Journal. - 2024. - N 6 (144). - P. 1-8. DOI: 10.60797/IRJ.2024.144.6.

4. Shurup A.S. Acoustic tomography of natural media // Moscow University Physics Bulletin. - 2024. - Vol. 79, N 6. - Article 2460301. - 20 p.

5. Commission Directive (EU) 2015/996 of 19 May 2015 establishing common noise assessment methods according to Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council // Official Journal of the European Union. - 2015. - L 168. - P. 1-82.

6. GOST 31295.2-2005 (ISO 9613-2:1996) Noise. Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2. General method of calculation. - Moscow: Standartinform, 2006. - 23 p.

7. Baranov N.A. Restoration of the wind velocity vector from lidar sounding data by spline approximation // Information and mathematical technologies in science and management. - 2023. - N 2(30). - P. 83-97. DOI: 10.25729/ESI.2023.30.2.009.

8. Sushchenko A.A. On the relevance of studying the problems of acoustic tomography by methods of radiation transfer theory // Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences. - 2021. - N 2. - P. 104-114.

9. Semenova I.V., Korneeva A.A. Field of a directional low-frequency acoustic emitter in the atmospheric boundary layer // Vestnik of Samara University. Natural Science Series. - 2023. - Vol. 29, N 1. - P. 64-73. DOI: 10.18287/2541-7525-2023-29-1-64-73.

10. Vasileva A.V., Zabalkanskaya L.E., Butorina M.V., Vasilev A.P. Calculation of noise reduction of railway transport in conditions of rural areas // Noise Theory and Practice. - 2024. - Vol. 10, N 4. - P. 59-68.

11. Terekhov A.L. Developing methods of noise reduction for gas transmission providers and implementing acquired results // Scientific and technical collection «Vesti gazovoy nauki». - 2024. - N 4 (60). - P. 223-236.

12. Butorina M.V., Vasilev A.P., Vasileva A.V. Prediction of external noise propagation from an industrial plant // Noise Theory and Practice. - 2025. - Vol. 11, N 3. - P. 32-42.

13. Kok A., Bakermans M., Buitelaar S. Noise mapping 2021: how to compare results to previous rounds? // Proceedings of the 10th Convention of the European Acoustics Association (Forum Acusticum). - Turin, Italy, 2023. - P. 2347-2354. DOI: 10.61782/fa.2023.0202.

14. Kayser B. Open access of a wide-angle parabolic equation model for sound propagation in a moving atmosphere above an absorbing and rough ground // Proceedings of the 10th Convention of the European Acoustics Association (Forum Acusticum). - Turin, Italy, 2023. - P. 5539-5544. DOI: 10.61782/fa.2023.0369.

15. Ostashev V.E., Colas J., Dragna D., Wilson D.K. Phase-preserving narrow- and wide-angle parabolic equations for sound propagation in moving media // The Journal of the Acoustical Society of America. - 2024. - Vol. 155, N 2. - P. 1086-1102. DOI: 10.1121/10.0024460.

УДК: 534.7

OECD: 01.03.AA

DOI: 10.56408/2412-8627.2026.12.2.009

## Применение нелинейных акустических эффектов для визуализации внутренних структур биологических тканей

Вареникова А.Ю.<sup>1\*</sup>, Чернов Н.Н.<sup>2</sup>, Кравчук Д.А.<sup>3</sup><sup>1</sup>Ассистент, <sup>2,3</sup>Д.т.н., профессор<sup>1,2,3</sup>Кафедра Электрогидроакустической и медицинской техники Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения Южный федеральный университет, г. Таганрог, РФ

### Аннотация

Упругие и нелинейные свойства различных сред, в том числе биологических, оказывают существенное влияние на процессы прохождения акустических волн, что дает возможность проводить более точные исследования структур различных объектов. Нелинейные акустические эффекты позволяют более точно разграничивать структурные характеристики биологических объектов за счёт использования в качестве структурной характеристики акустического нелинейного параметра. При исследованиях нелинейных эффектов необходимо не только рассматривать процессы их возникновения и оценивать влияние на получаемую измерительную информацию, но и разграничивать типы акустической нелинейности. Такие нелинейные эффекты как параметрическое взаимодействие и генерация гармонических составляющих определяют дальнейшую техническую реализацию систем акустической визуализации. В работе рассмотрены особенности каждого типа акустической нелинейности, используемой при анализе нелинейных эффектов взаимодействия акустических волн. Рассмотрены особенности систем акустической визуализации, в основе которых лежит параметрическое взаимодействие акустических волн, выражающееся в возникновении комбинационных суммарной и разностной частот. Исследованы особенности генерации тканевых гармоник и их влияние на регистрируемое излучение, в зависимости от типа и толщины среды.

**Ключевые слова:** акустический нелинейный параметр, акустическая визуализация, вторая гармоника, уравнение Бюргерса, нелинейные эффекты, параметрическое взаимодействие, генерация высших гармоник

## *Application of nonlinear acoustic effects for visualization of internal structures of biological tissues*

Varenikova A. Yu.<sup>1\*</sup>, Chernov N. N.<sup>2</sup>, Kravchuk D. A.<sup>3</sup><sup>1</sup> Assistant, <sup>2,3</sup> D.Sc., Professor<sup>1,2,3</sup> Department of Electrohydroacoustic and Medical Technology Institute of Nanotechnology, Electronics and Instrumentation Southern Federal University, Taganrog, Russia

### Abstract

The elastic and nonlinear properties of various media, including biological media, have a significant impact on the transmission of acoustic waves, which makes it possible to conduct more accurate studies

of the structures of various objects. Nonlinear acoustic effects make it possible to more accurately distinguish the structural characteristics of biological objects by using an acoustic nonlinear parameter as a structural characteristic. When studying nonlinear effects, it is necessary not only to consider the processes of their occurrence and assess the impact on the measurement information obtained, but also to distinguish between the types of acoustic nonlinearity. Nonlinear effects such as parametric interaction and generation of harmonic components determine the further technical implementation of acoustic visualization systems. The paper considers the features of each type of acoustic nonlinearity used in the analysis of nonlinear effects of acoustic wave interaction. The features of acoustic visualization systems based on the parametric interaction of acoustic waves, expressed in the occurrence of combined total and difference frequencies, are considered. The features of the generation of tissue harmonics and their effect on the detected radiation, depending on the type and thickness of the medium, are investigated.

**Keywords:** acoustic nonlinear parameter, acoustic visualization, second harmonic, Burgers equation, nonlinear effects, parametric interaction, generation of higher harmonics

## Введение

Использование нелинейных акустических эффектов в визуализации биологических объектов дает возможность повысить качество получаемой диагностической информации. Теоретические и экспериментальные исследования нелинейного взаимодействия [1] акустических волн с биологическими тканями требуют рассмотрения различных методов оценки нелинейности среды, чтобы определить тот тип нелинейного параметра, который будет выступать в качестве измеряемой структурной характеристики среды.

Задача классификации видов акустической нелинейности, характерных для различных сред, требует теоретических и экспериментальных исследований нелинейного взаимодействия акустических волн как между собой, так и с неоднородностями исследуемой среды.

Исследования упругих свойств различных сред привели не только к развитию теоретического описания нелинейных процессов взаимодействия акустических волн, но и к необходимости классификации видов акустической нелинейности, в том числе и в биологических тканях.

Известны два основных типа нелинейности – физическая, которая возникает вследствие разложения в степенной ряд внутренней энергии деформаций среды по линейным и нелинейным модулям упругости и зависит от величины сил межмолекулярного взаимодействия; геометрическая, определяемая характером связи между компонентами тензора деформаций и производными от вектора смещения энергии по координатам и независимая от физических характеристик среды [2]-[3].

В дальнейшем под структурной характеристикой биоткани будет пониматься физическая нелинейность.

## 1 Метод определения акустического нелинейного параметра на основе физической модели

Для определения акустического нелинейного параметра, как характеристики физической нелинейности биологической среды, рассмотрим систему уравнений Эйлера для диссипативной среды:

$$\begin{cases} \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} + \nabla p' - \eta \Delta v - \left(\zeta + \frac{\eta}{3}\right) \text{grad div } v = -\rho' \frac{\partial v}{\partial t} - (\rho_0 + \rho') (v \nabla) v, \\ \frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0 \text{div } v = -\text{div}(\rho' v), \\ p' = c_0^2 \rho' + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial \rho^2}\right) \rho'^2 = C_1 \frac{\rho'}{\rho_0} + \frac{1}{2} C_2 \left(\frac{\rho'}{\rho_0}\right)^2. \end{cases} \quad (1)$$

Из системы уравнений (1) представим третье уравнение (уравнение состояния) в следующем виде:

$$P = P(\rho) = P_0 + P_0 A \left(\frac{\rho'}{\rho_0}\right) + \frac{1}{2} P_0 B \left(\frac{\rho'}{\rho_0}\right)^2, \quad (2)$$

где  $P$  – мгновенное значение акустического давления,  $P_0$  – равновесное значение давления,  $\rho' = \rho - \rho_0$  – возмущение плотности среды. Под коэффициентами  $A$  и  $B$  понимаются следующие выражения:

$$A = \frac{\rho_0}{P_0} \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_{s, \rho=\rho_0}, \quad B = \frac{\rho_0^2}{P_0} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial \rho^2}\right)_{s, \rho=\rho_0} \quad (3)$$

Полученные коэффициенты рассчитаны при условиях постоянства энтропии и равновесного значения плотности. Отсюда получаем соотношение коэффициентов  $B/A$  в следующем виде:

$$\frac{B}{A} = \frac{\rho_0}{c^2} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial \rho^2}\right)_{s, \rho=\rho_0} \quad (4)$$

Отношение (4) является физической нелинейностью, которую можно получить из уравнения состояния системы уравнений (1), используя эмпирическое уравнение Тэта:

$$p = P_* \left[ \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^\Gamma - 1 \right], \quad (5)$$

где  $P_*$  и  $\Gamma$  величины, получаемые в результате экспериментальных измерений для каждой среды, причем под параметром  $\Gamma$  понимают акустический нелинейный параметр.

