

ISSN 2412-8627

Vol. 12 No. 1

Noise

Theory and Practice

Scientific Journal



I
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 №1

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

**Сетевой Научный Журнал
"Noise Theory and Practice"**

выпускается с 2015 г.

Основателем журнала является д.т.н., профессор кафедры "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

- Бикмухаметов Ф.Р., Канев Н.Г.** РУС
Безэховая звукомерная камера НИИ строительной физики: актуальные акустические характеристики
стр. 7-17
- Воронов А.С., Крутова В.А.** РУС
Математическая модель описания вибраций, возникающих при работе сельскохозяйственной техники
стр. 18-24
- Дементьева Ю.В., Косякин В.С.,
Плетнев В.С., Шилов А.А.** РУС
Исследование воздействия производственного шума, как основной причины возникновения профессиональных заболеваний работников промышленных предприятий Российской Федерации
стр. 25-35
- Лестенко Н.А., Вальштейн К.В., Верхова А.А.** РУС
Современные методы анализа акустического профиля беспилотных авиационных систем с использованием нейросетевых технологий
стр. 36-46
- Крутова В.А., Завьялов Д.С.** РУС
Изучение акустических характеристик на площадке выхода комбайна
стр. 47-56

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@noisetp.com
www.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

Contents

Bikmukhametov F.R., Kanev N.G. RUS

Anechoic sound measuring chamber of the Research Institute of Building Physics: current acoustic characteristics
pp. 7-17

Voronov A.S., Krutova V.A. RUS

A mathematical model for describing vibrations occurring during the operation of agricultural machinery
pp. 18-24

Dementyeva Yu.V., Kosyakin V.S., Pletnev V.S., Shilov A.A. RUS

Research on the impact of industrial noise as the main cause of occupational diseases among employees of industrial enterprises in the Russian Federation
pp. 25-35

Lestenko N.A., Valstein K.V., Verkhova A.A. RUS

Modern methods of analyzing the acoustic profile of Unmanned Aerial System using neural network technologies
pp. 36-46

Krutova V.A., Zavialov D.S. RUS

Studying the acoustic characteristics at the combine harvester's discharge area
pp. 47-56

УДК: 534.62

OECD: 01.03.AA

Безэховая звукомерная камера НИИ строительной физики: актуальные акустические характеристики

Бикмухаметов Ф.Р.^{1*}, Канев Н.Г.²¹Лаборант, физический факультет, Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, РФ²Д.ф.-м.н., заведующий лабораторией «Акустика залов», НИИ строительной физики
РААСН, г. Москва, РФ

Аннотация

В данной работе представлены актуальные акустические характеристики безэховой камеры НИИ строительной физики РААСН. Актуальность данного исследования заключается в высокой необходимости проведения измерений в условиях свободного акустического поля как в научных, так и в промышленных целях. Рассмотрено акустическое поле на первом и третьем этажах безэховой камеры, показано, что влияние отраженного от пола звука на третьем этаже несущественно, и третий этаж камеры может рассматриваться как полностью заглушенное помещение в соответствии с критериями ГОСТ ИСО 3745. Помимо этого, камера была исследована на наличие собственных мод, связанных с ее размерами, и было показано, что их наличие не сказывается на качестве проводимых измерений в низкочастотном диапазоне.

Ключевые слова: безэховая камера, собственные моды помещения, свободное акустическое поле, поглощение звука, отраженный импульс

Anechoic sound measuring chamber of the Research Institute of Building Physics: current acoustic characteristics

Bikmukhametov F.R.^{1}, Kanev N.G.²*¹*Laboratory assistant, Faculty of Physics, ITMO University, St. Petersburg, Russia*²*D.Sc., Head of the Laboratory 'Acoustics of Halls', Research Institute of Building Physics,
Moscow, Russia*

Abstract

This paper presents the current acoustic characteristics of the anechoic chamber of the Research Institute of Building Physics. The relevance of this study lies in the high need for measurements in a free acoustic field for both scientific and industrial purposes. The acoustic field on the first and third floors of an anechoic chamber is considered, it is shown that the influence of sound reflected from the floor on the third floor is insignificant, and the third floor of the chamber can be considered as a completely anechoic room in accordance with the criteria of GOST ISO 3745. In addition, the camera was examined for the presence of its own modes related to its size, and it was shown that their presence does not affect the quality of measurements in the low frequency range.

Keywords: *anechoic room, room's own modes, free acoustic field, sound absorption, reflected pulse*

Введение

Безэховая камера – это специальная комната, устройство которой позволяет полностью или очень значительно подавлять отраженные от внутренних поверхностей (потолка, стен и иногда пола) акустические волны, что значительно снижает эхо и повышает точность измерений [1]-[6]. Чаще всего такой эффект достигается за счет покрытия поверхностей камеры специальными конструкциями в виде клиньев или пирамид из пористых звукопоглощающих материалов, таких как поролон и минеральная вата [7], [8]. Такие конструкции позволяют эффективно трансформировать механическую энергию акустической волны в тепловую на широком диапазоне частот. Заглушенные камеры бывают двух типов: заглушенными, в которых звукопоглощающими конструкциями покрыты потолок, стены и пол, и полузаглушенными [9], в которых звукопоглощающими конструкциями покрыты потолок и стены, но не пол. Иногда в безэховых камерах дополнительно делаются второй и третий этажи из решетчатого пола для расширения функциональных возможностей лаборатории.

Безэховая камера в НИИСФ РААСН представляет собой полузаглушенную камеру с тремя этажами. Данный стенд является уникальным в нашей стране по размерам и техническим возможностям. Актуальность описания характеристик и акустически свойств безэховой камеры обуславливается высокой необходимостью проведения измерений в условиях свободного акустического поля, как в научных, так и в промышленных целях в соответствии с методиками, установленными современными стандартами. В настоящей работе представлены акустические характеристики камеры, и показано, что третий этаж безэховой камеры, несмотря на приходящий отраженный от пола первого этажа импульс, можно рассматривать как полностью заглушенное помещение в соответствии с критериями ГОСТ ИСО 3745 [10]. Помимо этого, в работе камера проверяется на наличие собственных мод, существование которых может снизить качество измерений, проводимых в заглушенной комнате. Чтобы показать, что наличие собственных мод никак не влияет на проводимые измерения, первый этаж камеры был проверен на соответствие критериям [10] в низкочастотном диапазоне.

1 Характеристики безэховой камеры

Безэховая камера НИИСФ РААСН (рисунок 1) представляет собой помещение с железобетонными стенами, потолком и полом. Стены и потолок покрыты клиньями длиной 1 м из звукопоглощающего материала с целью предотвращения отражения сигналов. Поперечное сечение клина у его основания составляет 0,2 x 0,2 м. Длина комнаты составляет 14,6 м в длину, 13,1 м в ширину, 14,3 м в высоту по железобетонным конструкциям и 12,3 м, в длину, 10,8 м в ширину и 12,2 м в высоту по кончикам клиньев. Камера со звукоотражающим бетонным полом разделена сеткой на 3 этажа (на отметках 4 и 8 м). Объем камеры по железобетонным конструкциям составляет 2735 м³, по кончикам клиньев 1620,6 м³. Схема камеры в поперечном разрезе приведена на рисунке 2.

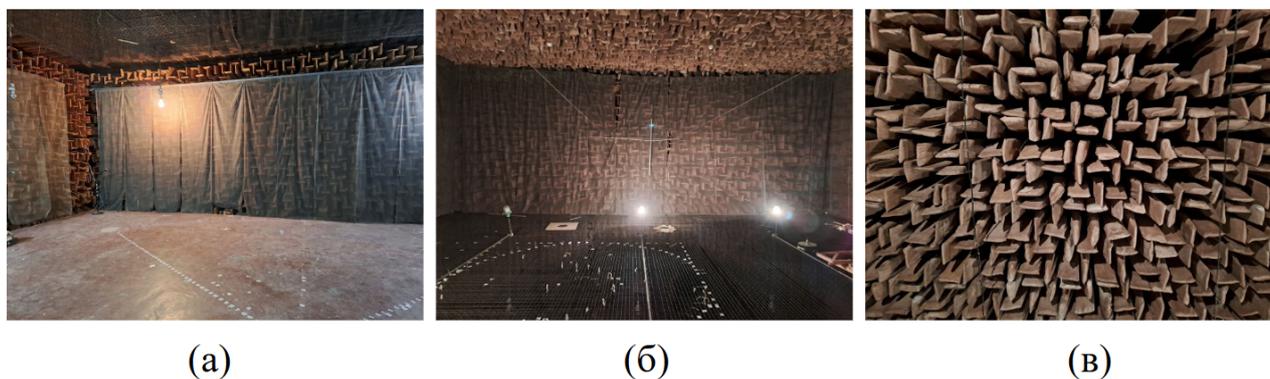


Рисунок 1 – Фотография безэховой камеры НИИ строительной физики: (а) - первый этаж камеры, (б) - третий этаж камеры, (в) - обивка стен и потолка звукопоглощающими клиньями

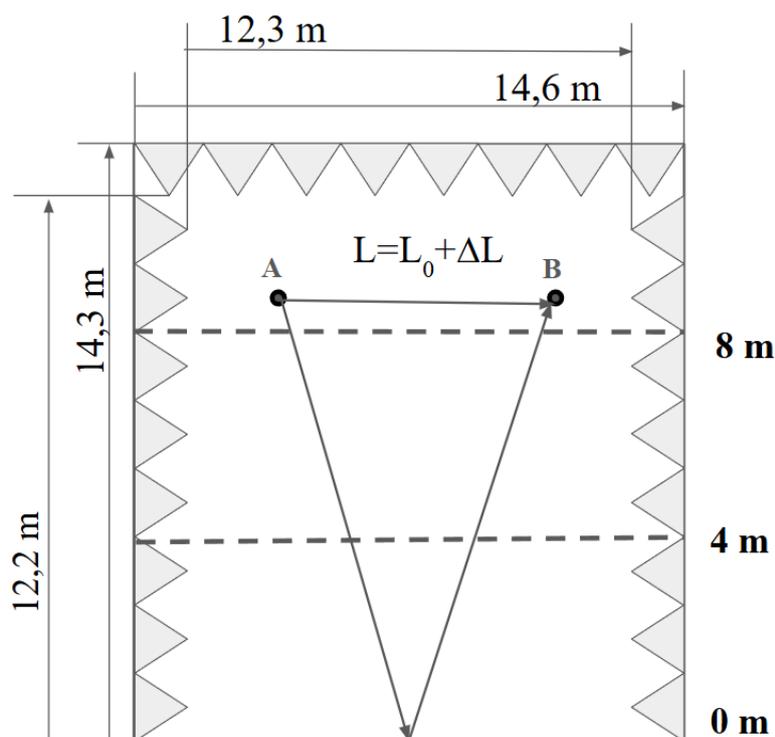


Рисунок 2 – Схема разреза безэховой камеры. В точке А третьего этажа устанавливается источник звука, в точке В - микрофон

2 Влияние отражения звука от пола на третьем этаже безэховой камеры

В данном разделе рассматривается величина импульсного отклика отраженного от пола звука на третьем этаже. Для этого в точке А третьего этажа (рисунок 2) устанавливался ненаправленный излучатель, а в точке В устанавливался микрофон, и измерялся импульсный отклик. В первую очередь представляют интерес два сигнала: первый импульс, напрямую дошедший от излучателя до микрофона (АВ) (рисунок 3а), и второй импульс, сначала отразившийся от пола, а после зафиксированный микрофоном (АОВ).

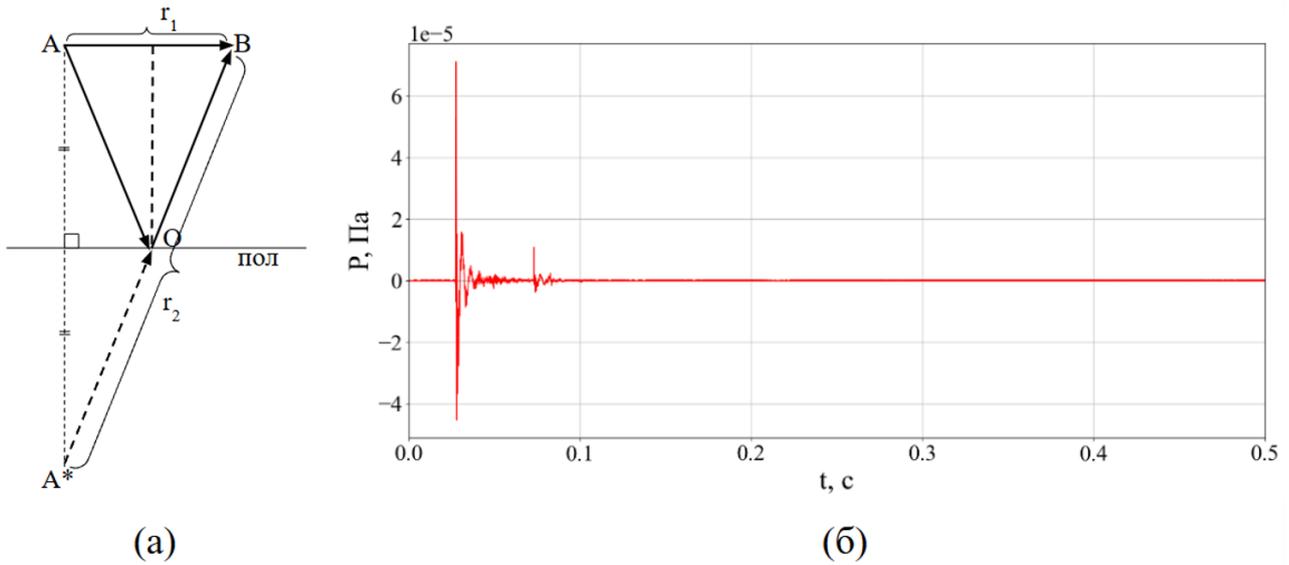


Рисунок 3 – Импульсный отклик от пола на третьем этаже: (а) - схема эксперимента, (б) - график импульсного отклика

Чтобы убедиться в том, что второй импульс (рисунок 2б) – это действительно импульс, отразившийся от пола, было вычислено время, затрачиваемое звуковой волной на прохождение соответствующего пути (АОВ). Для этого была рассчитана длина путей АОВ и АВ, опираясь на положения излучателя и микрофона, а также высоты безэховой камеры. После этого два полученных расстояния вычитались друг из друга и делились на предполагаемую скорость распространения звука в камере (330 м/с). Таким образом, полученное по формуле значение времени:

$$t = \frac{l_{AOB} - l_{AB}}{c}, \quad (1)$$

где l_{AOB} – это длина пути АОВ, l_{AB} – длина пути АВ, c – скорость звука, сравнивалось с соответствующим значением. Совпадение этих двух значений с точностью до 0,001 с, что соответствует погрешности примерно 30 см, что в сравнении с размерами безэховой камеры является незначительной поправкой, говорило о правильности полученного импульса. Уравнение сферической волны [11] записывается следующим образом:

$$P = \frac{P_0}{r} e^{ikr}, \quad (2)$$

где P_0 – амплитуда волны, r – расстояние до наблюдаемой точки. Ее амплитуда уменьшается обратно пропорционально расстоянию r . Таким образом, чтобы найти коэффициент отражения от пола, мы строим точку A^* , симметричную точке А, относительно пола. Далее проводим прямую через точки A^* и В. Амплитуда такой волны в точке В, будет составлять

$$P_2 = \frac{P_0}{r_2} V, \quad (3)$$

где r_2 – это длина отрезка $A^*В$, P_0 - начальная амплитуда, а V – коэффициент прохождения пола при распространении волны в направлении $A^*В$. В свою очередь, амплитуда волны, дошедшей напрямую от источника до микрофона, равняется

$$P_1 = \frac{P_0}{r_1}, \quad (4)$$

где r_1 – это расстояние от источника до микрофона. Выражая P_0 в двух последних равенствах и приравнявая соответствующие части равенств, получаем формулу для нахождения коэффициента V , который в случае распространении волны в направлении АОВ является коэффициентом отражения:

$$V = \frac{P_2 r_2}{P_1 r_1}. \quad (5)$$

В ходе обработки получен коэффициент отражения $r = 0,998$, что соответствует практически полному отражению звука. Данный результат хорошо согласуется с действительностью, так как пол в безэховой камере бетонный и гладкий, и его коэффициент отражения действительно должен быть близок к единице. Теперь определим, какое влияние на третьем этаже оказывает звук, отраженный от пола первого этажа. Для этого возьмем уже имеющиеся экспериментальные данные и вычислим соотношение амплитуды отраженного сигнала к амплитуде прямого сигнала:

$$\delta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (6)$$

В ходе обработки был получен коэффициент отражения, усреднённый по семи точкам измерения, который составил $\delta = 0,145$. Заметим, что влияние коэффициента отражения от пола на третьем этаже сильно меньше, чем на первом.