На основе рассмотренных подходов к определению физической нелинейности в дальнейшем в качестве акустического нелинейного параметра будем понимать следующие величины:  $B/A$ ,  $\Gamma$  (или  $\gamma$ ),  $\varepsilon$ .

Все перечисленные величины определяют физическую нелинейность, то есть нелинейность уравнения состояния вещества, и имеют простую связь друг с другом [4]:

связь между  $\varepsilon$  и  $\Gamma$ :

$$\varepsilon = (\Gamma + 1)/2, \quad (6)$$

связь между  $B/A$  и  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = 1 + B/2A, \quad (7)$$

связь между  $\Gamma$  и  $B/A$ :

$$B/A = \Gamma - 1. \quad (8)$$

Выражение (6) лежит в основе всех математических моделей, описывающих нелинейные эффекты, возникающие в результате взаимодействия акустических волн с биологическими объектами.

## 2 Визуализация структур на основе нелинейных эффектов взаимодействия акустических волн с биологическими тканями

Системы акустической визуализации различных сред в своей основе построены на использовании параметрического взаимодействия акустических волн и регистрации высших гармоник зондирующего излучения.

Параметрическое взаимодействие лежит в основе схем восстановления акустического нелинейного параметра путём регистрации амплитуд комбинационных суммарных или разностных частот [4].

По совокупности восстанавливаемых параметров предпочтительнее использование суммарной частоты, однако, использование разностных частот дает возможность уменьшить уровень поглощения акустической волны.

В общем случае на основе параметрического взаимодействия акустический нелинейный параметр регистрируется в виде зависимости  $\tilde{\varepsilon}(K_{\pm})$ , где акустический нелинейный параметр зависит от пространственных векторов комбинационных суммарных или разностных частот  $K_{\pm}$  [5]-[7].

При разработке технической реализации параметрических систем возникла проблема появления избыточных данных, возникающих при регистрации комбинированных частот  $\omega_1, \omega_2$  в процессе измерения  $\tilde{\varepsilon}(K)$  – вектора акустического нелинейного параметра [8].

Кроме избыточности получаемой информации, еще одним ограничением параметрических систем является зависимость от расположения приёмно-излучающей системы относительно объекта исследования.

Гармонические составляющие акустической волны позволяют устранить зависимость от геометрии измерений.

Возникновение гармонических составляющих объясняется влиянием вторичных источников колебаний, характеризующихся совокупностью частот, кратных основной частоте, принятой от датчика. При анализе процесса генерации гармоник исходят из спектрального подхода к описанию нелинейных процессов. В этом случае уровень амплитуды гармонической составляющей и соответствующий ей нелинейный параметр приводит к искажению профиля акустической волны основной частоты, который оценивается по амплитуде колебательной скорости частиц среды.

Для описания генерации гармонических составляющих уравнение состояния из системы (1) решают относительно колебательной скорости, считая, что правая часть не равна 0:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = L_2(v^2) + L_3(v^3) + L_4(v^4) + \dots, \quad (9)$$

где  $L_2(v^2)$  – квадратичные нелинейные члены,  $L_3(v^3)$  – кубические нелинейные члены,  $L_4(v^4)$  – нелинейные члены четвертого порядка. Количество слагаемых в правой части определяется необходимой точностью приближения получаемого решения:

В явном виде  $L_2(v^2)$ :

$$L_2(v^2) = - \left[ v^2 + \frac{\gamma - 1}{2c_0^3} \left( \int \frac{\partial v}{\partial t} dx \right)^2 \right]_{xt}. \quad (10)$$

Для того чтобы перейти от анализа искажения профиля к оценке величины нелинейного параметра используем метод последовательных приближений, приняв, что нелинейные составляющие малы по сравнению с линейными. Для этого в выражении (9) будем считать колебательную скорость как:

$$v = v^{(1)} + v^{(2)} + v^{(3)} + \dots \quad (11)$$

С учётом граничных условий для случая генерации гармоники решение уравнения (11) получим в виде:

$$v^{(1)} = v_0 \sin \omega \left( t - \frac{x}{c_0} \right). \quad (12)$$

Полученное решение (12) подставим в волновое уравнение (9) и получаем следующий вид:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = L_2 \left[ v_0^2 \sin^2 \omega \left( t - \frac{x}{c_0} \right) \right] + L_3 \left[ v_0^3 \sin^3 \omega \left( t - \frac{x}{c_0} \right) \right] \dots \quad (13)$$

Из уравнения (13) следует, что при ограничении вторым приближением разложения функций вторичных источников происходит генерация не только волны второй гармоники  $2\omega$ , но и появляется постоянная составляющая  $\omega - \omega = 0$ .

Возникновение третьей гармоники обусловлено влиянием нелинейного параметра третьего порядка  $L_3$ . Как и в случае нелинейности второго порядка здесь также на волну основной частоты оказывает влияние добавка  $\omega + \omega - \omega = \omega$ .

Гармоники более высоких порядков в акустической волне генерируются аналогичным образом под влиянием нелинейности четвертого и более высокого порядков.

Гармоники более высокого порядка, определяющиеся более точным приближением уравнения (9), позволяют проводить оценку величины нелинейного параметра с большей точностью. Но в тоже время технически пока это не представляется возможным, так как уровень возникающих гармоник очень мал, и, следовательно, в спектре регистрируемого сигнала они будут слабо выражены. Поэтому целесообразным представляется использование акустического нелинейного параметра второго порядка для построения более качественных систем акустической визуализации.

В дальнейшем ограничимся только нелинейностью второго порядка. Согласно теории возмущения, в данном случае в спектре генерируемого излучения получаем следующие волны:  $2\omega = \omega + \omega$ ,  $0 = \omega - \omega$ , в третьем порядке – волны  $2\omega + \omega = 3\omega$ ,  $2\omega - \omega = \omega$ , то есть третью гармонику и нелинейную добавку к основной волне, а также происходят процессы генерации волн  $2\omega + 2\omega = 4\omega$ ,  $2\omega - 2\omega = 0$ ,  $0 + 2\omega = 2\omega$  [10].

Таким образом квадратичная нелинейность вносит вклад в спектр волны основной частоты, состоящий из волн с частотами  $0$ ,  $2\omega$ ,  $3\omega$ ,  $4\omega$  и выше.

Далее рассмотрим особенности генерации второй гармоники акустических волн в диссипативных средах, к которым относятся и биологические среды.

### 3 Особенности генерации второй гармоники акустической волны в биологической среде

При построении систем акустической визуализации необходимо исследовать особенности формирования акустических полей, формируемых в неоднородных слоистых средах, которыми являются биоткани организма. Наличие неоднородностей по различным параметрам приводит к изменению параметров регистрируемого акустического поля.

Неоднородностями могут быть как граница раздела сред, отличающихся по значению акустического нелинейного параметра, отдельный слой патологической ткани.

Таким образом при рассмотрении слоистой структуры биологических тканей возникает необходимость оценки степени влияния характеристик тканей на формируемое поле акустического давления второй гармоники. Для данной оценки необходимо рассмотреть задачу генерации и распространения высших гармоник в биологическом объекте, представляющим собой систему слоёв как с различными акустическими характеристиками, так и содержащую неоднородности этих параметров.

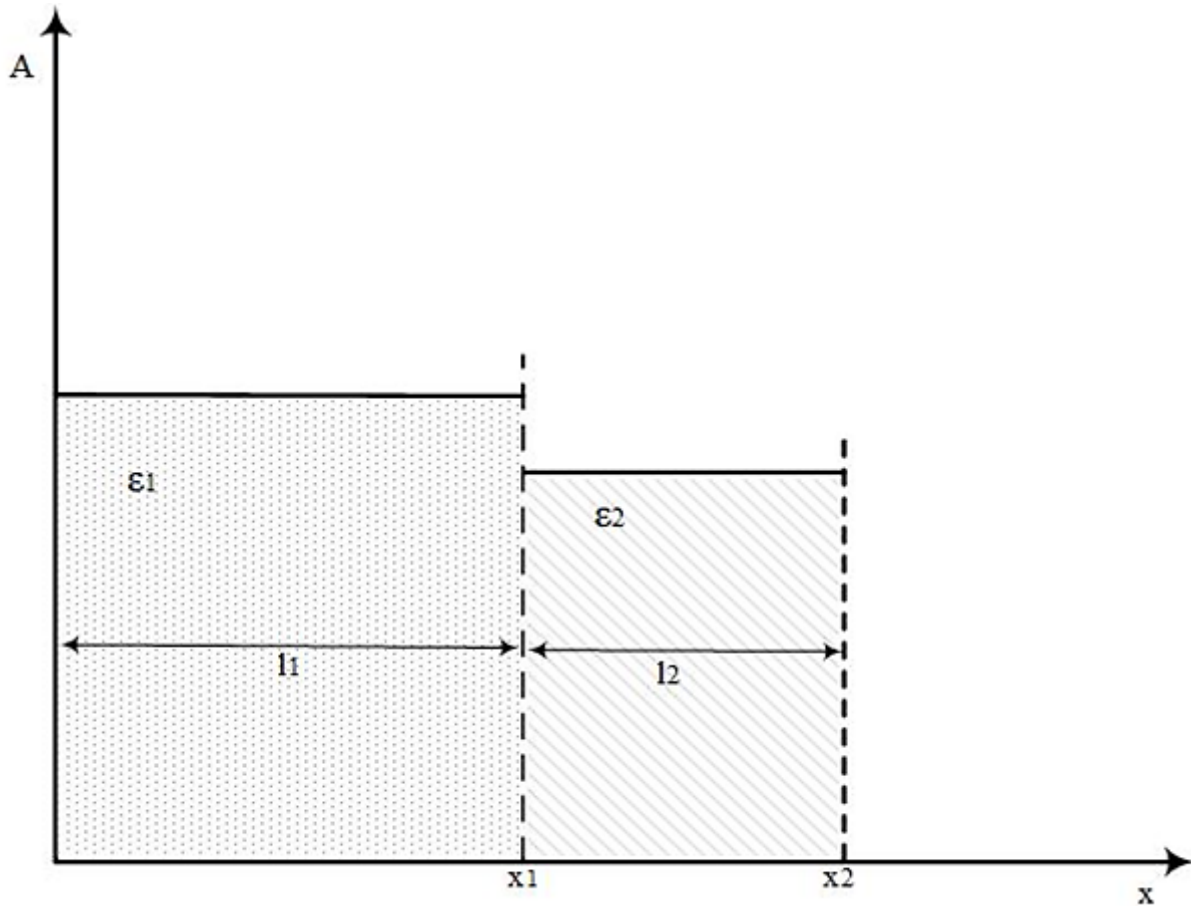


Рисунок 1 – Двухслойная модель биологического объекта

На рисунке 1 показана модель двухслойной биологической ткани, слои которой различны по акустическому нелинейному параметру  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ . Значения этих величин определяют уровень амплитуды ( $A$ ) регистрируемого сигнала. Слои, толщинами  $l_1$  и  $l_2$ , расположены на соответствующих расстояниях  $x_1$  и  $x_2$ .

Для определения параметров  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  воспользуемся уравнением Бюргера, учитывающем диссипативные процессы:

$$\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\varepsilon}{c_0^4 \rho_0} p' \frac{\partial p'}{\partial \tau} - \frac{b}{2c_0^3 \rho_0} \frac{\partial^2 p'}{\partial \tau^2} = 0. \quad (14)$$

Чтобы провести анализ влияния нелинейных и диссипативных эффектов на характер распространения акустической волны переведем выражение (14) в безразмерный вид:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \sigma} - \Pi \frac{\partial \Pi}{\partial \theta} = \Gamma \frac{\partial^2 \Pi}{\partial \theta^2}, \quad (15)$$

где  $\Pi = p'/p$ ,  $\theta = \omega\tau$ ,  $\sigma = x/lp$ ,  $\Gamma = b\omega/2\varepsilon p$ ,  $p$  – амплитуда давления акустической волны на излучателе. Значение параметра  $\Gamma$  в данном случае определяет соотношение влияния диссипативных и нелинейных эффектов на генерацию спектральных составляющих.

Для случая гармонического сигнала решение уравнения (15) представляют следующим образом:

$$U = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\Gamma\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left\{ \frac{1}{2\Gamma} \left[ \int_0^{\theta'} \Pi(\sigma=0, \theta'') d\theta'' - \frac{(\theta - \theta')^2}{2\sigma} \right] \right\} d\theta', \quad (16)$$

где  $\Pi(\sigma=0, \theta'') = s_{in}\theta$  – исходный профиль возмущения.

В этом случае выражение (16) принимает вид:

$$U = \sum_{n=0}^{\infty} \beta_n (-1)^n I_n(1/2\Gamma) \exp(-n^2\sigma\Gamma) \cos(n\theta), \quad (17)$$

где  $\beta_0 = 1$ ,  $\beta_n = 2$ , для всех  $n > 0$ ,  $n$  – порядковый номер гармонической составляющей акустической волны.

Согласно данному решению, степень затухания гармоники зависит от её порядкового номер: гармоники высших порядков будут затухать быстрее, чем гармоника 2-го порядка. На амплитуду регистрируемого сигнала влияют как начальные параметры зондирующего излучения, так и соотношение параметра  $\Gamma$ , по значению которого определяют уровень влияния нелинейных и диссипативных процессов на возникновение гармоники сигнала [11].

Таким образом данное уравнение имеет два точных решения, соответствующих предельным значениям параметра  $\Gamma$ .

С точки зрения математической оценки влияния нелинейных свойств биотканей на процесс распространения УЗ волны, нас интересует случай малых значений  $\Gamma \ll 1$ , когда наблюдается сильное проявление нелинейности и возрастает зависимость амплитуды от свойств нелинейной среды:

$$\Pi = 4\Gamma \exp(-\sigma\Gamma) \sin(\theta),$$

$$p'(x) = \frac{2b\omega}{\varepsilon} \exp\left(-\frac{x}{l_3}\right) \sin(\theta). \quad (18)$$

В данном случае на расстоянии  $x > 2l_3$  происходит «насыщение», сопровождающееся ограничением амплитуды. Это означает, что на таком расстоянии при увеличении начальной мощности мы добьемся лишь роста нелинейных потерь. Решение для зоны насыщения не позволяет проследить динамику развития нелинейных

эффектов. Поэтому для изучения нелинейности целесообразно будет рассмотреть частную задачу распространения очень мощной волны. В таком случае диссипативным членом в уравнении Бюргера можно пренебречь:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \sigma} - \Pi \frac{\partial \Pi}{\partial \theta} = 0. \quad (19)$$

Таким образом мы имеем возможность не учитывать потери энергии, связанные с вязкостью и теплопроводностью. Для случая гармонического сигнала удобно записать (19) в виде неявной функции [12]-[13]:

$$\Pi = \sin(\theta + \sigma \Pi). \quad (20)$$

Процесс генерации спектральных составляющих в результате анализа решений уравнений Бюргера можно разделить на 4 этапа.

На первом этапе волна представляется гармонической, в ней присутствует одна спектральная составляющая, соответствующая основной гармонике. Далее, на втором этапе за счет нелинейных свойств биологических тканей происходит накопление нелинейного искажения, сопровождающееся обогащением спектральной составляющей, вплоть до приобретения профилем пилообразной формы. Третий этап соответствует моменту образования разрыва, при этом резко увеличивается влияние диссипативных эффектов, что приводит к затуханию все гармонических составляющих. Четвертый этап соответствует процессу затухания гармонической волны основной частоты. Из-за накапливающегося характера нелинейности будет оказывать существенное влияние даже при малых числах Маха.

Для анализа решения (20) запишем его, разложив в Фурье-спектр:

$$\Pi = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2J_n(\sigma)}{n\sigma} \sin(\theta). \quad (21)$$

По выражению (21) можно проследить генерацию и распространение отдельных гармоник акустического сигнала в биологической среде. Суммарная энергия излучения в таком случае остается постоянной и происходит быстрое перекачивание энергии из первой в высшие гармоники вплоть до расстояния разрыва. После образования пилообразного фронта решение становится неоднозначным и возникает необходимость учета диссипативных процессов.

На рисунке 2 показаны этапы распространения второй гармоники, где показаны следующие участки:

- рост амплитуды второй гармоники, величина которого зависит от нелинейного параметра (участок 1);
- расстояние разрыва (участок 2);
- преобладание диссипации над нелинейностью (участок 3).

На участке после образования расстояния разрыва вторая гармоника несет энергетические потери, в результате чего получить распределение акустического нелинейного параметра невозможно.

Таким образом, для построения математической модели получения акустического нелинейного параметра в точке биологического объекта, будет рассматриваться участок до образования разрыва, описываемого следующим выражением:

$$p = p_0 \sin \left\{ \omega \left[ t - x \left( \frac{1}{c} - \frac{\varepsilon}{c^3 \rho_0} \right) \right] \right\}. \quad (22)$$

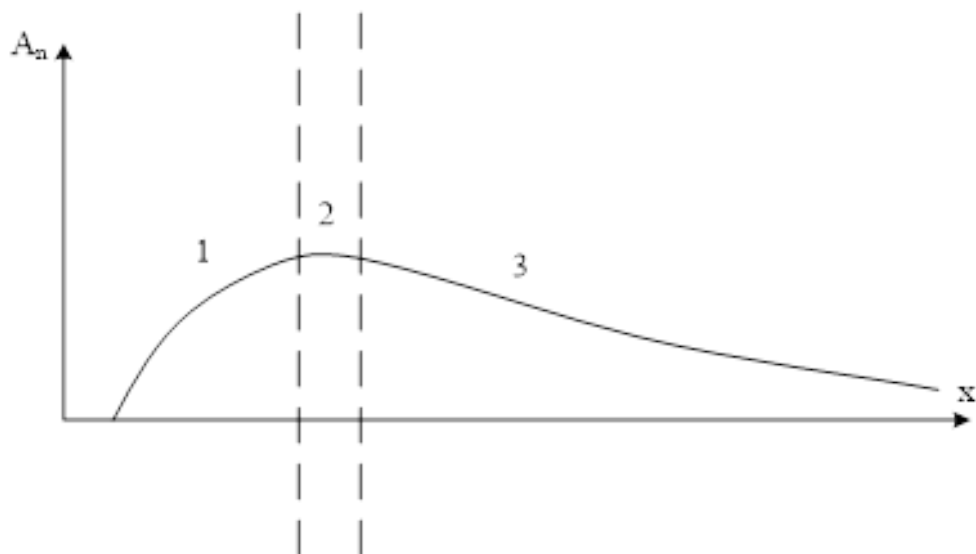


Рисунок 2 – Динамика изменения амплитуды второй гармоники

На основе приведенного уравнения (22) проводится оценка амплитуды второй гармоники акустической волны, значение которой соответствует значению акустического нелинейного параметра в точке [14]-[15].