Дополнительно приведем оценку разницы между прямым и отраженным звуками в дБ. Для этого воспользуемся известной формулой:

$$\Delta L = 20 \log \frac{P_2}{P_1} = -16,7 \text{ дБ}. \quad (7)$$

В соответствии с [10], можно не учитывать дополнительный источник шума, если он тише основного хотя бы на 15 дБ. Таким образом, на третьем этаже можно не учитывать отраженный от пола звук и рассматривать третий этаж как полностью заглушенное помещение в соответствии с существующим стандартом [10].

3 Собственные моды безэховой камеры

В помещениях могут возникать стоячие волны, чье появление обуславливается размерами самого помещения [12]-[13]. Наличие стоячих волн создает целый ряд проблем для проведения измерений в безэховых камерах. В заглушенной комнате мы хотим добиться свободного акустического поля, наличие же стоячих волн сильно искажает желаемую картину. Например, при проведении измерений на частоте, соответствующей появлению стоячей волны, результат будет зависеть от того, в какой точке находится микрофон, что снижает качество эксперимента. При измерении диаграммы направленности излучателя на соответствующих частотах мы будем видеть пики и провалы, а при измерении АЧХ результаты эксперимента будут искажены наличием собственных мод помещения. Поэтому очень важно, чтобы безэховая камера не имела высокодобротных собственных мод. На рисунке 4 приведены результаты измерений уровня звукового давления в углу первого этажа камеры, в котором располагается микрофон. В противоположном углу размещен источник шума. Измерения проводились с работающим источником и с выключенным, с целью измерить уровень фонового шума. Из результатов измерений следует, что звуковой сигнал превышает фоновые значения только на частотах выше 30 Гц.

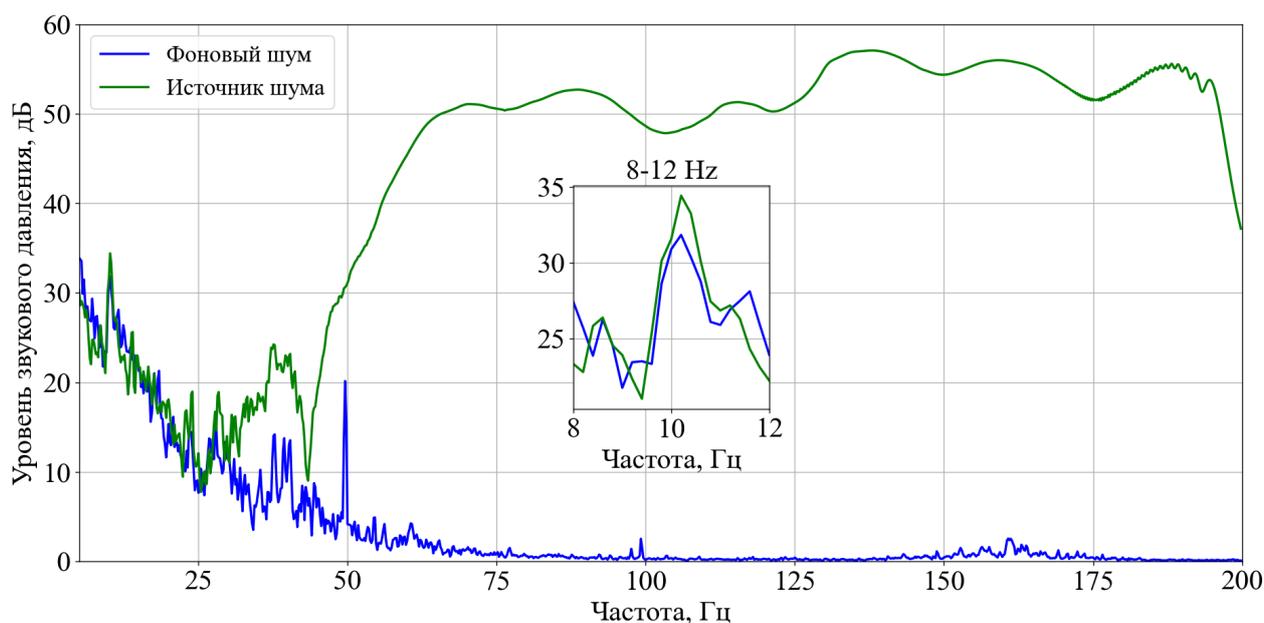


Рисунок 4 – Результаты измерений уровня звукового давления в углу камеры и расположении источника звука в противоположном углу

В низкочастотной области на рисунке 4 есть только один ярко выраженный пик – на частоте 10,2 Гц, соответствующий первой собственной частоте помещения. На более высоких частотах собственные резонансы помещения не проявляются, что говорит об их значительном демпфировании.

4 Соответствие безэховой камеры критериям ГОСТ ИСО 3745

Проведена проверка безэховой камеры на соответствие критериям [10]. Согласно [10] в безэховой камере должно создаваться свободное акустическое поле или свободное акустическое поле над отражающей поверхностью в случае, если проверяется полузаглушенная камера. Это означает, что уровень звукового давления должен быть обратно пропорционален расстоянию до источника. В первую очередь интерес представляет область низких частот, на которых возможно проявление собственных резонансов помещения.

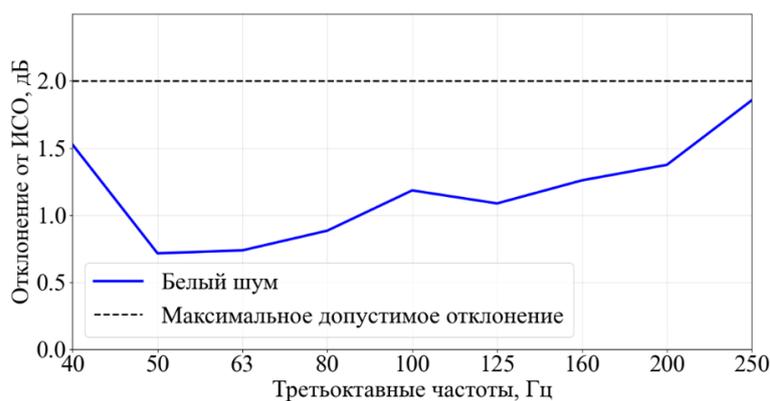
4.1 Источник звука

Для проведения проверки соответствия требованиям [10] необходим ненаправленный источник звука. Это означает, что амплитуда акустической волны, создаваемой источником, должна иметь примерно одинаковое значение на поверхности полусферы заданного радиуса. В качестве источника звука используется додекаэдр (рисунок 5а).

На рисунке 5б приведены результаты измерения отклонений, согласно которым источник можно считать ненаправленным в диапазоне 40-250 Гц. Для определения ненаправленности излучатель устанавливают приблизительно в центре камеры. Далее на полусфере радиуса 1,5 м выбирают 32 точки, в которых измеряют акустическое давление. Далее считают среднее значение акустического давления по всем точкам. Отклонение давления в каждой точке от среднего значения не должно превышать значения, указанного в стандарте. Эксперимент осуществлялся с помощью излучателя, конденсаторного микрофона, шумомера, генератора и источника питания (рисунок 6).



(a)



(б)

Рисунок 5 – Источник: а) фото источника, б) соответствие источника критериям ГОСТ ИСО 3745



Рисунок 6 – Фото экспериментальной установки

В [10] рекомендовано использование случайного сигнала, под определение которого подходит белый шум. С помощью генератора и излучателя мы создавали белый шум, уровень звукового давления которого измерялся с помощью проверенного шумомера-спектроанализатора. На рисунке 5б черной пунктирной линией обозначено максимально допустимое отклонение экспериментальных данных от табличных, представленных в пункте А.2.2.2 ГОСТа. Синей сплошной линией представлено измеренное для излучателя отклонение в режиме белого шума. Как можно видеть, излучатель является ненаправленным в диапазоне 40–250 Гц для белого шума.

4.2 Проверка камеры как полузаглушенного пространства

Теперь проверим акустическое поле над отражающей поверхностью на первом этаже. Для этого, в соответствии с пунктом А.3.3 в [10], выбираются пять траекторий с началом в акустическом центре излучателя и направленных в углы комнаты таким образом, что ни одна траектория не была параллельна полу, каждая траектория должна содержать минимум 10 точек, первая точка располагается на расстоянии минимум 0,5 метра от акустического центра излучателя, расстояние между двумя соседними точками минимум 0,1 м. Запись сигнала в каждой точке проводится 30 секунд, что соответствует

критериям [10]. Первые четыре траектории представляли из себя лучи, с началом в центре камеры и ведущими в углы камеры, образованные полом и двумя соседними стенами так, что траектория составляла угол 15° с полом. Пятая траектория представляла собой луч, направленный под углом 60° к полу и ведущий в верхний угол камеры. В предположении, что акустическое давление в точке обратно пропорционально расстоянию до источника, мы вычисляем следующее значение:

$$L_p(r) = 20lg\left(\frac{a}{r - r_0}\right), \quad (8)$$

где

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N r_i \sum_{i=1}^N r_i q_i - \sum_{i=1}^N r_i^2 \sum_{i=1}^N q_i}{\sum_{i=1}^N r_i \sum_{i=1}^N q_i - N \sum_{i=1}^N r_i q_i}, \quad (9)$$

где r_i – это расстояние от i -ой точки измерения до центра измерительной сферы, r_0 – смещение акустического центра вдоль траектории микрофона. Оно является расстоянием между акустическим центром источника и центром измерительной полусферы. В нашем случае мы считаем, что акустический центр совпадает с геометрическим центром и полагаем $r_0 = 0$.

$$q_i = 10^{-0,05L_{pi}}. \quad (10)$$

Отклонение уровней звукового давления от расчетных определяется по формуле:

$$\Delta L_{pi} = L_{pi} - L_p(r_i), \quad (11)$$

где L_{pi} – это экспериментально измеренный уровень звукового давления в точке, $L_p(r_i)$ – это расчетный уровень звукового давления в точке. Максимальное допустимое отклонение регулируется [10]. Экспериментальные данные представлены на рисунке 7.

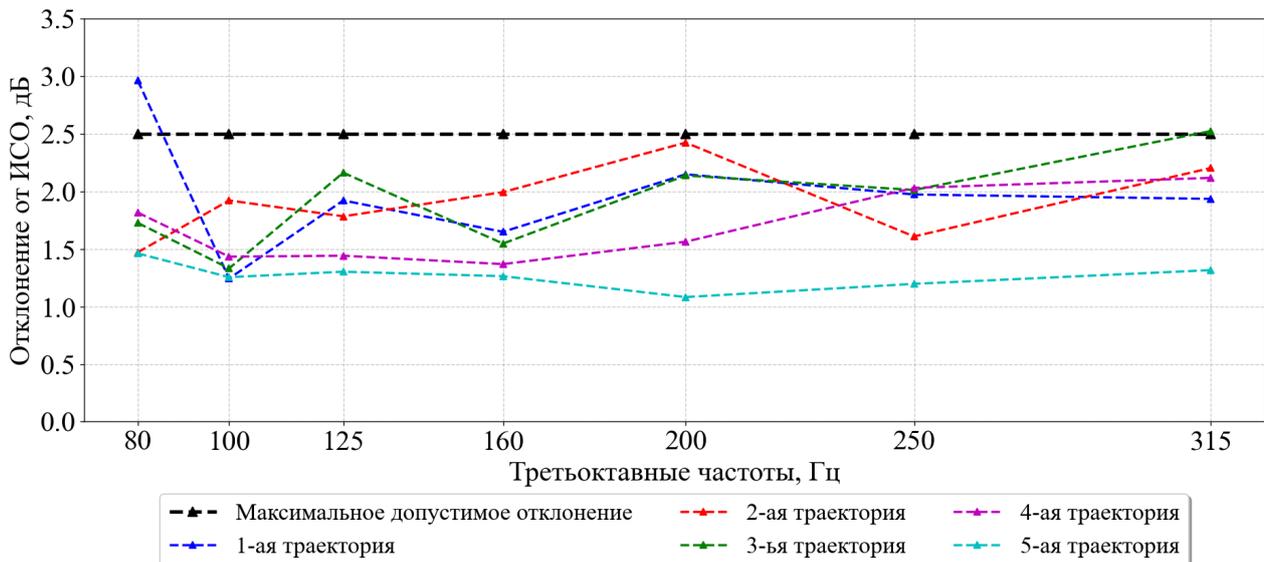


Рисунок 7 – Отклонение экспериментальных данных на первом этаже от критериев ГОСТ ИСО 3745 для полузаглушенной камеры

Как можно видеть, в низкочастотном диапазоне камера полностью удовлетворяет существующим критериям. Таким образом, собственные колебания или отражения от поверхностей камеры не влияют на качество эксперимента, проводимого в заглушенной камере.

4.3 Проверка камеры как заглушенного пространства

Важным является вопрос: можно ли рассматривать третий этаж камеры как полностью заглушенное пространство, в силу малого влияния отраженного от пола звука. Проверим третий этаж согласно критериям [10]. Аналогично предыдущим шагам выбирается траектория, направленная в верхний угол камеры. На траектории выбрана 21 точка. Результаты измерений приведены на рисунке 8.