На основе выражения (22) было проведено математическое моделирование второй гармоники акустической гармоники (рисунок 3).

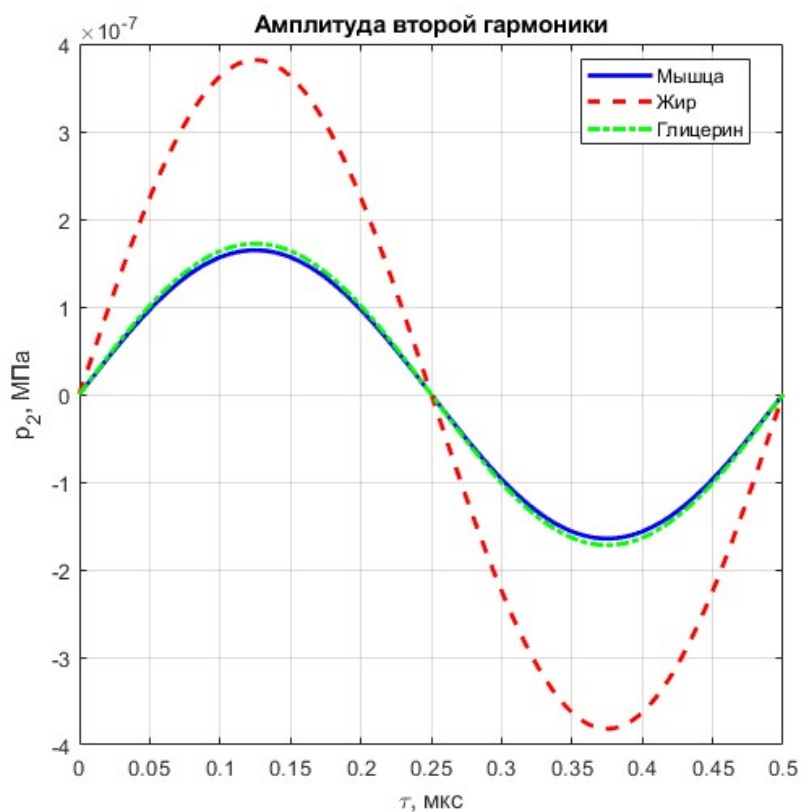


Рисунок 3 – Значение амплитуд второй гармоники для мышечной ткани, жировой ткани и глицерина

По результатам моделирования, представленном на рисунке 3, можно прийти к выводу, что в глицерине и мышечной ткани наблюдается практически одинаковый уровень второй гармоники, а, следовательно, и значения акустического нелинейного параметра, что дает возможность использовать глицерин для дальнейших исследований в качестве модели мышечной ткани.

Также была проведена оценка зависимости уровня второй гармоники акустического сигнала от толщины исследуемого слоя (рисунок 4).

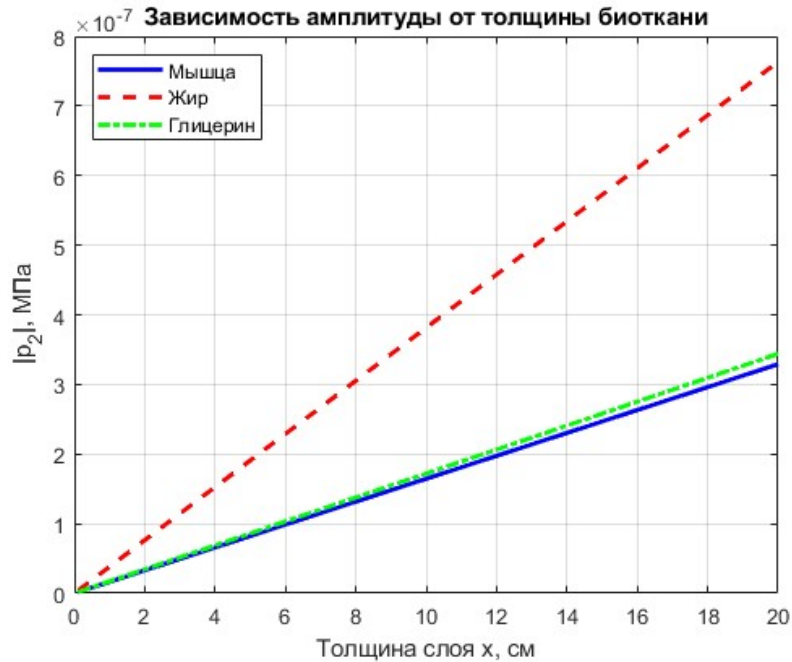


Рисунок 4 – Зависимость уровня второй гармоники от толщины слоя

Полученные результаты позволяют говорить о дальнейшей возможности применения тканевых гармоник для построения систем акустической визуализации биологических объектов.

### Заключение

На основе рассмотренных особенностей физической нелинейности, как структурной характеристики вещества, а также генерации гармонических составляющих были получены зависимости для определения акустического нелинейного параметра в биологических средах с учётом их диссипативных свойств. Для более точной оценки величины нелинейного параметра второго порядка описаны основные участки волны тканевой гармоники в диссипативной среде для случая преобладания нелинейных эффектов.

Получены зависимости амплитуды второй гармоники акустической волны для различных сред, в результате чего отмечено, что глицерин может быть достаточно точной моделью мышечной ткани не только с точки зрения линейного приближения, но и с точки зрения нелинейных свойств. Также получены уровни регистрируемого сигнала второй гармоники в зависимости от толщины исследуемого объекта.

По результатам работы определена модель для получения акустического нелинейного параметра в точке биологического объекта.

## Список использованных источников

1. Gan, W.S. Applications of Nonlinear Acoustical Imaging and Conclusions. // Nonlinear Acoustical Imaging. Springer, Singapore. – 2021. – [Электронный ресурс]. – URL [https://doi.org/10.1007/978-981-16-7015-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-16-7015-2_11) (дата обращения 25.04.2026)
2. Anastasiia Panfilova; Ruud J. G. van Sloun; Hessel Wijkstra; Oleg A. Sapozhnikov; Massimo Mischi // A review on B/A measurement methods with a clinical perspective J. Acoust. Soc. Am. 149, 2200–2237 (2021). [Электронный ресурс]. – URL <https://doi.org/10.1121/10.0003627> (дата обращения 25.04.2026)
3. Tiwari R. K., Verma V., Awasthi A., Trivedi S. K., Pandey P. K., Awasthi A. Comparative study of acoustic non-linearity parameter in binary mixtures of N, N-dimethylacetamide with Polyethylene Glycols at different temperatures // Journal of Molecular Liquids. 2021. Vol. 343. P. 117707. DOI: 10.1016/j.molliq.2021.117707. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167732221024326?via%3Dihub> (дата обращения 26.04.2026)
4. Буров В.А., Евтухов С.Н., Ткачева А.М., Румянцева О.Д. Акустическая томография нелинейного параметра с помощью малого числа преобразователей // Акустический журнал. – 2006 – № 6. – С. 760-776.
5. Буров В.А., Шмелев А.А. Численное и физическое моделирование процесса томографирования на основе акустических нелинейных эффектов третьего порядка // Акустический журнал. – 2009 – №4-5. С. 466-480.
6. Буров В.А., Крюков Р.В., Румянцева О.Д., Шмелев А.А. Проблемы использования нелинейных коллинеарных процессов в акустической томографии третьего порядка // Акустический журнал. – 2012 – № 1. С.57-79.
7. Буров В. А., Шмелев А.А., Зотов Д.И. Прототип томографической системы, использующей акустические нелинейные эффекты третьего порядка // Акустический журнал. – 2013. – №1. С.31-51.
8. Вареникова А.Ю., Чернов Н.Н., Тарасов С.П. Особенности прохождения акустических волн через биологические среды с учетом нелинейности // Noise Theory and Practice. – 2025 Т. 11, №2 – С. 26-39
9. Zotov, D.I., Rummyantseva, O.D. & Cherniaev, A.S. Calculating Fields Scattered by an Inhomogeneous Area with a Large Wave Size. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 88, 113–118 (2024). [Электронный ресурс] – URL: <https://doi.org/10.1134/S106287382370507X> (дата обращения 25.04.2026)
10. Р. Н. Беленьков, Е. Б. Постников, Подход к расчету параметра нелинейности ультразвуковых волн в жидкости, основанный на масштабной теории термодинамических флуктуаций давления, Известия вузов. ПНД, 2023, том 31, выпуск 1, 45–62
11. Kaltenbacher B., Rundell W. On the identification of the nonlinearity parameter in the Westervelt equation from boundary measurements // Inverse Problems & Imaging. 2021. Vol. 15, no. 5. P. 865–891. DOI: 10.3934/ipi.2021020.
12. Ali R, Mitcham T and Duric N 2023 Impact of starting model on waveform inversion in ultrasound tomography // Proc. SPIE vol 12470 Medical Imaging 2023: Ultrasonic Imaging and Tomography Ed C Boehm and N Bottenus (United States: SPIE) p 124700J [Электронный ресурс] – URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/12470/124700J/Impact-of-starting-model-on-waveform-inversion-in-ultrasound-tomography/10.1117/12.2653575.short> (дата обращения 29.04.2026)
13. Lonnie Daniel Chien, John M. Cormack, E. Carr Everbach, Mark F. Hamilton // Determination of nonlinearity parameter B/A of liquids by comparison with solutions of the three-dimensional Westervelt equation. Proc. Mtgs. Acoust. 29 November 2021; 45 (1):

020003. [Электронный ресурс] – URL: <https://doi.org/10.1121/2.0001563> (дата обращения 29.04.2026)

14. Chernov N.N., Zagray N.P., Laguta M.V., Varenikova A.Yu. Research of appearance and propagation of higher harmonics of acoustic signals in the nonlinear media // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018 г. 1015(3),032081.