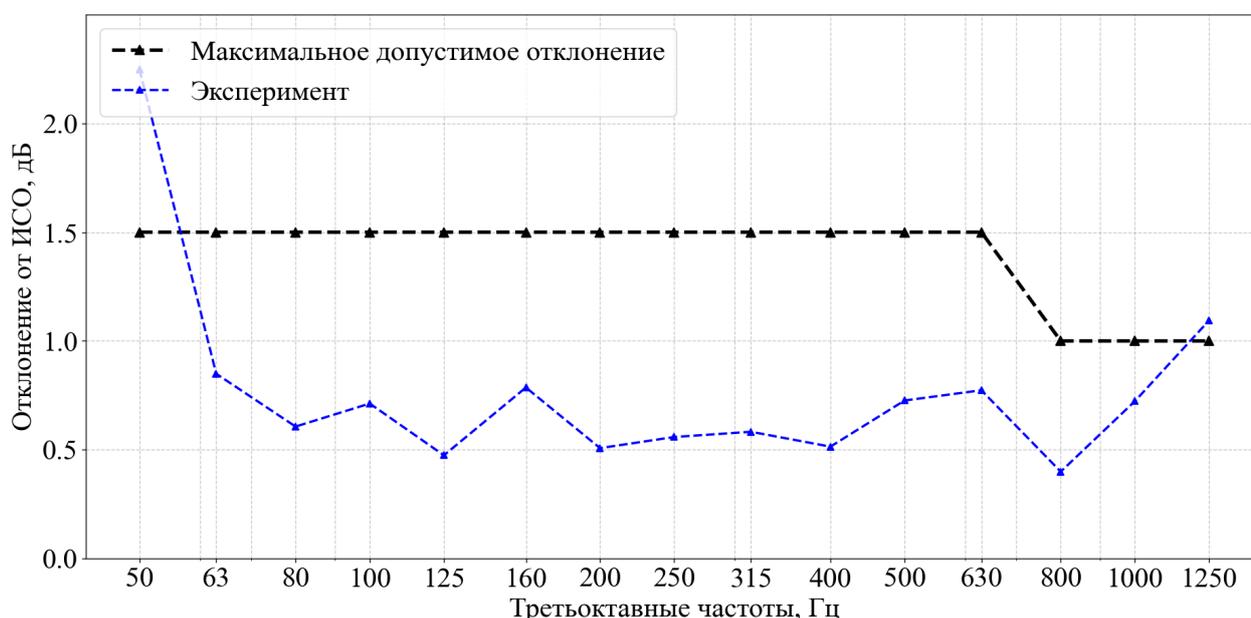


Рисунок 8 – Отклонение экспериментальных данных на третьем этаже от критериев ГОСТ ИСО 3745 для заглушенной камеры

Таким образом становится ясно, что третий этаж безэховой камеры может рассматриваться как полностью заглушенное помещение. Отметим, что полученные результаты о выполнении требования для заглушенного и полузаглушенного пространства получены при помощи источника звука формально удовлетворяющем требованиям ненаправленности только в диапазоне частот 40–250 Гц (рисунок 5б). Поэтому данные измерения формально подтвердили соответствие камеры требованиям ГОСТ в указанном диапазоне, что с точки зрения практики является наиболее критичным, поскольку на низких частотах вследствие влияния собственных резонансов помещения могут проявляться отклонения от свободного поля.

Заключение

В работе представлены результаты измерений акустических характеристик звукомерной камеры НИИСФ РААСН – помещения размером 14,6 м x 13,1 м x 14,3 м по железобетонным конструкциям и 12,3 м x 10,8 м x 12,2 м по кончикам клиньев с потолком и стенами, полностью поглощающими звук, и отражающим полом. В результате измерений было установлено, что на третьем уровне камеры, расположенном на расстоянии 8 м от твердого пола, выполняются критерии заглушенного помещения

согласно [10]. Данный результат обоснован двумя способами: измерением звука, отраженного полом, и проверкой условий свободного акустического поля.

Таким образом, в низкочастотной области (63-250 Гц) заглушенная камера НИИСФ РААСН является полузаглушенным пространством на уровне пола и полностью заглушенным пространством на высоте 8 м.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 25-79-31027, <https://rscf.ru/project/25-79-31027/>

Список использованных источников

1. Beranek L. L., Sleeper Jr H. P. The design and construction of anechoic sound chambers //The Journal of the Acoustical Society of America. – 1946. – Vol. 18, N 1. – P. 140-150. DOI: 10.1121/1.1916351.
2. Kim K. Design and analysis of experimental anechoic chamber for localization //The Journal of the Acoustical Society of Korea. – 2012. – Vol. 31, N 4. – P. 225-234.
3. Сух В. et al. Design and validation of a low-cost acoustic anechoic chamber //Audio Engineering Society Convention 149. – Audio Engineering Society, 2020.
4. Kekus-Kumor P., Sieradzki A. A low-cost anechoic chamber for rotor aeroacoustics research: design and validation //Transactions on aerospace research. – 2025. – Vol. 2025, N 2. – P. 18-39. DOI: 10.2478/tar-2025-0007.
5. Копьев В.Ф., Пальчиковский В.В., Беляев И.В., Берсенев Ю.В. и др. Создание заглушенной установки для аэроакустических экспериментов и исследование ее акустических характеристик. // Акустический журнал. – 2017. – Т. 63, N 1. – С. 114-126
6. Haasjes R., Berkhoff A. P. A small-scale active anechoic chamber //Applied Acoustics. – 2024. – Vol. 224. – P. 110130. DOI: 10.1016/j.apacoust.2024.110130.
7. R. W. Young O. H. Schuck. A novel, highly effective sound-absorbing arrangement and the construction of a dead room. //, J. Acoust. Soc. Am. – 1941. – Vol. 13. – P. 191-193.
8. Christian J. et al. Absorber Geometry Size Optimization For Acoustic Anechoic Chamber Design Using Genetic Algorithm //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2022. – Vol. 2243, N 1. – P. 012085. DOI: 10.1088/1742-6596/2243/1/012085
9. Pinhède C. et al. Towards an active semi-anechoic room: simulations and first measurements //Acta Acustica. – 2024. – Vol. 8. – P. 56. DOI: 10.1051/aacus/2024052
10. ГОСТ ИСО 3745-2014. Акустика. Определение уровней звуковой мощности и звуковой энергии источников шума по звуковому давлению. Точные методы для заглушенных и полузаглушенных камер. – Введ. 01.11.2015. – М. : Стандартиформ, 2015. – 59 с.
11. Исакович М. А. Общая акустика. – М.: Наука, 1973. – 495 с.
12. Kurz E. et al. The edge absorber as a ‘modal brake’ //Forum Acusticum. – 2020. – P. 1745-1752.
13. R. Hofer, ‘Analyse des modalen Schallfeldes zur Untersuchung der Funktionsweise von Kantenabsorbern (Analysis of the modal sound field to study the operation of edge absorbers)’ : [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.spcs.tugraz.at/student-projects/Weselak-33.html> (Грац, сентябрь 2022 года)

References

1. Beranek L. L., Sleeper Jr H. P. The design and construction of anechoic sound chambers //The Journal of the Acoustical Society of America. – 1946. – Vol. 18, N 1. – P. 140-150. DOI: 10.1121/1.1916351.
2. Kim K. Design and analysis of experimental anechoic chamber for localization //The Journal of the Acoustical Society of Korea. – 2012. – Vol. 31, N 4. – P. 225-234.
3. Cuyx B. et al. Design and validation of a low-cost acoustic anechoic chamber //Audio Engineering Society Convention 149. – Audio Engineering Society, 2020.
4. Kekus-Kumor P., Sieradzki A. A low-cost anechoic chamber for rotor aeroacoustics research: design and validation //Transactions on aerospace research. – 2025. – Vol. 2025, N 2. – P. 18-39. DOI: 10.2478/tar-2025-0007.
5. Kopiev V.F., Palchikovskiy V.V., Belyaev I.V., Bersenev Yu.V., et al. Development of an anechoic facility for aeroacoustic experiments and investigation of its acoustic characteristics. // Acoustic Journal. – 2017. – Vol. 63, N 1. – P. 114-126.
6. Haasjes R., Berkhoff A. P. A small-scale active anechoic chamber //Applied Acoustics. – 2024. – Vol. 224. – P. 110130. DOI: 10.1016/j.apacoust.2024.110130.
7. R. W. Young O. H. Schuck. A novel, highly effective sound-absorbing arrangement and the construction of a dead room. //, J. Acoust. Soc. Am. – 1941. – Vol. 13. – P. 191-193.
8. Christian J. et al. Absorber Geometry Size Optimization For Acoustic Anechoic Chamber Design Using Genetic Algorithm //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2022. – Vol. 2243, N 1. – P. 012085. DOI: 10.1088/1742-6596/2243/1/012085
9. Pinhède C. et al. Towards an active semi-anechoic room: simulations and first measurements //Acta Acustica. – 2024. – Vol. 8. – P. 56. DOI: 10.1051/aacus/2024052
10. GOST ISO 3745-2014. Acoustics. Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure. Precision methods for anechoic and hemi-anechoic rooms. – Date of introduction 01.11.2015. – Moscow: Standartinform, 2015. -59 p.
11. Isakovich, M. A. General Acoustics. – Moscow: Nauka, 1973. – 495 p.
12. Kurz E. et al. The edge absorber as a ‘modal brake’ //Forum Acusticum. – 2020. – P. 1745-1752.
13. R. Hofer, ‘Analyse des modalen Schallfeldes zur Untersuchung der Funktionsweise von Kantenabsorbern (Analysis of the modal sound field to study the operation of edge absorbers)’ : [Electronic resource]. – URL: <https://www.spcs.tugraz.at/student-projects/Weselak-33.html> (Graz, September 2022)

УДК: 614.872.5

OECD: 1.03

Математическая модель описания вибраций, возникающих при работе сельскохозяйственной техники

Воронов А.С.^{1*}, Крутова В.А.²¹Ассистент кафедры «Механика деформируемого твердого тела»,²Д.т.н., доцент, и.о. зав. кафедрой «Механика деформируемого твердого тела»,^{1,2}Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»

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

Аннотация

Неверная отстройка инерционно-жесткостных параметров механических систем в сочетании с низким уровнем демпфирования приводит к возникновению значительных вибраций в процессе эксплуатации сельскохозяйственной техники. Это явление не только вызывает повышенные динамические нагрузки на узлы техники, сокращая ресурс работы, но и напрямую воздействует на оператора. В частности, регистрируемые уровни локальной вибрации на рулевом колесе часто превышают допустимые нормы, установленные СанПиН и ГОСТ, что создает риск развития профессиональных заболеваний. В данной работе предлагается уточненная математическая модель описания вибраций, возникающих при работе сельскохозяйственной техники. Это может повысить точность аналитических расчетов и послужить для последующего этапа обоснования эффективности методов виброзащиты и оптимизации динамических характеристик техники, направленных на обеспечение надежности и соблюдение требований охраны труда.

Ключевые слова: вибрация, демпфирование, уравнение Лагранжа, гармоническая вибрация, собственные частоты колебаний, виброускорение

A Mathematical Model for Describing Vibrations Occurring During the Operation of Agricultural Machinery

Voronov A.S.^{1*}, Krutova V.A.²¹Assistant of the department of Mechanical of Deformable Solids²D.Sc., Assistant Professor, Acting Head of the department
of Mechanical of Deformable Solids^{1,2}Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia

Abstract

Incorrect tuning of the inertia-stiffness parameters of mechanical systems combined with a low level of damping leads to significant vibrations during the operation of agricultural machinery. This phenomenon not only causes increased dynamic loads on machine components, reducing their service life, but also directly affects the operator. In particular, recorded levels of local vibration on the steering wheel often exceed permissible limits established by SanPiN and GOST standards, which creates a risk of developing occupational diseases. This work proposes a refined mathematical model for describing vibrations arising during the operation of agricultural machinery. This can improve the accuracy of analytical calculations and serve as a basis for the

*E-mail: voronov_as@voenmeh.ru (Воронов А.С.)

subsequent stage of justifying the effectiveness of vibration protection methods and optimizing the dynamic characteristics of the equipment, aimed at ensuring reliability and compliance with occupational health and safety requirements.

Keywords: vibration, damping, Lagrange's equation, harmonic vibration, natural frequencies, vibration acceleration

Введение

Во многих работах, посвященных исследованиям вибраций, возникающих при эксплуатации сельскохозяйственной техники, реальный объект с распределенными инерционно-жесткостными свойствами заменяется дискретным, с несколькими массами [1]-[3]. Такой подход оправдан для конструкций, у которых имеются объекты, масса которых много больше остальных масс. К примеру, в работе [4] исследуется трактор как система с двумя степенями свободы одного объекта – поступательной и вращательной. В работе [5] также рассматривается сельскохозяйственная техника как двумассовая система, однако в ней другие две степени свободы – два поступательных движения разных объектов.

В данной работе трактор рассматривается как трехмассовая система – с тремя поступательными степенями свободы. Такой подход позволяет уточнить аналитические зависимости и уменьшить погрешности в сравнении с экспериментальными данными.

1 Постановка задачи исследования

Рассмотрим трактор как трехмассовую систему. Введем следующие основные геометрические объекты и их обозначения:

1) Рама трактора, к которой посредством упругих соединений осуществляется крепление других конструктивных элементов. Масса рамы – m_1 , коэффициент жесткости соединения с условно неподвижной опорой – k_1^* , коэффициент демпфирования соединения – c_1^* ;

2) Двигатель трактора. Масса двигателя – m_3 , коэффициент жесткости соединения с рамой – k_3^* , коэффициент демпфирования – c_3^* ;

3) Рулевое колесо. Масса рулевого колеса – m_2 , коэффициент жесткости соединения – k_2 , коэффициент демпфирования – c_2 ;

В ходе работы двигателя ввиду несбалансированности вращающихся элементов возникает гармонически изменяющаяся нагрузка $P(t)$.

С учетом введенных обозначений расчетная схема исследуемого объекта представлена на рисунке 1.

На данном этапе исследований не будем учитывать вращение двигателя и рамы относительно оси, направленной перпендикулярно плоскости рисунка 1.

Для дальнейшего удобства заменим жесткости k_1^* и k_3^* , а также коэффициенты демпфирования c_1^* и c_3^* на эквивалентные по соотношению для параллельно соединенных упругих элементов:

$$k_1 = 2k_1^*, \quad k_3 = 2k_3^*, \quad c_1 = 2c_1^*, \quad c_3 = 2c_3^*, \quad (1)$$

где k_1 – коэффициент эквивалентной жесткости опор рамы, k_3 – коэффициент эквивалентной жесткости опор двигателя.

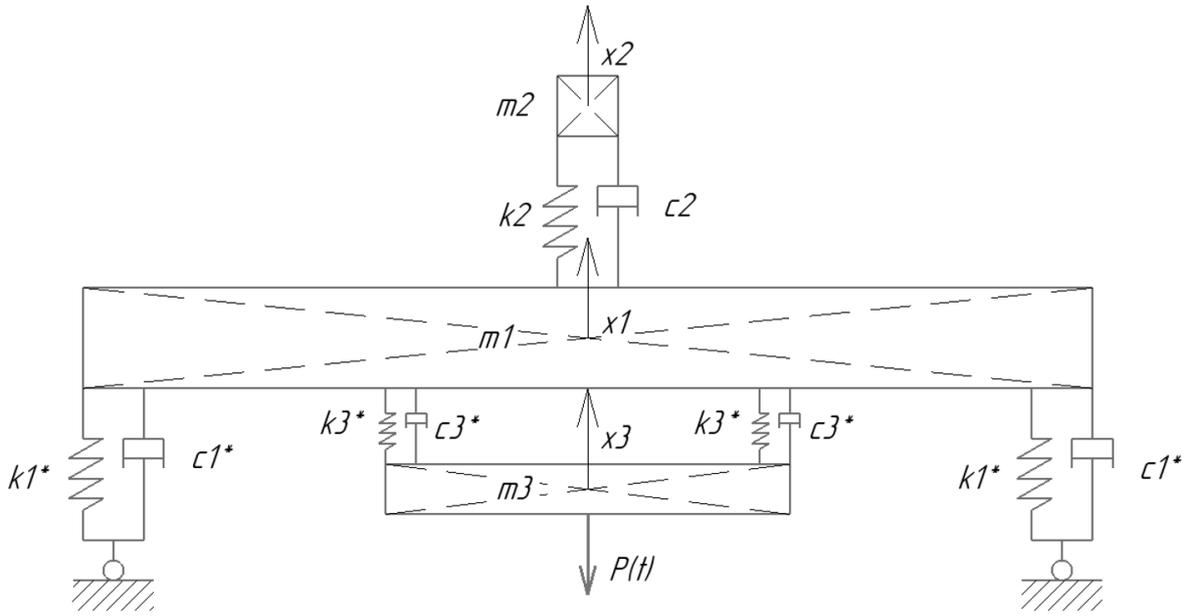


Рисунок 1 – Дискретная трехмассовая модель трактора

2 Уравнение колебаний трехмассовой системы

Для системы, изображенной на рисунке 1, запишем уравнение Лагранжа II рода [6]:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_i} = P_i, \quad (2)$$

где T – кинетическая энергия системы, Π – потенциальная энергия системы, R – функция Рэля (отвечающая за диссипацию энергии), P – обобщенная неконсервативная и недиссипативная сила, q_i – обобщенная координата, \dot{q}_i – обобщенная скорость.

Рассмотрим свободные незатухающие колебания. Тогда каждое из слагаемых правой части уравнения равно нулю, то есть:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} = 0. \quad (3)$$

Для трехмассовой системы, изображенной на рисунке 3, потенциальная и кинетическая энергии определяются уравнениями:

$$T = \frac{m_1(\dot{x}_1)^2}{2} + \frac{m_2(\dot{x}_2)^2}{2} + \frac{m_3(\dot{x}_3)^2}{2}, \quad (4)$$

$$\Pi = \frac{k_1 x_1^2}{2} + \frac{k_2(x_2 - x_1)^2}{2} + \frac{k_3(x_3 + x_1)^2}{2}. \quad (5)$$

Подставляя выражения для кинетической и потенциальной энергий в уравнение Лагранжа, получаем:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + (k_1 + k_2 + k_3)x_1 - k_2 x_2 + k_3 x_3 = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 - k_2 x_1 + k_2 x_2 = 0 \\ m_3 \ddot{x}_3 + k_3 x_1 + k_3 x_3 = 0 \end{cases}. \quad (6)$$

В матричном виде:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 + k_3 & -k_2 & k_3 \\ -k_2 & k_2 & 0 \\ k_3 & 0 & K_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}. \quad (7)$$

Будем искать решение в виде:

$$x_i(t) = A_i \sin(2\pi f_i t), \quad (8)$$

где A_i – амплитуды колебаний, f_i – собственные частоты колебаний.

Подставив (8) в (7), получаем:

$$\left(-4\pi^2 f_i^2 \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 + k_3 & -k_2 & k_3 \\ -k_2 & k_2 & 0 \\ k_3 & 0 & K_3 \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}. \quad (9)$$

Собственные частоты колебаний f_i определяются исходя из равенства нулю определителя этой системы:

$$\det \left(-4\pi^2 f_i^2 \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 + k_3 & -k_2 & k_3 \\ -k_2 & k_2 & 0 \\ k_3 & 0 & K_3 \end{bmatrix} \right) = 0. \quad (10)$$

Аналитическое решение сводится к уравнению 6-й степени (бикубическому, поэтому можно говорить об уравнении 3-й степени). В инженерной практике задачи с системами, представляемыми более чем 3 массами, аналитически не решаются; для определения собственных частот колебаний используют численные методы. Так, в программном комплексе MathCAD собственные частоты колебаний могут быть определены с помощью следующей функции:

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\text{genvals}(K, M)}, \quad (11)$$

где K – матрица жесткости системы, M – матрица масс системы.

Недостатком является требования конкретных численных параметров масс и жесткостей элементов системы [7].

Рассмотрим некоторые усредненные инерционно-жесткостные параметры системы, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Усредненные инерционно-жесткостные параметры системы

Наименование элементы	Масса элемента m , кг	Жесткость соединения элементов k^* , Н/м	Коэффициент демпфирования c^* , Н/мс
Рама	500	10^6	1256
Двигатель	800	10^7	49
Рулевое колесо	15	10^5	5060

Подставляя эти значения в уравнение (10) и с помощью функции (11), получим:

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\text{genvals}(K, M)} = \left\{ \begin{array}{l} 6,084 \\ 13,07 \\ 41,399 \end{array} \right\} \text{Гц.}$$

3 Анализ вынужденных колебаний с демпфированием

Для трехмассовой системы с демпфированием уравнения Лагранжа дополняются слагаемыми с функцией Рэля и вынуждающей не диссипативной неконсервативной силой (уравнение (2)). Функция Рэля для рассматриваемой системы имеет вид:

$$R = \frac{c_1 \dot{x}_1^2}{2} + \frac{c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1)^2}{2} + \frac{c_3 (\dot{x}_3 + \dot{x}_1)^2}{2}. \quad (12)$$

Подставляя (12) в (2), получаем:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2 + c_3) \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + c_3 \dot{x}_3 + (k_1 + k_2 + k_3) x_1 - k_2 x_2 + k_3 x_3 = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 - c_2 \dot{x}_1 + c_2 \dot{x}_2 - k_2 x_1 + k_2 x_2 = 0 \\ m_3 \ddot{x}_3 + c_3 \dot{x}_1 + c_3 \dot{x}_3 + k_3 x_1 + k_3 x_3 = P(t) \end{cases}. \quad (13)$$

Для примера рассмотрим вынуждающую силу как гармоническую с амплитудой 100 Н. Частота работы двигателя на холостом ходу варьируется в пределах от 600 до 1200 об/мин. Примем частоту равно 1000 об/мин или 16,67 Гц. Тогда:

$$P(t) = P_0 \sin(\omega t) = 100 \sin(2\pi \cdot 16,67t).$$

Решая уравнение (13), получаем графические зависимости виброперемещений и виброскоростей от времени. На рисунках 2-4 представлены максимальные амплитуды виброперемещений, виброскоростей и виброускорений.

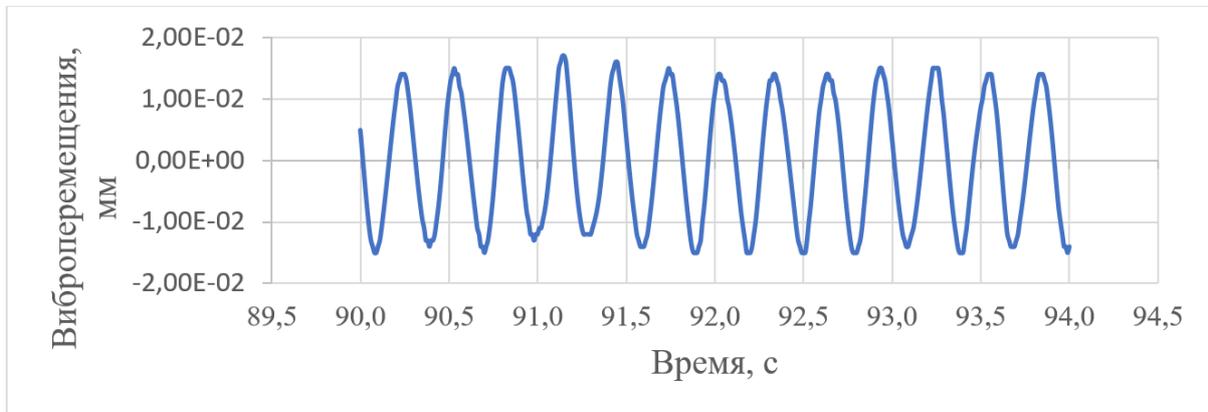


Рисунок 2 – Виброперемещения рулевого колеса, мм

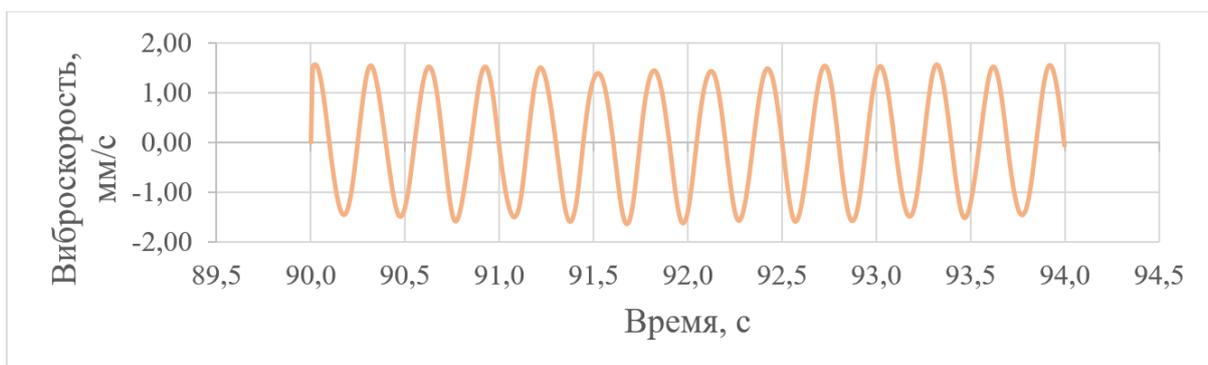
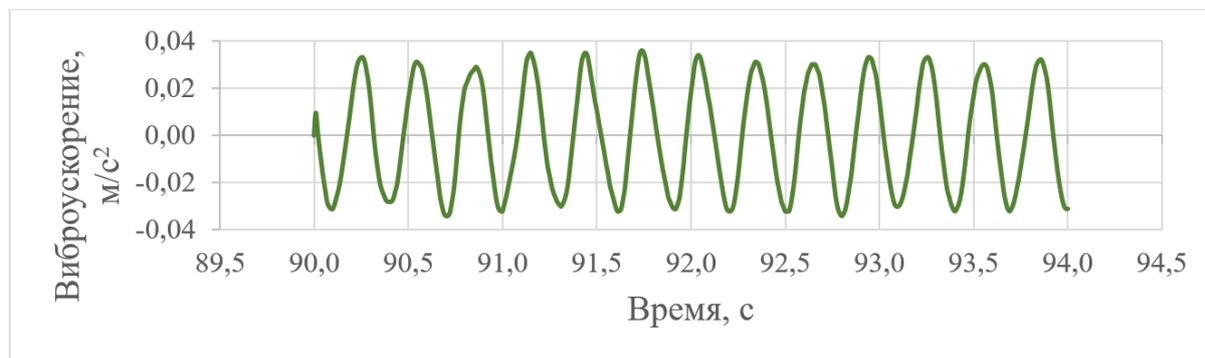


Рисунок 3 – Виброскорости рулевого колеса, мм/с

Рисунок 4 – Виброускорения рамы, м/с²

Из рисунков зависимостей виброперемещений и виброскоростей от времени видно, что в первые секунды действия вынуждающей силы на систему имеет место переходной процесс – гармонические колебания сочетаются с собственными. Собственные колебания по природе затухающие, поэтому с течением времени движение описывается только гармонической частью – амплитуда не зависит от времени.

Сводные результаты по виброперемещениям, виброскоростям и виброускорениям представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сводные результаты

Элемент, на котором измеряется вибрация	Максимальное виброперемещение, мм	Максимальная виброскорость, мм/с	Максимальное виброускорение, м/с ²
Рама трактора	0,01	1,184	0,023
Двигатель	0,00891	0,929	0,02
Рулевое колесо	0,017	1,679	0,037

Заключение

В статье рассмотрен математический подход к описанию вибраций, возникающих при эксплуатации сельскохозяйственной техники. Трактор рассматривается как трехмассовая система. Составлена система уравнений Лагранжа II рода, которая позволила получить собственные частоты колебаний и проанализировать поведение трактора под действием гармонической силы. Исследование вибраций с использованием многомассовых систем может повысить точность аналитических расчетов и уменьшить погрешность с экспериментальными данными.

Список использованных источников

1. Иванов, Н. И. Основы виброакустики : учебное пособие / Н. И. Иванов. – Санкт Петербург: БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, 2021. – 132 с. – ISBN 978 5 907324 27 5.
2. Буторина, М. В. Основы виброакустики. Теория и практика борьбы с шумом и вибрацией: учебник. Т. 1 / М. В. Буторина, Н. И. Иванов, А. Е. Шашурин. – Санкт Петербург: Изд во БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, 2024. – 387 с.: ил. – ISBN 978 5 00221 070 1.

3. Вибрация энергетических машин: справочное пособие / Н. В. Григорьев, Н. Г. Беляковский, В. К. Дондошанский и др.; под ред. д-ра техн. наук, проф. Н. В. Григорьева. – Ленинград: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1974. – 463 с.
4. Юань, Цзя-ци; Чжан, Лян. Natural frequency and modal analysis of tractor vibration system // Scientific Reports. – 2025. – Т. 15. – Ст. 33259. – DOI: 10.1038/s41598-025-18736-x.
5. Яицков, И. А. Методология обеспечения виброакустической безопасности локомотивных бригад при проектировании и эксплуатации тепловозов и моторовозов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.26.01 / Яицков Иван Анатольевич ; науч. консультант А. Н. Чукарин ; Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2019. – 279 с.
6. Вильке, В.Г. Теоретическая механика: учебник и практикум для вузов/ В.Г. Вильке. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2025. – 311 с. – (Высшее образование). – Текст : непосредственный.
7. Моисеев, Н. Н. Численные методы в теории оптимальных систем / Н. Н. Моисеев. – Москва: Наука, 1971. – 424 с.

References

1. Ivanov, N. I. (2021). *Osnovy vibroakustiki [Fundamentals of Vibroacoustics]*. Saint Petersburg: BSTU “Voenmekh” named after D. F. Ustinov. 132 p. ISBN 978-5-907324-27-5.
2. Butorina, M. V., Ivanov, N. I., & Shashurin, A. E. (2024). *Osnovy vibroakustiki. Teoriya i praktika bor'by s shumom i vibratsiyey: uchebnik. T. 1 [Fundamentals of Vibroacoustics. Theory and Practice of Noise and Vibration Control: Textbook. Vol. 1]*. Saint Petersburg: BSTU “Voenmekh” named after D. F. Ustinov. 387 p., ill. ISBN 978-5-00221-070-1.
3. Grigor'ev, N. V., Belyakovskiy, N. G., Dondoshanskiy, V. K., et al. (1974). *Vibratsiya energeticheskikh mashin: spravochnoe posobie [Vibration of Power Machines: Reference Manual]*. N. V. Grigor'ev (Ed.). Leningrad: Mashinostroenie, Leningrad Branch. 463 p.
4. Yuan, J., & Zhang, L. (2025). Natural frequency and modal analysis of tractor vibration system. *Scientific Reports*, 15, 33259. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-18736-x>
5. Yaitskov, I. A. (2019). *Metodologiya obespecheniya vibroakusticheskoy bezopasnosti lokomotivnykh brigad pri proektirovanii i ekspluatatsii teplovozov i motovozov: dis. dokt. tekhn. nauk, 05.26.01 [Methodology for Ensuring Vibroacoustic Safety of Locomotive Crews in the Design and Operation of Diesel Locomotives and Motor Locomotives: Doctoral Dissertation, 05.26.01]*. Rostov State Transport University. 279 p.
6. Vilke, V. G. (2025). *Teoreticheskaya mekhanika: uchebnik i praktikum dlya vuzov [Theoretical Mechanics: Textbook and Workshop for Universities]* (4th ed., rev. and enl.). Moscow: Yurayt Publishing. 311 p. (Higher Education Series).
7. Moiseev, N. N. (1971). *Chislennyye metody v teorii optimal'nykh sistem [Numerical Methods in the Theory of Optimal Systems]*. Moscow: Nauka. 424 p.