15. Вареникова А.Ю., Чернов Н.Н. Разработка модели получения акустического нелинейного параметра для визуализации внутренних структур биологических сред // *Научное приборостроение: Перспективы разработки, создания, развития и использования. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Ростов-на-Дону – 2024 – С.303-305*

## References

1. Gan, W.S. Applications of Nonlinear Acoustical Imaging and Conclusions. // *Nonlinear Acoustical Imaging*. Springer, Singapore. – 2021. – [Electronic resource]. – URL [https://doi.org/10.1007/978-981-16-7015-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-16-7015-2_11) (date of the application 25.04.2026)

2. Anastasiia Panfilova; Ruud J. G. van Sloun; Hessel Wijkstra; Oleg A. Sapozhnikov; Massimo Mischi // A review on B/A measurement methods with a clinical perspective *J. Acoust. Soc. Am.* 149, 2200–2237 (2021). [Electronic resource]. – URL <https://doi.org/10.1121/10.0003627> (date of the application 25.04.2026)

3. Tiwari R. K., Verma V., Awasthi A., Trivedi S. K., Pandey P. K., Awasthi A. Comparative study of acoustic non-linearity parameter in binary mixtures of N, N-dimethylacetamide with Polyethylene Glycols at different temperatures // *Journal of Molecular Liquids*. 2021. Vol. 343. P. 117707. DOI: 10.1016/j.molliq.2021.117707. [Electronic resource] – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167732221024326?via%3Dihub> (date of the application 26.04.2026).

4. Burov V.A., Evtukhov S.N., Tkacheva A.M., Rumyantseva O.D. Acoustic tomography of a nonlinear parameter using a small number of transducers // *Acoustical Journal*. – 2006 – No. 6. – Pp. 760-776. Burov V.A., Evtukhov S.N. Tkacheva A.M., Rumyantseva O.D. Acoustic tomography of a nonlinear parameter using a small number of transducers // *Acoustic Journal*, 2006, No. 6, pp. 760-776.

5. Burov V.A., Shmelev A.A. Numerical and physical modeling of the tomography process based on third-order acoustic nonlinear effects // *Acoustical Journal*. – 2009 – No. 4-5. Pp. 466-480.

6. Burov V.A., Kryukov R.V., Rumyantseva O.D., Shmelev A.A. Problems of using nonlinear collinear processes in third-order acoustic tomography // *Acoustical Journal*. – 2012 – No. 1. Pp. 57-79.

7. Burov V. A., Shmelev A.A., Zotov D.I. Prototype of a tomographic system using acoustic nonlinear effects of the third order // *Acoustic Journal*, 2013, No. 1, pp.31-51.

8. Varenikova A.Yu., Chernov N.N., Tarasov S.P. Features of the Passage of Acoustic Waves through Biological Media, Taking into Account Nonlinearity // *Noise Theory and Practice*. – 2025 V. 11, No. 2 – Pp. 26-39

9. Zotov, D.I., Rumyantseva, O.D. & Cherniaev, A.S. Calculating Fields Scattered by an Inhomogeneous Area with a Large Wave Size. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 88, 113–118 (2024). <https://doi.org/10.1134/S106287382370507X>

10. R.N. Belenkov, E. B. Postnikov, An approach to calculating the parameter of nonlinearity of ultrasonic waves in a liquid based on a large-scale theory of thermodynamic pressure fluctuations, *Izvestiya vuzov. MON*, 2023, Volume 31, Issue 1, 45-62

11. Kaltenbacher B., Rundell W. On the identification of the nonlinearity parameter in the Westervelt equation from boundary measurements // *Inverse Problems & Imaging*. 2021. Vol. 15, no. 5. P. 865–891. DOI: 10.3934/ipi.2021020.
12. Ali R, Mitcham T and Duric N 2023 Impact of starting model on waveform inversion in ultrasound tomography // *Proc. SPIE vol 12470 Medical Imaging 2023: Ultrasonic Imaging and Tomography* Ed C Boehm and N Bottenus (United States: SPIE) p 124700J [Electronic resource] – URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/12470/124700J/Impact-of-starting-model-on-waveform-inversion-in-ultrasound-tomography/10.1117/12.2653575.short> (date of the application 29.04.2026).
13. Lonnie Daniel Chien, John M. Cormack, E. Carr Everbach, Mark F. Hamilton // Determination of nonlinearity parameter  $B/A$  of liquids by comparison with solutions of the three-dimensional Westervelt equation. *Proc. Mtgs. Acoust.* 29 November 2021; 45 (1): 020003. [Electronic resource] – URL: <https://doi.org/10.1121/2.0001563> (date of the application 29.04.2026).
14. Chernov N.N., Zagray N.P., Laguta M.V., Varenikova A.Yu. Research of appearance and propagation of higher harmonics of acoustic signals in the nonlinear media // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018 г. 1015(3),032081.
15. Varenikova A.Yu., Chernov N.N. Development of a model for obtaining an acoustic nonlinear parameter for visualization of internal structures of biological media // *Scientific Instrumentation: Prospects for Development, Creation, and Use. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation. Rostov-on-Don – 2024 – P.303-305*

УДК: 534.6

OECD: 1.03 AA

DOI: 10.56408/2412-8627.2026.12.2.010

## Оценка воздействия производственного шума на основе треть-октавного анализа вкладов источников шума

Фиев К.П., <sup>1\*</sup>, Тюрина Н.В.<sup>2</sup>, Вовченко У.А.<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>Доцент, к.т.н., <sup>2</sup>Профессор, д.т.н., <sup>3</sup>Магистрант

<sup>1,2,3</sup>Кафедра «Техносферная безопасность и вычислительная механика», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

### Аннотация

Разработана методика экспериментальных исследований уровней звукового давления производственного шума в 1/3 октавных полосах частот, позволяющая выделить вклады значимых источников шума предприятия, установить взаимосвязь влияния источников шума и изменения акустической нагрузки на территории ближайшей жилой застройки. Показано, каким образом при наличии экспериментальных данных о шумовых характеристиках источников шума, расположенных на территории промышленного предприятия, и данных о шуме на границе ближайшей жилой застройки установить основные источники шума, являющиеся причиной превышения уровней шума на территории нормируемых объектов, и разработать эффективные мероприятия по снижению шума.

**Ключевые слова:** уровень звука, 1/3 октавные уровни звукового давления, источник шума, вклад источника шума, шумозащитные мероприятия

## *Industrial noise impact assessment based on one-third-octave band analysis of noise sources contributions*

*Fiev K.P., <sup>1\*</sup>, Tyurina N.V.<sup>2</sup>, Vovchenko U.A.<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup>Ph.D., Associate Professor, <sup>2</sup>Dr.Sc., Professor, <sup>3</sup>Student*

*<sup>1,2,3</sup>Department of Technosphere Safety and Computational Mechanics, Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg, Russian Federation*

### **Abstract**

*A methodology for industrial noise experimental study considering sound pressure levels in 1/3 octave bands has been developed, which allows the identification of significant noise sources at an enterprise and the establishment of the relationship between the influence of noise sources and changes in noise levels at the residential areas. The article demonstrates how, based on experimental data on the noise sources located within an industrial enterprise and on noise levels at the boundary of the nearest residential area, it is possible to identify the main sources of noise that contribute to exceeding noise levels in regulated areas and develop effective measures to reduce noise.*

**Keywords:** *sound level, 1/3 octave band sound pressure levels, noise source, noise source contribution, noise control means*

## Введение

В последние годы увеличивается количество жалоб на повышенный шум на территории жилой застройки, расположенной вблизи промышленных предприятий [1]. Длительное воздействие сверхнормативных уровней шума влияет на слух, нервную и сердечно-сосудистую системы, вызывает раздражение и другие негативные эффекты, а также приводит к нарушению сна [2].

Промышленные предприятия часто создают повышенную акустическую нагрузку на близлежащие жилые территории [2], [3]. Для обеспечения нормативных уровней звука требуется применение эффективных шумозащитных мероприятий, таких как акустические экраны, звукоизолирующие кожухи, капоты, перегородки, глушители, стоимость которых может исчисляться сотнями тысяч рублей [2], [4], [5]. При этом, на территории промышленных предприятий, как правило, располагаются десятки различных видов технологических устройств, машин и механизмов, излучающих повышенный шум в окружающую среду [6]. Для наиболее экономически целесообразного решения проблемы шумозащиты, необходимо понимание того, какие из источников шума предприятия действительно являются значимыми для рассматриваемой территории нормируемых объектов, а какие нет.