УДК: 613.62

OECD: 1.03

Исследование воздействия производственного шума, как основной причины возникновения профессиональных заболеваний работников промышленных предприятий Российской Федерации

Дементьева Ю.В.^{1*}, Косякин В.С.², Плетнев В.С.³, Шилов А.А.⁴

¹К.т.н., доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экология»

²К.т.н., начальник технического отдела

^{3,4}Аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экология»

^{1,3,4}Приволжский государственный университет путей сообщения, г. Самара, РФ

²Департамент экологии и техносферной безопасности ОАО «РЖД», г. Москва, РФ

Аннотация

В данной статье проведен анализ условий труда работников промышленных предприятий Российской Федерации за период с 2020 по 2024 гг. и установлено, что основной причиной возникновения у них профессиональных заболеваний является воздействие уровня шума, не соответствующего требованиям гигиенических норм. Для дефиниции отрасли Российской Федерации, где наибольшее число работников может утратить свою трудоспособность от воздействия повышенного уровня шума, проведен корреляционный анализ, результаты которого показали высокую зависимость статистических значений удельного веса рабочих мест промышленных предприятий Российской Федерации, не соответствующих гигиеническим нормативным требованиям по производственному фактору «шум» от динамики удельного веса рабочих мест отрасли «Водоснабжение и водоотведение», не соответствующих гигиеническим нормативным требованиям по вредному производственному фактору «шум» (коэффициент корреляции $r_{xy} = 0,97$).

Ключевые слова: вредные факторы производственной среды, профессиональные заболевания, производственный шум, специальная оценка условий труда, принцип Парето, корреляционная взаимосвязь

Research on the impact of industrial noise as the main cause of occupational diseases among employees of industrial enterprises in the Russian Federation

Demytyeva Yu.V.^{1}, Kosyakin V.S.², Pletnev V.S.³, Shilov A.A.⁴*

¹Ph.D., Associate Professor of the Department of Life Safety and Ecology

²Ph.D., Head of the Technical Department

^{3,4}Postgraduate Student of the Department of Life Safety and Ecology

^{1,3,4}Volga State University of Railway Engineering, Samara, Russia

²Department of Ecology and Technosphere Safety of Russian Railways, Moscow, Russia

*E-mail: yulia_demytyeva@bk.ru (Дементьева Ю.В.)

Abstract

This article analyzes the working conditions of employees at industrial enterprises in the Russian Federation for the period from 2020 to 2024 and establishes that the main cause of occupational diseases is exposure to noise levels that do not meet the requirements of hygienic standards. To define the type of economic activity of organizations in the Russian Federation where the largest number of employees have lost their professional suitability due to exposure to excessive noise, a correlation analysis was conducted to define the industry in the Russian Federation where the largest number of workers may lose their ability to work due to exposure to high levels of noise. The results of the analysis showed a strong correlation between the statistical values of the proportion of industrial enterprises in the Russian Federation that do not meet the hygienic standards for noise exposure and the dynamics of the proportion of workers in the "Water Supply and Sanitation" industry who do not meet the hygienic standards for noise exposure (correlation coefficient $r_{xy} = 0.97$, which is high).

Keywords: harmful factors of the working environment, occupational diseases, industrial noise, special assessment of working conditions, Pareto principle, correlation relationships

Введение

Конституция Российской Федерации провозглашает человека высшей ценностью государства, а также закрепляет за ним соблюдение и защиту его прав [1].

Одними из главных государственных задач в аспекте безопасности и охраны труда являются обеспечение поддержания здоровья и сохранения жизни трудящихся в условиях их рабочей деятельности, превентивность профессиональной заболеваемости. Требования государственного трудового законодательства регламентируют гарантии защиты прав трудящихся на их профессиональную деятельность в условиях, соответствующих нормам охраны и безопасности труда.

Работодателю вменены обязанности по созданию для работников безопасных условий труда, соответствующих государственным нормативным требованиям, реализовывать целенаправленные профилактические мероприятия по снижению профессиональных рисков возникновения заболеваний [2].

1 Актуальность исследования причин возникновения профессиональных заболеваний

Статистическая динамика коэффициентов частоты профессиональной заболеваемости, определяемых отношением числа заболевших на рабочем месте на 10000 трудящихся Российской Федерации (далее – России), за время с 2020 по 2024 гг. [3], изображена в диаграмме (рисунок 1).

Наглядно, что статистика заболеваемости на производстве среди трудящихся промышленных организаций России динамична, коэффициент частоты в среднем вырос на 26,4 %, в т.ч. хронических – на 43,5 %, поэтому проблема в данном направлении за последние годы является актуальной.

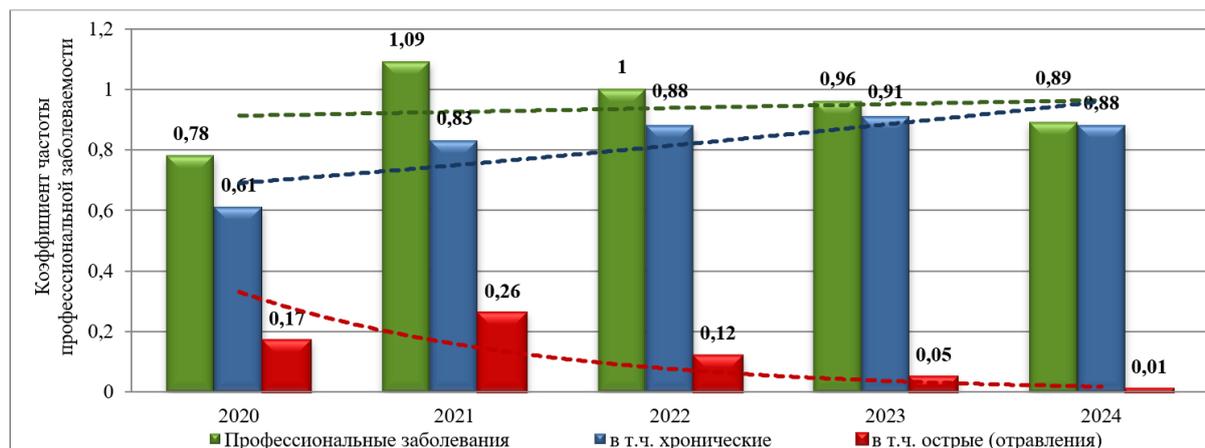


Рисунок 1 – Статистическая динамика коэффициентов частоты профессиональной заболеваемости среди работников промышленных предприятий России за период с 2020 по 2024 гг.

2 Анализ профессиональной заболеваемости на промышленных предприятиях России

Единым мероприятием по обнаружению в производственной среде вредных факторов и оценке их воздействия на работника с учетом превышения установленных уровней от гигиенических нормативных значений является специальная оценка условий труда, проведение которой работодатель обеспечивает в соответствии с государственными требованиями [2, 4]. Если по итогам экспертных замеров на рабочем месте выявлены вредные производственные факторы, а их уровни выше предельно допустимых гигиенических значений, условия труда признаются вредными [4, 5].

Следует отметить, что в ходе расследования профессионального заболевания комиссия, созданная работодателем, на основании результатов специальной оценки условий труда устанавливает вредный производственный фактор, воздействие которого повлекло за собой возникновение заболевания [6].

На основании Государственного доклада о состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения России в 2024 году» [3], используя эмпирический принцип Парето [7], проанализируем вредные производственные факторы, влияющие на работников, уровень которых повлек за собой хронические профессиональные заболевания.

Диаграмма Парето – это графическое изображение кумулятивной взаимосвязи ранжирования анализируемых факторов и результатов выборки из их совокупности, где 80% результатов происходит от 20% причин [7].

На основании данных [3] построим диаграмму Парето, где на левой оси ординат разметим удельный вес рабочих мест на промышленных предприятиях России с вредными условиями труда за период с 2020 по 2024 гг., %, а на правой оси – интервальную шкалу от 0 до 100%, где 100% соответствует совокупности удельного веса всех рабочих мест с вредными условиями труда (рисунок 2).

Результатами проведенного анализа определен следующий рейтинг причин профессиональной заболеваемости: первое место занимают профессиональные патологии, возникшие от воздействия шума (18,9 %), второе – от влияния химических вредных факторов – 7,3 %, третье – от общей и локальной вибрации – 4,6 %, четвертое – от аэрозолей фиброгенного действия – 4,5 %.

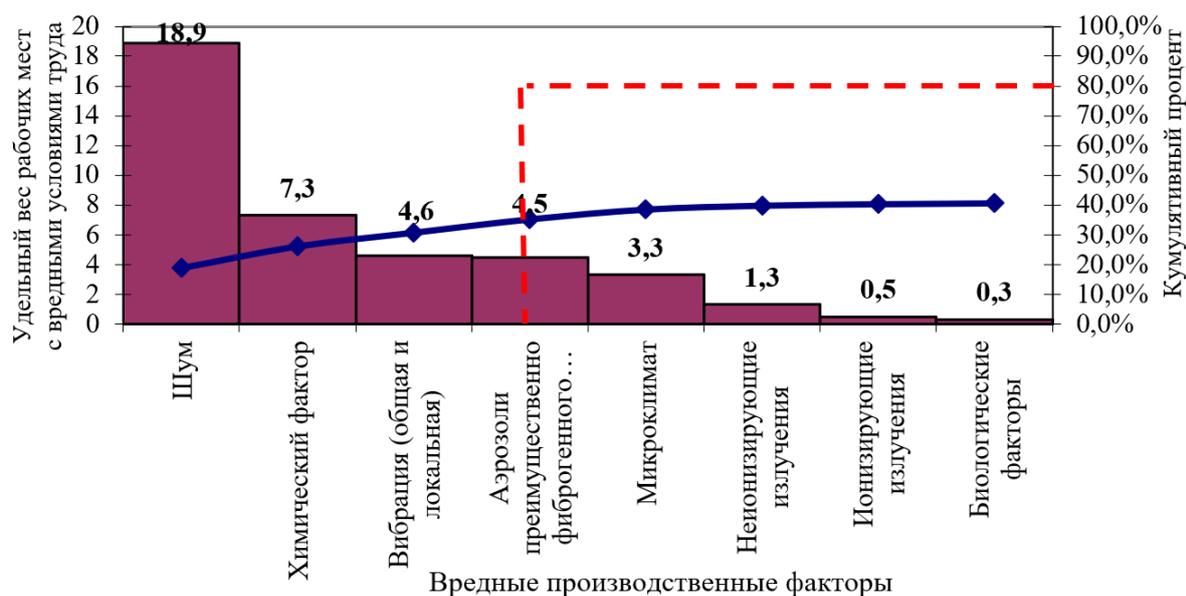


Рисунок 2 – Диаграмма Парето – рейтинг удельного веса рабочих мест на промышленных предприятиях России, не отвечающих гигиеническим нормативам по вредным факторам производственной среды за период 2020-2024 гг., %

Таким образом, производственный шум является самой частой причиной возникновения профессиональных заболеваний [8, 9]. Необходимо отметить, что вопросы профессиональной заболеваемости присущи не только для субъектов России, но и для промышленных предприятий развитых западных стран [10].

Высокий уровень шума влияет на слух работника и может вызывать у него:

- повышенное утомление, потерю бдительности и отсутствие защитной реакции на возникающие опасные ситуации;
- постепенное смещение слухового порога и снижение восприятия звуковых сигналов;
- частичную или абсолютную утрату слуха;
- ухудшение качества понимания и усвоения разговорной речи;
- снижение скорости мыслительных процессов, внимания акустической обстановки на рабочем месте и усвоения передаваемой информации [8, 9].

Таким образом, в условиях запредельной акустической нагрузки на рабочем месте у человека теряется продуктивность и качество осуществляемой работы. Наряду с этим, наличие и влияние повышенного уровня производственного шума маскирует предупредительные звуковые сигналы, тем самым тормозит или купирует их ответную реакцию на движущиеся или готовые к движению транспортные средства и технологическое оборудование, что может привести к неправильным действиям, и возникновению риска травмирования на производстве [8, 9].

Следствиями воздействия повышенного шума в условиях трудового процесса являются заболевания сердечно-сосудистой системы, деструктивные процессы в органах и тканях тела человека, функциональные патологии регуляции центральной нервной системы. Самым распространенным профессиональным заболеванием, возникающим и прогрессирующим при долговременном воздействии повышенного уровня шума, является нейросенсорная тугоухость [8, 9].

На основании данных о состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения Российской Федерации в 2024 году проанализируем изменения значений

удельного веса рабочих мест промышленных предприятий России, не соответствующих гигиеническим нормативным требованиям по вредному фактору производственной среды «шум» за изучаемый период, и представим в виде диаграммы (рисунок 3) [3].

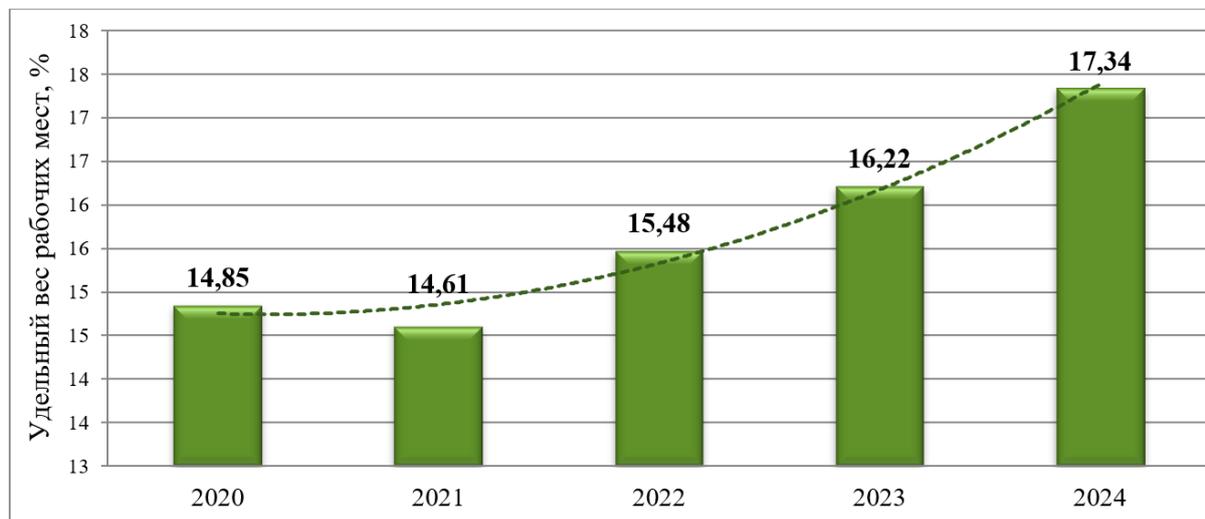


Рисунок 3 – Статистика удельного веса рабочих мест промышленных предприятий России, не соответствующих гигиеническим нормативным требованиям по вредному фактору производственной среды «шум» за период с 2020 по 2024 гг., %

Представленные статистические показатели в первом полупериоде (с 2020 по 2021 гг.) отображают позитивную динамику понижения удельного веса рабочих мест, не соответствующих гигиеническим нормативным требованиям по фактору повышенный «шум».

Далее, в период с 2022 по 2024 гг. наблюдается заметная тенденция значительного увеличения удельного веса рабочих мест, на которых уровень воздействия шума превосходит допустимые значения [11]. В итоге, к 2024 году удельный вес рабочих мест на промышленных предприятиях России, не соответствующих гигиеническим нормативным требованиям по вредному производственному фактору «шум», возрос на 16,8 %.

Исходя вышеизложенного следует, что динамика профессиональной заболеваемости работников промышленных предприятий России неустойчивая, поэтому проблема остается актуальной. Доминирующая доля хронических профессиональных заболеваний наступает при воздействии на работников в производственной среде повышенного уровня шума.

3 Корреляционный анализ профессиональной заболеваемости на промышленных предприятиях России по видам экономической деятельности

Данные государственной статистики удельного веса трудящихся, подвергавшихся влиянию повышенного производственного шума на предприятиях России по отдельным видам экономической деятельности за анализируемый период [12] показаны в таблице 1.

В целях определения вида экономической деятельности организаций России, в которых наибольшее количество работников получило хронические профессиональные заболевания от воздействия повышенного шума, проведем соответствующий корреляционный анализ [13-16].

Таблица 1 – Удельный вес трудящихся, подвергавшихся влиянию повышенного производственного шума на промышленных предприятиях России по отдельным видам экономической деятельности в период с 2020 по 2024 гг., %

№ п/п	Отдельные виды экономической деятельности промышленных предприятий России/годы	2020	2021	2022	2023	2024
1	Сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство	10,5	10,6	10,3	10,1	10,2
2	Добыча полезных ископаемых	32,9	32,6	32,5	33,1	33,1
3	Обрабатывающие производства	26,0	26,4	26,3	26,1	25,7
4	Обеспечение электрической энергией, газом	16,9	17,6	17,4	17,1	17,2
5	Водоснабжение и водоотведение	15,8	15,8	16,2	16,4	16,6
6	Строительство	15,5	15,2	14,9	14,8	14,6
7	Транспортировка и хранение	13,5	11,3	11,5	11,5	11,4
8	Деятельность в области информации и связи	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4

Коэффициент корреляции определяет зависимость изменения значений одного фактора от другого и изменяется от -1 до 0 (обратная зависимость) и от 0 до $+1$ (прямая зависимость).

Для установления взаимосвязи и ее степени каждого i -го показателя общего удельного веса рабочих мест по фактору «шум» от удельного веса рабочих мест того или иного вида экономической деятельности, где по итогам специальной оценки условий труда выявлено превышение нормативных значений по фактору «шум», произведем расчет коэффициентов корреляции соответственно [13-16].

Изначально, как например, на основе корреляционного анализа, рассмотрим потенциальную взаимосвязь показателей «удельный вес рабочих мест промышленных предприятий России, не соответствующих гигиеническим нормативам по вредному фактору производственной среды «шум» за период 2020-2024 гг., % (далее – общий удельный вес рабочих мест по фактору «шум») и «удельного веса рабочих мест на промышленных предприятиях отрасли «Строительство», не соответствующих гигиеническим нормативам по вредному производственному фактору «шум» за период 2020-2024 гг. (далее – удельный вес рабочих мест отрасли «Строительство» по фактору «шум»).

Коэффициент корреляции r_{xy} между изучаемыми переменными вычислим по формуле [13-16]:

$$r_{xy} = \frac{\Sigma (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\Sigma (x_i - \bar{x})^2 \cdot \Sigma (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

где x_i – значения общего удельного веса рабочих мест по фактору «шум»; y_i – значения удельного веса рабочих мест отрасли «Строительство» по фактору «шум»; \bar{x} – средняя по $x = 0,99$, \bar{y} – средняя по $y = 0,32$.

Предварительные расчеты для получения эмпирического корреляционного отношения общего удельного веса рабочих мест по фактору «шум» от удельного веса рабочих мест отрасли «Строительство» по фактору «шум» за период 2020-2024 гг., сведем в таблицу 2.

Таблица 2 – Расчетные данные для получения коэффициента корреляционной взаимосвязи

Год	x	y	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})$
2020	14,85	15,5	-0,85	0,50	0,72	0,25	-0,43
2021	14,61	15,2	-1,09	0,20	1,19	0,04	-0,22
2022	15,48	14,9	-0,22	-0,10	0,05	0,01	0,02
2023	16,22	14,8	0,52	-0,20	0,27	0,04	-0,11
2024	17,34	14,6	1,64	-0,40	2,69	0,16	0,66

Коэффициент корреляции между изучаемыми переменными $r_{xy} = -0,88$.

Значимость r_{xy} определим путем его корректировки по модулю:

$$|\bar{r}| = 1 - \sqrt{1 - r^2} \frac{n - 1}{n - 2}, \quad (2)$$

где r – коэффициент корреляции r_{xy} (1); n – количество лет в изучаемом периоде. Далее получаем:

$$|\bar{r}| = \sqrt{1 - (1 - (-0,88)^2) \frac{5 - 1}{5 - 2}} = 1,02.$$

Среднюю ошибку m_r полученного r_{xy} вычислим по формуле:

$$m_r = \sqrt{\frac{1 - r^2}{n - 2}}. \quad (3)$$

$$m_r = \sqrt{\frac{1 - (-0,88)^2}{5 - 2}} = 0,27.$$

Значимость r_{xy} оценим посредством расчета статистического значения $t_{ст}$:

$$t_{ст} = \frac{|\bar{r}|}{m_r}, \quad (4)$$

$$t_{ст} = \frac{1,02}{0,27} = 3,77.$$

Сравним полученное $t_{ст}$ с предельным значением таблицы квантили t -распределения Стьюдента для вероятности $\alpha = 0,01$ [13-16].

Получаем следующее: $4,60 > 3,77$, значит $t_{ст} > t_{\alpha} = 0,01$ и зависимость между изучаемыми переменными установлена.

Отрицательное значение коэффициента корреляции $r_{xy} = -0,88$ означает обратное соотношение между рассматриваемыми переменными и свидетельствует о том, что увеличение одной переменной приводит к уменьшению другой. Таким образом, в наблюдаем позитивную тенденцию: в условиях повышения общей динамики удельного веса рабочих мест по фактору «шум» в отрасли «Строительство» удельный вес рабочих мест по этому фактору снижается.

Аналогично рассчитаем наличие и степень корреляционных взаимосвязей общего удельного веса рабочих мест от удельного веса рабочих мест остальных рассматриваемых видов экономической деятельности организаций России по фактору «шум» за период с 2020 по 2024 гг. Полученные результаты сведем в таблицу 3.

Таблица 3 – Искомые значения корреляционных зависимостей

п/п	Виды экономической деятельности России	r_{xy}	$ \bar{r} $	m_r	$t_{ст}$
1	Сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство	-0,83	0,96	0,32	2,99
2	Добыча полезных ископаемых	0,68	0,78	0,42	1,87
3	Обрабатывающие производства	-0,77	0,89	0,36	2,46
4	Обеспечение электрической энергией, газом и паром	-0,23	0,27	0,56	0,47
5	Водоснабжение и водоотведение	0,97	1,12	0,15	7,69
6	Строительство	-0,88	1,02	0,27	3,77
7	Транспортировка и хранение	-0,39	0,46	0,53	0,87
8	Деятельность в области информации и связи	-0,79	0,92	0,35	2,61

4 Результаты проведенного исследования

На основании результатов расчета и значимости исследуемых корреляционных взаимосвязей констатируем, что самый наибольший r_{xy} между изучаемыми переменными равен значению $-0,97$, абсолютная величина которого существенно выше стандартного предельного значения $r_{xy} > 0,6$ [13-16], на промышленных предприятиях отрасли «Водоснабжение и водоотведение», где удельный вес рабочих мест по фактору «шум» возрастает наряду с общей динамикой удельного веса рабочих мест по фактору «шум», что свидетельствует о тесной между ними взаимосвязи.

С использованием формул (2, 3, 4) рассчитаем $|\bar{r}| = 1,12$, $m_r = 0,27$, $t_{ст} = 7,69$.

Следует отметить, что по классификационной шкале Чеддока [13-16] величина $|\bar{r}|$ указывает не только на наличие взаимосвязи, но и подтверждает весьма высокую степень тесноты исследуемых статистических показателей.

В результате получаем: $3,72 > -6,29$, $t_{ст} > t_a = 0,01$, то есть статистическое значение больше теоретического, значит взаимосвязь между исследуемыми переменными с вероятностью $P = 0,99$ установлена.

Итоги настоящего исследования показали, что преобладающую долю удельного веса рабочих мест на промышленных предприятиях России, не соответствующих гигиеническим нормативным требованиям по вредному производственному фактору «шум» за период с 2020 по 2024 гг., являются предприятия отрасли «Водоснабжение и водоотведение».

Заключение

Настоящее исследование показало, что влияние вредного фактора «шум» является основным следствием возникновения заболеваний работников на производстве. Корреляционный анализ показал, что наибольший удельный вес работающих, подвергавшихся воздействию высокого уровня шума, установлен в отрасли «Водоснабжение и водоотведение».

Профессиональные патологии здоровья среди трудящихся промышленных предприятий России влекут за собой социальные утраты и материальный ущерб стране.

Проведенное исследование причин возникновения профессиональных патологий определяет необходимость и важность последующего изучения проблемы профессиональной заболеваемости работающих, в частности, исследования влияния повышенного уровня шума на организм человека, что будет способствовать формированию адресных превентивных мероприятий, позволяющих повысить

безопасность труда работников и нивелировать риски возникновения их заболеваний на производстве.

Список использованных источников

1. Конституция Российской Федерации (принята всенародным голосованием 12.12.1993 с изменениями, одобренными в ходе общероссийского голосования 01.07.2020) // Техэксперт : [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/9004937> (дата обращения 24.11.2025).

2. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ (с изменениями и дополнениями) // Техэксперт : [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/901807664> (дата обращения 24.11.2025).

3. Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения Российской Федерации в 2024 году». Анализ состояния здоровья работающего населения и профессиональной заболеваемости. // Роспотребнадзор: [Электронный ресурс]. - URL: https://www.rospotrebnadzor.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=30171 (дата обращения 12.11.2025).

4. Федеральный закон «О специальной оценке условий труда» от 28.12.2013 № 426-ФЗ // Техэксперт : [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/499067392> (дата обращения 24.11.2025).

5. Приказ Минтруда России от 21.11.2023 № 817н «Об утверждении Методики проведения специальной оценки условий труда, Классификатора вредных и (или) опасных производственных факторов, формы отчета о проведении специальной оценки условий труда и инструкции по ее заполнению» // Техэксперт : [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1304153715> (дата обращения 24.11.2025).

6. Постановление Правительства Российской Федерации от 05.07.2022 № 1206 «О порядке расследования и учета случаев профессиональных заболеваний работников» // Техэксперт : [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/351093072> (дата обращения 24.11.2025).

7. Государственный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 51814.3-2001 «Методы статистического управления процессами», принятый и введенный в действие Постановлением Госстандарта России от 02.10.2001 № 401-ст // Техэксперт : [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200026563> (дата обращения 24.11.2025).

8. Дементьева, Ю. В. Анализ динамики и тенденций профессиональной заболеваемости работников промышленных предприятий // Современные подходы к обеспечению гигиенической, санитарно-эпидемиологической и экологической безопасности на транспорте : Сборник трудов молодых учёных и специалистов транспортной отрасли с международным участием. – Москва : Авторская Мастерская, 2025. – С. 234-239. – EDN JVLGMX.

9. Томакова, И. А. Состояние условий труда, профессиональные заболевания и производственный травматизм в экономике Российской Федерации // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2016. – № 2(19). – С. 95-107. – EDN UGIHTY.

10. The effect of noise on the human body, in particular, on cardiovascular diseases / E. Staseva, M. Kvitkina, A. E. Litvinov, N. D. Kobzeva // E3S Web of Conferences : Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019, Moscow, 20–22 ноября 2019 года. Vol. 164. – Moscow: EDP Sciences, 2020. – P. 01028. – DOI 10.1051/e3sconf/202016401028. – EDN BWSJLQ.

11. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания», утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28.01.2021 № 2 // Техэксперт : [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения 24.11.2025).

12. Федеральная служба государственной статистики. Условия труда, производственный травматизм (по отдельным видам экономической деятельности) // Росстат : [Электронный ресурс]. - URL: https://rosstat.gov.ru/working_conditions (дата обращения 12.11.2025).

13. Ксендзенко, Л. С. Элементы теории корреляции : Учебное электронное издание / Л. С. Ксендзенко, Л. А. Бойко, А. В. Шишкин. – Владивосток : Дальневосточный федеральный университет, 2025. – 71 с. – ISBN 978-5-7444-5829-4. – EDN ZHDMYR.

14. Удинцова, Н.М. Эконометрика. Часть 1: Парная регрессия и корреляция в эконометрических исследованиях: учебное пособие / Н.М. Удинцова, Н.А. Коптева – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2015. – 61 с.

15. Трусова, А.Ю. Анализ данных. Многомерные статистические методы: учебное пособие / А.Ю. Трусова. – Самара: Издательство Самарского университета, 2023. – 92 с.

16. Сизова Т.М. Статистика для бакалавров: Учебное пособие. Часть II – СПб: Университет ИТМО, 2016 – 70с.

References

1. Constitution of the Russian Federation (adopted by popular vote on 12.12.1993, with amendments approved during the all-Russian vote on 01.07.2020) // Tekhekspert : [Electronic resource]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/9004937> (accessed on 24.11.2025).

2. Labor Code of the Russian Federation dated December 30, 2001, No. 197-FZ (as amended and supplemented) // Tekhekspert: [Electronic resource]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/901807664> (accessed on 24.11.2025).

3. State Report 'On the State of Sanitary and Epidemiological Well-Being of the Population of the Russian Federation in 2024'. Analysis of the Health Status of the Working Population and Occupational Diseases. // Rospotrebnadzor: [Electronic resource]. - URL: https://www.rospotrebnadzor.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=30171 (accessed on 12.11.2025).

4. Federal Law 'On Special Assessment of Working Conditions' dated 28.12.2013 No. 426-FZ // Tekhexpert : [Electronic resource]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/499067392> (accessed on 24.11.2025).