Для установления взаимосвязи влияния акустического воздействия источников шума предприятия на изменение шума на территории близлежащей жилой застройки разработан метод экспериментальных исследований, в рамках которого анализируются спектральные данные (1/3 октавные уровни звукового давления) об инженерно-технологическом оборудовании, генерирующем повышенный шум и аналогичные данные о шуме на ближайшей территории жилой застройки.

### 1 Объект исследования

В рамках исследования рассматривается внешний шум крупного металлургического предприятия. Ближайшим нормируемым объектом является жилая застройка, расположенная на расстоянии 50 м от границы предприятия (точка контроля).

В ходе оценки шумового воздействия предприятия на территорию ближайшей жилой застройки проводились одновременные натурные измерения уровней звука (УЗ), а также уровней звукового давления (УЗД) в октавных и 1/3 октавных полосах частот в дневное и ночное время, вблизи основных источников шума на территории предприятия, а также на территории жилой застройки.

### 2 Оценка воздействия производственного шума на территорию жилой застройки

Измерения шумовых характеристик технологического оборудования предприятия, а также УЗ и УЗД на территории ближайшего нормируемого объекта в дневное и ночное время суток проводились согласно [7] шумомерами-виброметрами и анализаторами спектра класса точности 1. Характер исследуемого шума: постоянный, широкополосный.

Результаты измерений уровней звука (УЗ) и уровней звукового давления (УЗД) в октавных полосах частот в ночное время на территории ближайшей жилой застройки представлены в таблице 1. Результаты измерений в дневное время не представлены, так как в дневное время не были выявлены превышения шума.

Анализ результатов измерений, представленных в таблице 1, показывает, что превышения УЗД над нормой для ночного времени [8] отмечены в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 500 Гц (на 8 дБ) и 1000 Гц (на 2 дБ), превышение по уровню звука составило 4 дБА.

Таблица 1 – Результаты натуральных измерений шума в ночное время суток

№ точки	Функциональное назначение	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									УЗ, дБА
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	Территория, прилегающая к жилому зданию	55	55	52	48	<b>52</b>	<b>42</b>	35	26	24	<b>49</b>
Допустимые уровни шума в ночное время согласно [8]		83	67	57	49	44	40	37	35	33	45

Графическое отображение результатов измерений уровней звукового давления в октавных полосах частот на территории жилой застройки в ночное время при работе оборудования представлено на рисунке 1.

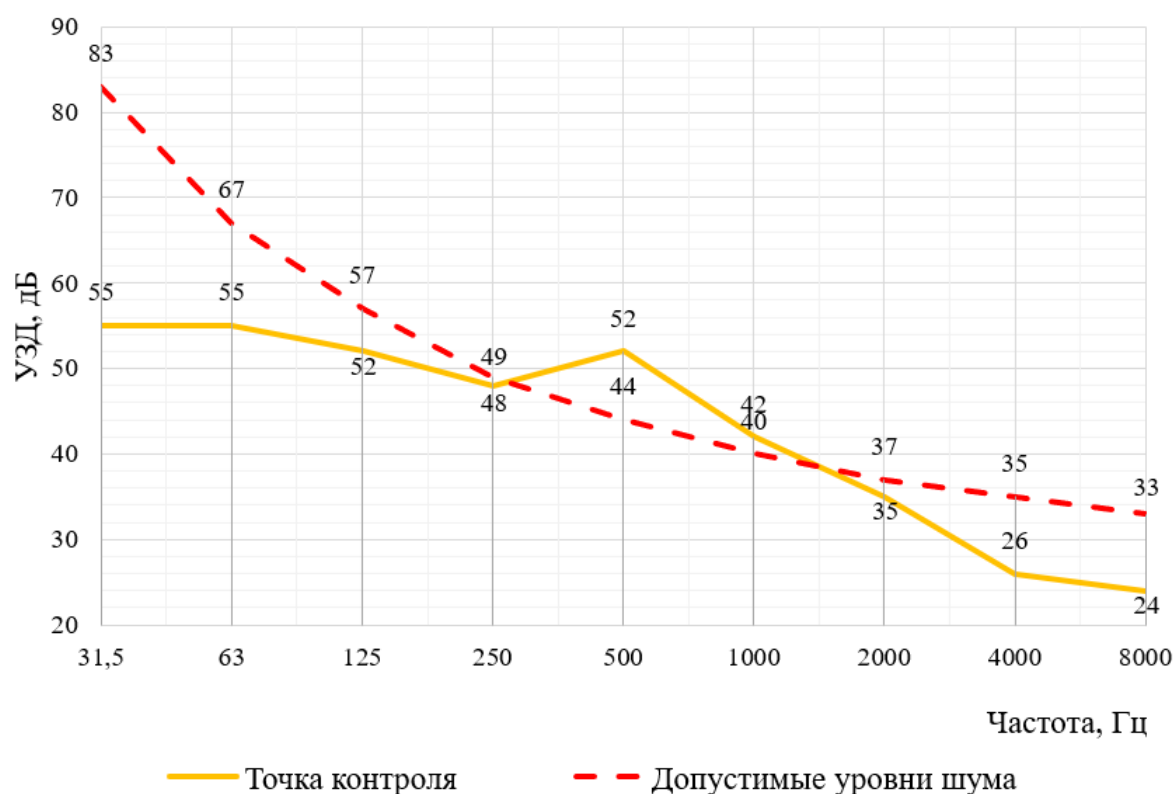


Рисунок 1 – Результаты измерений уровней звукового давления в ночное время на границе территории жилой застройки

Графическое отображение результатов измерений уровней звукового давления в 1/3 октавных полосах частот в ночное время на территории жилой застройки с учетом аппроксимации нормированных уровней шума представлено на рисунке 2. В результате сравнения фактических УЗД в точке контроля с нормативными УЗД выявлены превышения в частотном диапазоне 315-1000 Гц.

На основании полученных данных сделан вывод о том, что инженерно-технологическое оборудование промышленного предприятия вносит вклад в превышения

шума над установленными санитарными нормами для территории жилой застройки. Учитывая, что предприятие работает круглосуточно и имеет большое количество разнообразных источников внешнего шума, для разработки эффективной шумозащиты необходимо определить вклады источников шума в УЗД на территории ближайшего к предприятию нормируемого объекта, а для этого произвести инвентаризацию источников шума на предприятии.

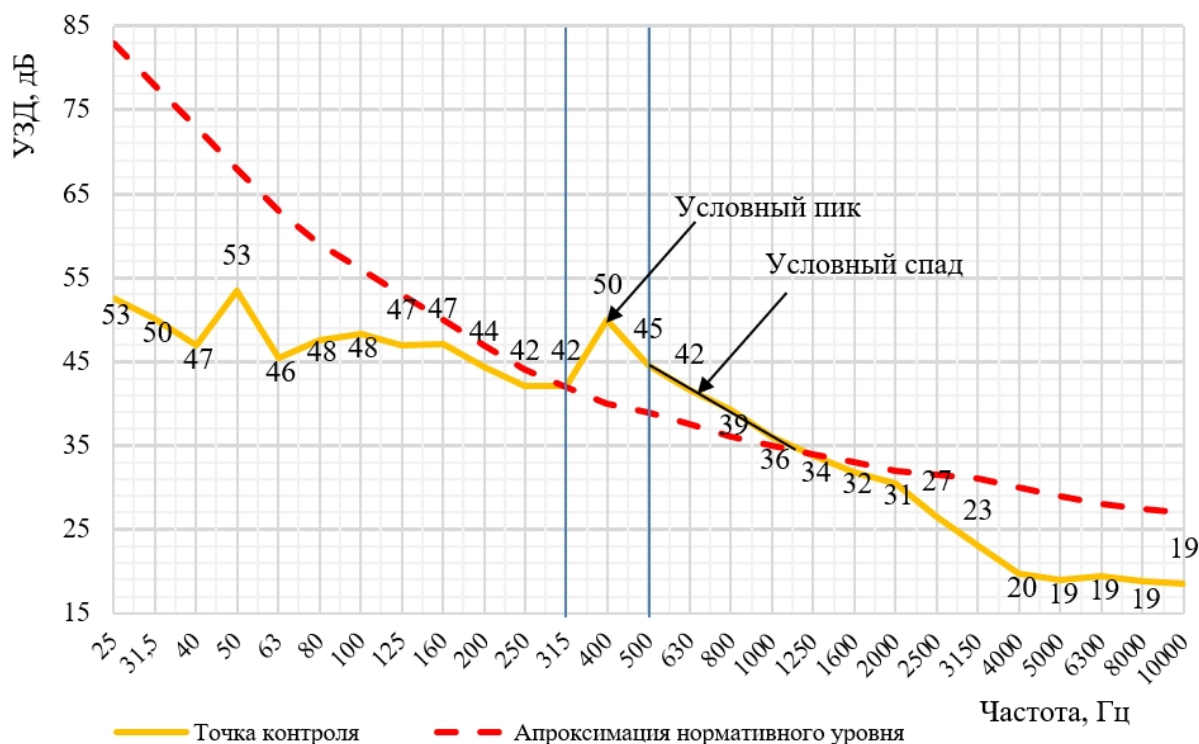


Рисунок 2 – Результаты измерения УЗД в ночное время на границе территории жилой застройки

С целью детальной оценки акустического воздействия завода на близлежащую жилую застройку выполнена инвентаризация источников шума на территории предприятия. Выявленные источники шума поделены на группы в соответствии с их близким расположением относительно друг друга.

### 3 Анализ вкладов источников шума

Для определения вкладов источников шума в точку контроля на территории жилой застройки использована методика, основанная на 1/3 октавном анализе спектров шума, измеренных одновременно вблизи источников шума и на территории нормируемого объекта. Сравнение спектров шума отдельных единиц оборудования со спектром в точке контроля на границе территории жилой застройки показывает, что превышения нормативов формируются конкретными источниками, что позволяет перейти от общих шумозащитных мер к адресным и экономически обоснованным.

Измерения проводились вблизи источников шума, на расстоянии, зависящем от максимального размера источника шума, в основном, на расстоянии 1 м от оборудования. На рисунках 3-5 представлены спектры основных источников шума, оказывающих влияние на формирование сверхнормативного акустического воздействия на территории ближайшей жилой застройки.

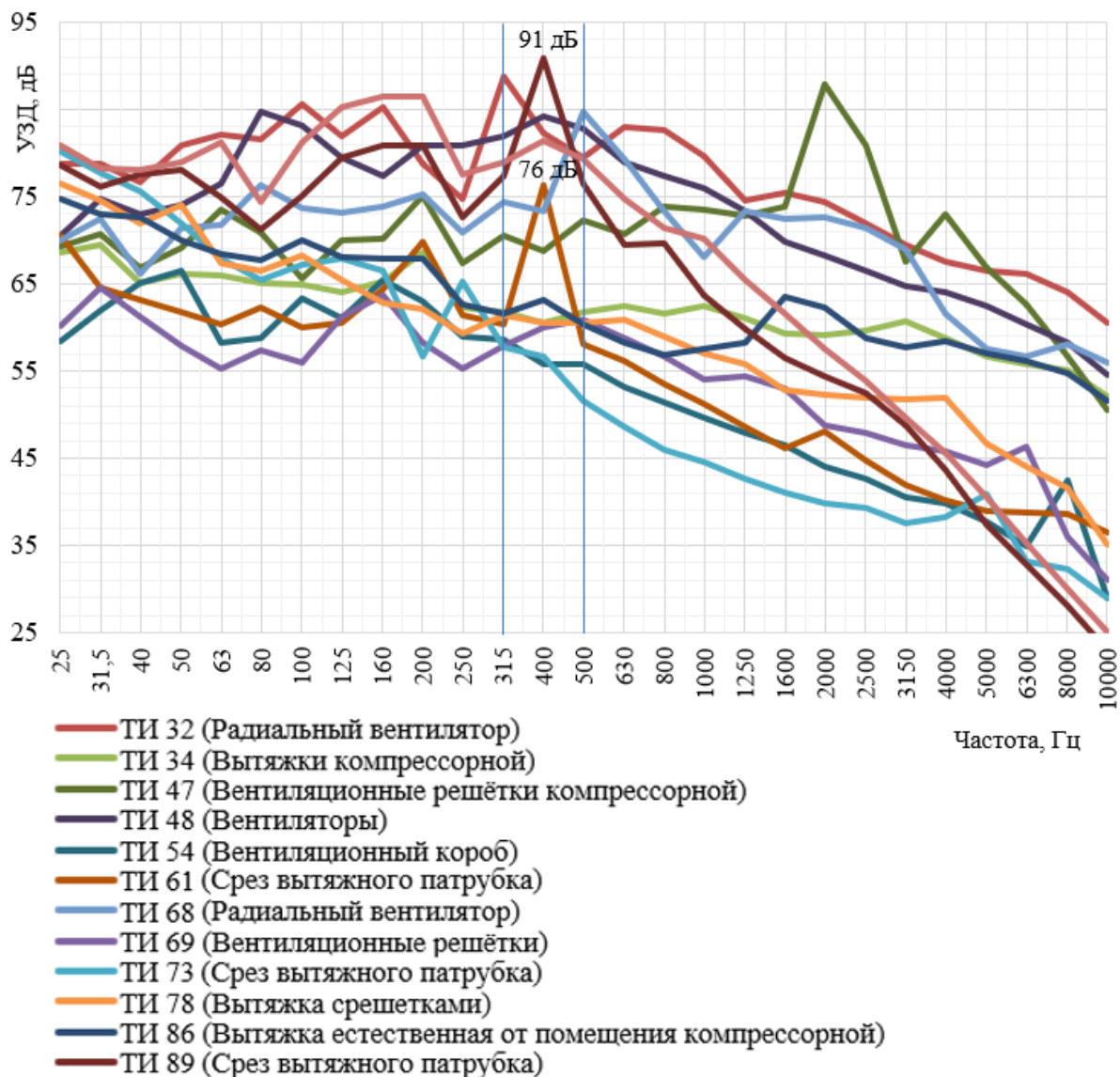


Рисунок 3 – Результаты измерений уровней звукового давления, излучаемых источниками шума первой группы

Целью анализа является поиск частотных совпадений («выявление схожих пиков») уровней звукового давления в 1/3 октавных полосах частот, измеренных на территории предприятия вблизи источников шума и на территории жилой застройки. Таким образом, необходимо проанализировать, на каких частотах в 1/3 октавных полосах частот имеются ярко выраженные «пики» УЗД.

На основании анализа данных, представленных на рисунке 3, сделан вывод о том, что в диапазоне частот от 315 Гц до 500 Гц имеются ярко выраженные пики УЗД, в частности на частоте 400 Гц, следовательно необходимо проанализировать спектры источников шума на территории предприятия с пиками УЗД на данной частоте.

Анализ вкладов источников шума, представленных на рисунке 3, показывает, что вклад вытяжного патрубка ТИ-61 на частоте 400 Гц составляет 76 дБ, а вклад вытяжного патрубка ТИ-89 равен 91 дБ. Данные источники формируют основное воздействие на уровень звука в рассматриваемой точке контроля на территории ближайшей к заводу жилой застройки.

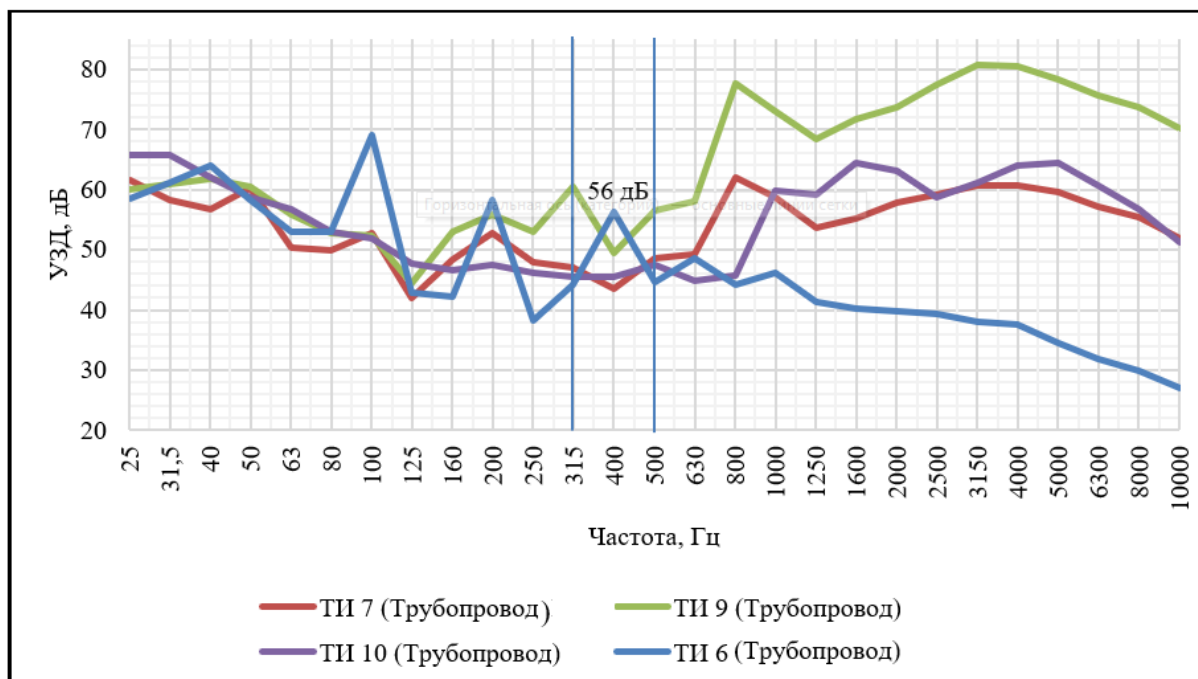


Рисунок 4 – Результаты измерений уровней звукового давления, излучаемых источниками шума второй группы