5. Order of the Ministry of Labor of the Russian Federation No. 817n dated 21.11.2023 'On Approval of the Methodology for Conducting a Special Assessment of Working Conditions, the Classification of Harmful and (or) Dangerous Production Factors, the Form of the Report on Conducting a Special Assessment of Working Conditions, and the Instructions for Its Completion/ // Tekhekspert : [Electronic Resource]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1304153715> (accessed on 24.11.2025).

6. Decree of the Government of the Russian Federation No. 1206 dated 05.07.2022 'On the Procedure for Investigating and Recording Cases of Occupational Diseases in Workers' // Tekhekspert : [Electronic Resource]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/351093072> (accessed on 24.11.2025).

7. State Standard of the Russian Federation GOST R 51814.3-2001 'Methods of Statistical Process Control', adopted and put into effect by Decree of the State Standard of Russia No. 401-st dated 02.10.2001 // Tekhekspert : [Electronic resource]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200026563> (accessed on 24.11.2025).

8. Dementyeva, Yu. V. Analysis of the Dynamics and Trends of Occupational Diseases among Employees of Industrial Enterprises // Modern Approaches to Ensuring Hygienic, Sanitary, Epidemiological, and Environmental Safety in Transport: Collection of Papers by Young Scientists and Specialists in the Transport Industry with International Participation. - Moscow : Author's Workshop, 2025. - P. 234-239. - EDN JVLGMX.

9. Tomakova, I. A. The state of working conditions, occupational diseases and industrial injuries in the economy of the Russian Federation // Izvestiya of the South-Western State University. Series: Engineering and Technology. - 2016. - No. 2(19). - Pp. 95-107. - EDN UGIHTY.

10. The effect of noise on the human body, in particular, on cardiovascular diseases / E. Staseva, M. Kvitkina, A. E. Litvinov, N. D. Kobzeva // E3S Web of Conferences : Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019, Moscow, November 20–22, 2019. Vol. 164. - Moscow: EDP Sciences, 2020. - P. 01028. - DOI 10.1051/e3sconf/202016401028. - EDN BWSJLQ.

11. SanPiN 1.2.3685-21 'Hygienic Standards and Requirements for Ensuring the Safety and (or) Harmlessness of Human Habitat Factors', approved by the Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation No. 2 dated 28.01.2021 // Tekhekspert : [Electronic resource]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (accessed on 24.11.2025).

12. Federal State Statistics Service. Working Conditions and Industrial Accidents (by Selected Economic Activities) // Rosstat : [Electronic Resource]. - URL: https://rosstat.gov.ru/working_conditions (accessed on 12.11.2025).

13. Ksendzenko, L. S. Elements of Correlation Theory: Electronic Educational Edition / L. S. Ksendzenko, L. A. Boyko, and A. V. Shishkin. - Vladivostok: Far Eastern Federal University, 2025. - 71 p. - ISBN 978-5-7444-5829-4. - EDN ZHDMYR.

14. Udintsova, N.M. Econometrics. Part 1: Pair Regression and Correlation in Econometric Research: Textbook / N.M. Udintsova, N.A. Kopteva - Zernograd: Azov-Black Sea Engineering Institute of the Don State Agrarian University, 2015. - 61 p.

15. Trusova, A.Yu. Data Analysis. Multivariate Statistical Methods: Textbook / A.Yu. Trusova. - Samara: Samara University Publishing House, 2023. - 92 p.

16. Sizova T.M. Statistics for Bachelors: Textbook. Part II - St. Petersburg: ITMO University, 2016 - 70 p.

УДК: 004.8
OECD: 2.02

Современные методы анализа акустического профиля беспилотных авиационных систем с использованием нейросетевых технологий

Лестенко Н.А.^{1*}, Вальштейн К.В.², Верховова А.А.³

¹Аспирант Кафедры «Техносферная безопасность и вычислительная механика»,

²Старший преподаватель кафедры «Программная инженерия и интеллектуальные системы»,

³Аспирант кафедры «Программная инженерия и интеллектуальные системы»,

^{1,2,3}Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

В статье рассматриваются основные задачи анализа и построения акустического профиля беспилотной авиационной системы. Показывается применимость нейросетевых технологий для решения подобных задач и проводится обзор актуальных исследований на данную тему. Выделены классы задач, решаемые посредством аппаратуры, расположенной на борту, а также посредством внешних систем наблюдения. Для задач, решаемых посредством внешней системы наблюдения, определены основные этапы, применение нейросетевых технологий на которых даёт значительный прирост точности, по сравнению с классическими методами. Определены ограничения применения нейросетевых технологий при анализе аудиосигналов посредством бортовой аппаратуры авиационной системы. Рассмотрены существующие методы предобработки сигнала, применяемые для шумоподавления модели искусственных нейронных сетей, а также методы обработки полученного сигнала. Особое внимание уделено задачам локализации внешнего источника звука. Проведён эксперимент по выявлению неисправностей на основе аудиосигнала, на основе которого сделан вывод о применимости и перспективности использования подобных технологий, а также о дальнейших направлениях исследований.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, беспилотная авиационная система, акустический профиль, локализация, детектирование

Modern Methods of Analyzing the Acoustic Profile of Unmanned Aerial System Using Neural Network Technologies

Lestenko N.A.^{1}, Valshtein K.V.², Verkhova A.A.³*

¹*Postgraduate Student of the Department of Environmental Engineering and Computational Mechanics,*

²*Senior Lecturer of the Department of Software Engineering and Intelligent Systems,*

³*Postgraduate Student of the Department of Software Engineering and Intelligent Systems,*

^{1,2,3}*Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia*

Abstract

The article examines the primary tasks involved in analyzing and constructing the acoustic profile of an unmanned aircraft system. The applicability of neural network technologies for solving such problems is demonstrated, and a review of current research on this topic is conducted. Classes of tasks solved by onboard equipment, as well as by external surveillance systems, are identified. For tasks addressed by external surveillance systems, the main stages are defined, at which the application of neural network technologies yields a significant increase in accuracy compared to classical methods. The limitations of using neural network technologies in analyzing audio signals via an aircraft system's onboard equipment are determined. Existing signal pre-processing methods used for noise suppression by artificial neural network models, as well as methods for processing the acquired signal, are considered. Special attention is paid to the tasks of localizing an external sound source. An experiment was conducted to detect faults based on an audio signal, leading to a conclusion about the applicability and promise of using such technologies, as well as about future directions for research.

Keywords: artificial neural network, unmanned aerial system, acoustic profile, localization, detection

Введение

В современном мире технологии искусственного интеллекта (ИИ) позволяют автоматизировать всё большее число процессов, связанных с классификацией и детектированием. Благодаря развитию сферы периферийного машинного обучения (EdgeML) [1], многие модели ИИ теперь возможно применять на системах с ограниченными ресурсными возможностями, что позволяет применять их для всё большего числа задач. В то же время современная архитектура моделей ИИ позволяет с намного большей, чем ранее, точностью описывать объект по неполным данным в реальном времени. Всё активнее нейросетевые технологии применяются именно для обработки аудиосигналов [2] и, как следствие следует изучить современные исследования на тему их применимости для задач, связанных с беспилотными авиационными системами (БАС).

В рамках данной статьи будет проведён обзор применимости современных нейросетевых технологий искусственного интеллекта для задач анализа акустического профиля БАС. Под акустическим профилем подразумевается набор данных, позволяющих идентифицировать конкретную модель БАС, а также получить информацию о её состоянии, полученных путём анализа аудиоданных. К таким данным можно отнести набор признаков, выделенных из аудиоданных, позволяющих в зависимости от решаемой задачи определить скорость и примерное местоположение, а также однозначно установить модель и текущее техническое состояние БАС. При этом данный профиль может составляться как внешней аппаратурой для детектирования БАС и анализа её траектории движения, так и непосредственно на самой БАС для диагностики работы компонентов системы, в последнем случае профиль будет включать данные в первую очередь о техническом состоянии, так как остальные данные нерелевантны для решаемых посредством бортовой аппаратуры задач. Таким образом, можно поделить возможные задачи анализа акустического профиля БАС на два больших класса: выполняемые системами внешнего наблюдения и решаемые средствами самодиагностики БАС.

1 Применение нейросетевых технологий искусственного интеллекта на внешних системах наблюдения

Подобные задачи включают в себя детектирование и идентификацию БАС в условиях плохой видимости, а также анализ её траектории и состояния. Особенности внешних систем наблюдения являются возможность применения мощных систем

обработки данных, а также сравнительно большое расстояние от неё до источника звука, что порождает проблему посторонних шумов. Исходя из этого перспективно выглядит применение больших моделей ИИ для комплексной обработки сигналов из окружающей среды. Можно разбить обработку сигнала на несколько этапов:

- выделение частотного диапазона для изучения;
- детектирование сигнала в выделенном диапазоне;
- шумоподавление и выделение сигнала с улучшением его качества;
- классификация выделенного сигнала;
- построение акустического профиля объекта – анализ его состояния, типа и траектории.

В статье [3] показаны различия в частотном диапазоне шумов, получаемых при изучении БАС, и посторонних шумов. По данным спектрограммам можно заметить, что для БАС характерны низкие частоты звучания, которые следует усилить в анализируемых аудиоданных. Конкретные частоты зависят от класса БАС, однако в целом предсказуемы и могут выделяться классическими методами обработки аудиосигналов.

Следующим шагом является детектирование и последующая классификация сигнала БАС в исследуемом аудиофрагменте. Как показывает исследование, проведённое в [4], даже относительно простые свёрточные нейронные сети, обученные на снятых в лабораторных условиях данных, способны в условиях низкого уровня отношения сигнал/шум демонстрировать точность до 80% на расстоянии 670 метров. Однако этого может быть недостаточно для более сложных задач. Более перспективной представляется предложенное в ряде статей, например в [5] решение, предполагающее комплексное использование разноформатных данных наблюдений для повышения точности и дальности детектирования. Так в упомянутой статье используются данные видео- и аудионаблюдения, переведённые в скрытое пространство с последующим объединением и классификацией. Схема работы подобного решения показана на рисунке 1.

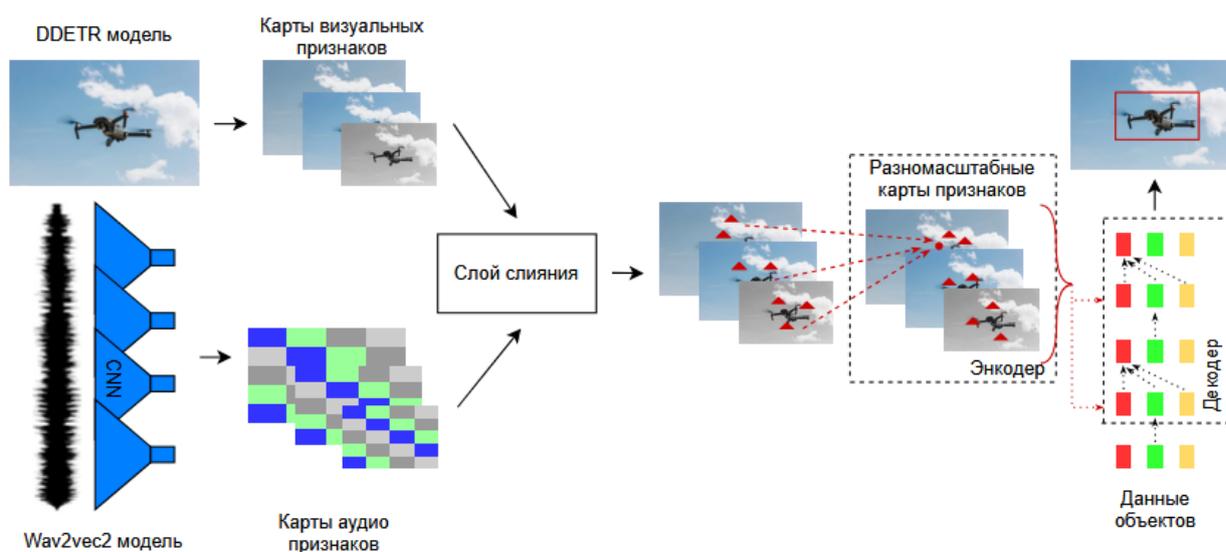


Рисунок 1 – Архитектура модели WAVE-DETR для обнаружения БАС

Следует отметить, что в приведённых статьях в первую очередь рассматривается проблема именно детекции БАС, а не их полноценной классификации. Обычно исследуются образцы звука одной-двух конкретных моделей БАС. В то же время задача

классификации большого числа моделей БАС является значительно более сложной и часто требует обучения дополнительной модели искусственной нейронной сети (ИНС), интеграция которой напрямую в систему детектирования была бы затруднительной. Стоит отметить, что в данном контексте под классификацией понимается именно определение конкретной модели БАС из числа известных системе, а не отнесение исследуемого объекта к одному из небольшого числа глобальных классов. Поэтому более перспективной выглядит предварительный анализ сигнала на предмет детектирования БАС с последующей передачей аудиофрагмента в специализированную ИНС, которая, как показано в исследовании [6], может быть построена на базе легковесной модели EfficientNet-b0 всего лишь с четырьмя миллионами параметров. В случае, когда предварительное обучение модели затруднительно, можно использовать методы, схожие с используемыми для идентификации музыки, например, «аудио отпечатки пальцев» (audio fingerprint) [7].

Ещё одной задачей внешней системы наблюдения является локализация местоположения БАС. Данная задача как правило выполняется на основе визуальной информации и пеленга радиочастот, однако в некоторых условиях (например, ночных и при наличии сильных радиопомех) это может оказаться затруднительно. Современные исследования в [8] показывают эффективность применения для этой цели свёрточных сетей с остаточным слоем и слоем внимания, которые, используя мел-кепстральные коэффициенты, позволяют с точностью до 97% определить положение источника звука на основе данных с микрофонной решётки. К сожалению, в статье не приведено достаточно данных об условиях эксперимента и расстоянии до объекта, что приводит к необходимости проведения дальнейших экспериментов на открытой местности для подтверждения тезиса о применимости данных методов. В то же время в статье [9] приводится методика предобработки сигналов, полученных с помощью одного микрофона для определения положения источника звука. Данная методика может повысить качество распознавания, однако подобные техники на данный момент применяются преимущественно в закрытых помещениях с источниками эха.

Подобный проведённый комплексный анализ БАС, состоящий из его детектирования, классификации и локализации, позволит создать его примерный акустический профиль – набор характеристик, определяющих его тип, местоположение, примерную траекторию следования, а также текущее состояние. Следует отметить, что при этом должен использоваться ансамблевый подход к построению системы искусственного интеллекта – одна модель не сможет обеспечить получение всего набора требуемых данных. Также следует не ограничиваться исключительно акустическим исследованием наблюдаемого объекта, а совмещать его с визуальным наблюдением и радиочастотным анализом.

2 Применение нейросетевых технологий искусственного интеллекта на борту БАС

В случае использования систем искусственного интеллекта для анализа аудиоданных непосредственно на борту БАС следует учитывать ряд особенностей:

- ограничение на используемые ресурсы;
- наличие сильных посторонних шумов;
- необходимость высокой скорости обработки для непрерывного анализа обстановки.

Ограничение ресурсов приводит к ряду проблем: ограниченная память и вычислительные мощности усложняют использование больших моделей, ограниченный

запас автономности не позволяет проводить сложные операции по получению и обработке данных постоянно, малый размер не позволяет установить большое число сенсоров, а высокая скорость усложняет сбор данных о позиционировании. К этим ограничениям добавляются и иные, связанные с необходимостью учитывать окружающие условия и, возможные виды помех, что особенно важно при анализе аудиосигнала.