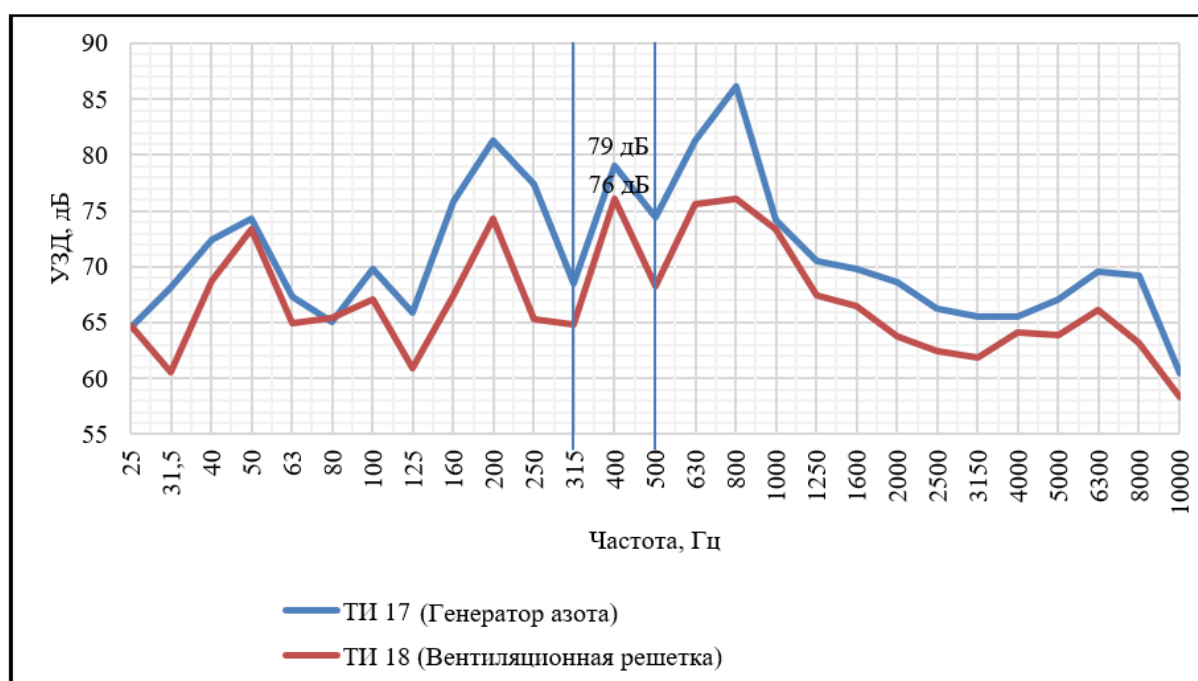


Рисунок 5 – Результаты измерений уровней звукового давления, излучаемых источниками шума третьей группы

Анализ данных, представленных на рисунке 4 показывает, что вклад трубопровода ТИ-6 в уровень звукового давления на территории рассматриваемой жилой застройки на частоте 400 Гц составляет 56 дБ, что также влияет на формирование сверхнормативной акустической нагрузки на жилую застройку в ночное время.

Как следует из результатов экспериментальных исследований, приведенных на рисунке 5, вклады генератора азота (ТИ-17) и вентиляционной решетки (ТИ-18)

на частоте 400 Гц составляют 79 дБ и 76 дБ, соответственно, и приводят к превышению шума в точке контроля на территории жилой застройки.

При анализе полученных данных стоит учесть тот факт, что все источники шума находятся на различных расстояниях от защищаемого объекта и их вклад в высокочастотном диапазоне изменяется, снижаясь с расстоянием и при огибании препятствий, однако «пик» превышений уровня звукового давления на частоте 400 Гц в точке контроля (как следует из рисунков 1-2) сохраняется.

На основании анализа выявленных вкладов источников шума, которые воздействуют на УЗД в точке контроля (на территории ближайшего нормируемого объекта), выполняется подбор эффективных шумозащитных мероприятий для источников шума, характеризующихся наиболее значимыми вкладами. Так как выявленные источники вносят основной вклад по уровню звукового давления на частоте 400 Гц, то необходимо подобрать наиболее эффективное шумозащитное мероприятие для данной 1/3 октавной полосы частот, которое приведет к снижению УЗД у источника шума, а также на территории нормируемого объекта.

### Заключение

Применение метода выделения вкладов источников шума на основе 1/3 октавного анализа позволяет аргументированно установить, какие источники шума являются доминирующими, то есть служат причиной повышения уровней шума на территории нормируемых объектов. Выявление значимых источников шума позволяет принять эффективные меры по снижению их сверхнормативной нагрузки.

### Список использованных источников

1. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2025 году: Государственный доклад. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2025. – 424 с.
2. Иванов Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник для вузов - Изд. 3-е, перераб. и доп. - М.: Логос, 2013 - 432 с.
3. Васильев А.П. Оценка, расчет и снижение внешнего шума промышленного предприятия с множественными источниками шума // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2025.
4. Natalia Tyurina, Nickolay Ivanov, Alexander Shashurin, Svetlana Bortsova Investigation of parameters influencing noise barrier efficiency// Proceedings of the 27th Annual Congress of International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), 11-16 July 2021. – 5p.
5. Tyurina, N. V. Prediction and design of noise barriers for stationary noise sources /N. V. Tyurina//Proceedings of the International Congress on Sound and Vibration, Vienna, Austria, 2-6 July, 2006. –2006
6. Васильев А.П. Разработка мероприятий для снижения шума вытяжных систем промышленного предприятия / Васильев А.П., Кондратьев С.А., Фиев К.П., Тюрин Н.В // Noise Theory and Practice. – 2025. – Т. 11, № 3. – С. 188-197.
7. МИ ПКФ 12-006 «Однократные прямые измерения уровней звука, звукового давления и ускорения приборами серий ОКТАВА и ЭКОФИЗИКА. Метод выполнения измерений».

8. СанПиН 1.2.3685-21. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Санитарные правила и нормы: утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.21 № 2: введены в действие 01.03.21. – Текст: электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/516587187>.

## References

1. On the State of Sanitary and Epidemiological Well-Being of the Population in the Russian Federation in 2025: State Report. Moscow: Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare, 2025. – 424 p. MI PKF 12-006 "Single-time direct measurements of sound levels, sound pressure and acceleration by devices of the OKTAVA and ECOPHYSICS series. Measurement procedure".
2. Ivanov N.I. Engineering Acoustics. Theory and Practice of Noise Control: Textbook for Universities - 3rd Edition, Revised. and add. - M.: Logos, 2013. - 432 p.
3. Vasilyev, A.P. Assessment, Calculation, and Reduction of External Noise of an Industrial Enterprise with Multiple Noise Sources // Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences / Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D.F. Ustinov, 2025.
4. Natalia Tyurina, Nickolay Ivanov, Alexander Shashurin, Svetlana Bortsova Investigation of parameters influencing noise barrier efficiency // Proceedings of the 27th Annual Congress of International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), 11-16 July 2021. – 5p.
5. Tyurina, N. V. Prediction and design of noise barriers for stationary noise sources /N. V. Tyurina//Proceedings of the International Congress on Sound and Vibration, Vienna, Austria, 2-6 July, 2006. –2006
6. Vasilyev, A.P. Development of Measures for Reducing the Noise of Industrial Enterprise Exhaust Systems / A.P. Vasilyev, S.A. Kondratyev, K.P. Fiev, and N.V. Tyurina // Noise Theory and Practice. – 2025. – Vol. 11, No. 3. – pp. 188-197.
7. MI PKF 12-006 "Single-time direct measurements of sound levels, sound pressure, and acceleration using the OKTAVA and ECOPHYSICS series of devices. Measurement method".
8. SanPiN 1.2.3685-21. Sanitary and epidemiological rules and regulations. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of human habitat factors. Sanitary rules and regulations: approved by the Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated 28.01.21 No. 2: put into effect on 01.03.21. – Text: electronic. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/516587187>.



## Общество с ограниченной ответственностью "Институт акустических конструкций"

ООО "ИАК" специализируется на проведении инженерно-экологических изысканий, выполнении экологических обоснований и разработке разделов проектной и рабочей документации, в первую очередь, на проектировании акустических экранов и других шумозащитных конструкций. Компания обладает собственной производственной базой, изготавливая и монтируя качественные конструкции для снижения шума от любых видов оборудования, а также для защиты от транспортного шума в различных регионах России.

За плечами команды ООО "ИАК" сотни реализованных объектов различной сложности от Калининграда до Камчатки, в том числе на промышленных и линейных объектах, на железной дороге, на искусственных сооружениях, на скоростных автомагистралях М-8 "Холмогоры" и М-4 "Дон", на кольцевой автодороге и на Западном скоростном диаметре в Санкт-Петербурге, на объектах олимпийского Сочи и Республики Крым, при реконструкции федеральных автодорог и др.

Силами испытательной лаборатории осуществляются акустические исследования, отделами акустики и проектирования разрабатываются шумозащитные мероприятия на промышленных, энергетических, культурных и оздоровительных объектах нашей страны.

Наше профессиональное развитие не было бы возможным без постоянного роста заказов и расширения клиентской базы. Оглядываясь назад, мы с благодарностью осознаём, что именно благодаря высокой требовательности сегодня в области акустики мы умеем то, чего не умели ещё вчера. Спасибо, что помогаете нам становиться лучше.

*"Наша компания обладает мощными научными и проектными подразделениями с современной технической и интеллектуальной базой, позволяющей выполнять проекты по шумозащите любой сложности от идеи до воплощения. В своей деятельности мы опираемся на лучшие традиции, сочетая их с передовыми технологиями и стараемся сделать окружающий мир тише"*

# Сетевой Научный Журнал "Noise Theory and Practice"

ООО "ИАК"

при БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова



Главная цель сетевого научного журнала "Noise Theory and Practice" – способствовать развитию виброакустики, защите от шума и вибрации.

Основными задачами журнала являются:

- отражение последних достижений фундаментальной виброакустики, теории и практики борьбы с шумом и вибрацией, в том числе в области оценки акустического воздействия на окружающую среду;
- 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, выполняемых научными сотрудниками ВУЗов и иных организаций;
- предоставление сведений о конференциях, конгрессах, семинарах и т.п. по виброакустике 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 наукометрической базе Российского Индекса Научного Цитирования (РИНЦ). Журнал включен в научную электронную библиотеку "КиберЛенинка".

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 и доктора наук (категория К2, п. 788).

ООО "ИАК"  
г. Санкт-Петербург  
2026