Важной задачей рассматриваемых систем является шумоподавление. При движении БАС сталкивается со множеством накладываемых данных: звуки, вызванные работой самой БАС, атмосферные шумы, вызванные встречным ветром и погодными условиями, а также аудиосигналы, издаваемые внешними источниками звука. При этом в зависимости от задачи анализа, полезной может являться любая из перечисленных категорий аудиосигналов. В связи с этим важность имеет частотный анализ окружающего звукового поля с выделением отдельных частотных полос. К задачам, решаемым системой анализа звукового поля БАС можно отнести:

- анализ состояния самой БАС;
- оценка окружающей обстановки и акустическая навигация.

Очевидно, что для первой из задач наиболее важными будут аудиосигналы от элементов самой БАС, тогда как при выполнении остальных задач важным шагом предобработки сигнала будет являться их подавление. Различие в моделях БАС ограничивает возможности по созданию универсального алгоритма выделения звуков от составляющих БАС, однако в статье [10] предложен метод генерации «усреднённых» звуков типичного БАС, который упрощает разделение звукового поля. Данный метод основан на применении генеративно-сопоставительной сети (GAN), которая может точно изучать различные типы данных. Он использовался для изучения различных типов звуковых данных пропеллеров БАС. Эта изученная модель затем используется для генерации звука от псевдо-БАС, который затем вычитается из реального звука, улавливаемого бортовыми микрофонами БАС, что позволяет оператору четко слышать и, следовательно, распознавать человеческие звуки. Этот метод имеет ряд преимуществ перед традиционными системами шумоподавления, в том числе способность эффективно подавлять шум БАС в узком диапазоне частот с хорошей точностью. В то же время в статье [11] рассматривается пример выделения звуковых сигналов с микрофонов на БАС под воздействием фактора сильного шума от мотора и пропеллеров. Предложенное решение основывается на применении комбинированного подхода с использованием многоканального фильтра Вайнера и пост-обработка с помощью гауссовой смеси и параметрического фильтра Вайнера. Комбинация двух подходов позволяет эффективно отделять шум в условиях очень низкого уровня отношения сигнал/шум. Соответственно, обратное применение подобных методов позволит отсеять фоновый шум и сосредоточить систему на анализе звука непосредственно с самой БАС.

Полученный звук с моторов, пропеллеров и иных частей БАС может быть использован для составления её акустического профиля для анализа текущего технического состояния. Это позволит продублировать данные, получаемые с иных датчиков и провести комплексный анализ состояния БАС, как непосредственно системой на борту, так и средствами удалённого оператора. Известны подобные системы анализа аудиоданных для диагностирования наземных транспортных средств [12] и различных двигателей [13], а в статье [14] приведён метод использования простой свёрточной сети для анализа состояния БАС. Основа метода изображена на рисунке 2.

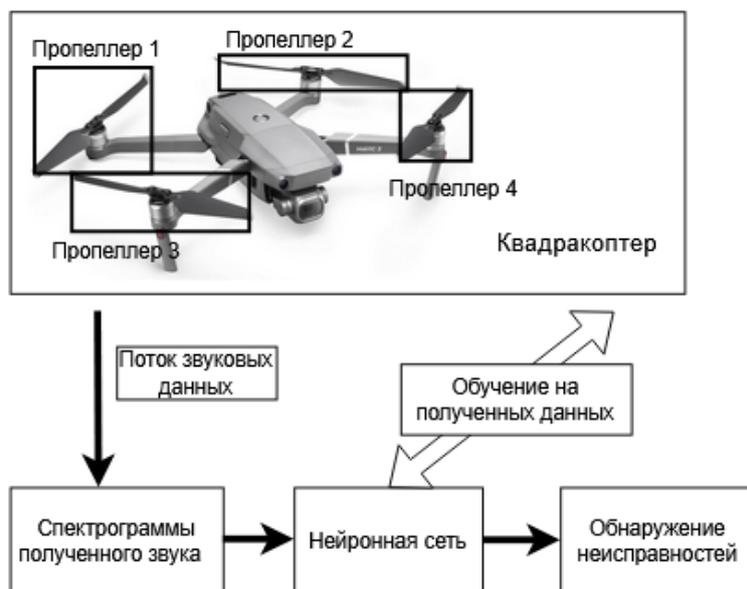


Рисунок 2 – Метод диагностики состояния БАС на основе аудиоинформации

Данный метод основан на обучении свёрточной нейронной сети на данных, полученных с одной БАС и последующим использованием техники переноса обучения (transfer learning) для ускорения обучения модели под каждый конкретный БАС. Альтернативный метод предложен в статье [15], в которой используя модель Wav2Vec2, построенная на основе архитектуры трансформер, аудиофрагмент преобразуется в матрицу признаков, которая в последующем передаётся в свёрточную модель, построенную на основе упрощённой архитектуры VGG (Visual Geometry Group). Данный метод также использует перенос обучения для быстрой адаптации под новое оборудование (достаточно всего лишь примерно двухчасового датасета) и продемонстрировал высокую точность и прецизионность в задаче обнаружения аномалий при использовании непосредственно на борту БАС в режиме реального времени.

С целью проверки применимости данного метода был проведён эксперимент. В качестве тестовых данных был взят открытый датасет [16], содержащий аудиофайлы, полученные при работе четырех электродвигателей:

- 1) исправного,
- 2) с поврежденным наружным кольцом подшипника,
- 3) с поврежденным внутренним кольцом подшипника,
- 4) с поврежденными телами качения подшипника.

Файлы были предварительно обработаны с выделением мел-кепстральных коэффициентов и разбиением на фрагменты, из которых сформированы обучающая и тестовая выборки. Полученные коэффициенты образуют четырехканальную матрицу 1000×300 для каждого из фрагментов. Для проверки утверждения об эффективности свёрточной ИНС в задаче обнаружения дефектов на основе анализа аудиосигналов была спроектирована ИНС на основе сверточных слоев, структура которой представлена на рисунке 3. Вместо описанной в статье [15], применялась упрощённая модель для ускорения процесса обучения.

Спроектированная ИНС обучалась на протяжении 30 эпох (итераций) и показала точность в 100% на тестовой выборке, что обусловлено малым размером тестового датасета. График обучения сети представлен на рисунке 4. Точность на приведенном рисунке изменяется в пределах от 0 до 1.

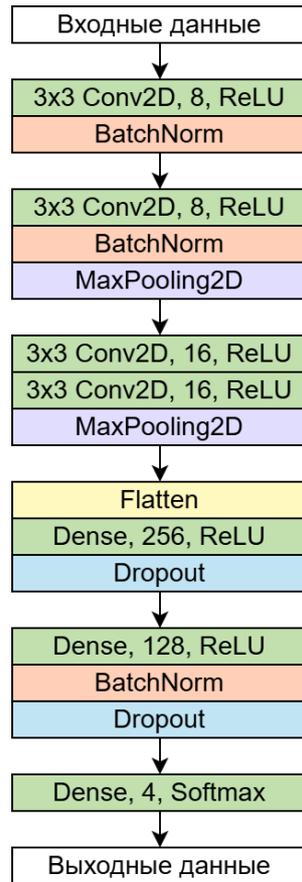


Рисунок 3 – Схема спроектированной сверточной ИНС

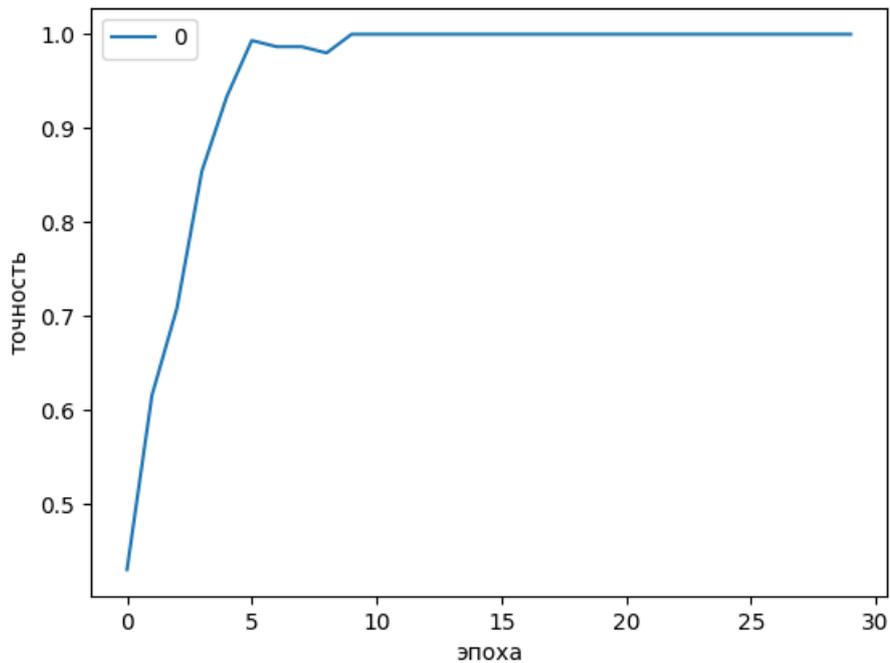


Рисунок 4 – График обучения сверточной ИНС для классификации

Общее число параметров модели, включая параметры оптимизатора – 230 515 262, объемом 879 Мб. Модель была испытана исключительно на серверном оборудовании, поэтому скорость работы не проверялась, однако она может быть оптимизирована - добавление слоев подвыборки и уменьшение числа выделяемых карт признаков позволят уменьшить объем модели, однако могут негативно повлиять на ее точность.

Спроектированная ИНС продемонстрировала скачкообразное обучение, что, однако, может быть вызвано малым объемом датасета. Также была проведена дополнительная проверка с заменой финального слоя ИНС на классификатор на основе логистической регрессии. Результат применения регрессии составил те же 100%, что подтверждает успешность применения сверточной ИНС для выделения признаков из аудиосигнала.

Описанный эксперимент подтвердил эффективность сверточной ИНС при анализе показаний с аудиодатчиков. При этом ИНС учитывает изменение аудиосигнала за установленный промежуток времени, что позволяет ей ориентироваться в своих прогнозах на динамику изменения сигналов и, как следствие, повышает точность по сравнению со статическим измерением уровня шума в конкретный момент времени. Предварительная обработка аудиосигнала с выделением интересующей частоты и фильтрации шумов также повысит точность обнаружения и классификации дефектов и может быть выполнена в том числе на аппаратном уровне.

Анализ окружающей обстановки посредством системы, размещённой на БАС, сводится к рассмотренной ранее задаче локализации источника звука. Следует, однако, отметить различные особенности данного проведения процесса посредством мобильной системы с ограниченными ресурсными возможностями, рассмотренные в статье [17]. В числе подобных особенностей отмечены следующие:

- ограниченное число микрофонов для получения аудиоинформации – большое число установленных микрофонов не позволит проводить анализ информации непосредственно на борту, что снижает автономность БАС;
- слабо изучены процессы дальнего (более 100 метров) обнаружения источника звука, в первую очередь исследования проводятся на тему локализации ближайших источников звука, чаще всего речи;
- сложный анализ обстановки требует использования больших шасси для БАС, предпочтительнее самолётного типа;
- большая часть исследований на данный момент рассматривает обнаружение одного конкретного источника звука, а не полноценного анализа обстановки.

Всё это приводит к необходимости дальнейших исследований в области применимости систем ИИ для данной задачи, в первую очередь систем, основанных на передовой архитектуре трансформер. На данный же момент оценка обстановки на основе акустических данных в области БАС проводится на стороне оператора, а не непосредственно на борту. Вместе с тем применение современных нейросетевых технологий как раз и должно помочь с анализом обстановки на основе данных с небольшого числа микрофонов, потому является перспективным направлением для дальнейших исследований.

Заключение

В рамках данной статьи рассмотрены основные актуальные направления развития технологий анализа акустического профиля БАС, а также окружающей обстановки. Можно отметить, что современные нейросетевые технологии позволяют составить акустический профиль БАС посредством внешней наблюдательной станции, дающий

точность классификации в 95% (на тестовом датасете с 31-м классом БАС). Однако более перспективным является совмещение получаемой аудиоинформации с данными визуального наблюдения и радиочастотного анализа для полноценной локализации и анализа состояния БАС, в которой добавление полученного акустического профиля к данным видеонаблюдения позволило повысить точность детектирования на 6%. В то же время использование систем ИИ на борту БАС ограничено доступными ресурсами, однако успешно может быть применено для анализа состояния БАС (в первую очередь винтов), что подтверждается проведёнными экспериментальными исследованиями. На данный момент слабо изучена область применения систем ИИ для анализа обстановки непосредственно на борту БАС, однако она видится крайне перспективной для дальнейших исследований благодаря развитию технологий периферийного машинного обучения, позволяющих применять многие из описанных в статье моделей ИНС непосредственно силами бортовой аппаратуры БАС.

Список использованных источников

1. Вальштейн К. В., Верхова А. А., Енин Ю. Ю., Гладевич А. А. Использование современных моделей искусственного интеллекта на системах с ограниченными ресурсными возможностями // Информационные технологии в высокотехнологичных производствах (ВТП) : Сборник тезисов докладов III Всероссийской молодежной научной конференции (Санкт-Петербург, 13–14 марта 2025). – Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова, 2025. – С. 162-163.
2. Лестенко Н. А., Вальштейн К. В., Верхова А. А. Современные методы построения систем искусственного интеллекта для обработки аудиосигналов // *Noise Theory and Practice*. – 2025. – Vol. 11, N 1(40). – С. 26-42.
3. Jasim, Shahad. Real Time Drone Detection Based on Acoustics Using Hybrid Deep Learning Models // *Journal of Internet Services and Information Security*. – 2025. – N 15. – P. 673-693.
4. Glüge S. et al. Robust low-cost drone detection and classification using convolutional neural networks in low SNR environments // *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*. – 2024. – Vol. 8. – P. 821-830. DOI: <https://doi.org/10.1109/JRFID.2024.3487303>.
5. Stefanescu R. et al. WAVE-DETR Multi-Modal Visible and Acoustic Real-Life Drone Detector // *Computer Vision and Pattern Recognition* – 2025. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2509.09859> (дата обращения 05.10.2025).
6. Berg A. P., Zhang Q., Wang M. Y. 15,500 Seconds: Lean UAV Classification Leveraging PEFT and Pre-Trained Networks // *Machine Learning*. – 2025. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.arxiv.org/pdf/2506.11049v2> (дата обращения 05.10.2025).
7. Araz R. O. et al. Enhancing Neural Audio Fingerprint Robustness to Audio Degradation for Music Identification // *Sound*. – 2025. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://arxiv.org/abs/2506.22661> (дата обращения 05.10.2025).
8. Hu F., Song X., He R., et al. Sound source localization based on residual network and channel attention module. // *Scientific Reports*. – 2023. – N 13 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-32657-7> (дата обращения 07.10.2025).
9. Youssef K., Barakat J. M. H., Said S., Kork S. A. and Beyrouthy T. An Approach for Single-Channel Sound Source Localization // *IEEE Access*. – 2024. – Vol. 14. – 12 p.
10. Премачандра Чинтака [и др.] Подавление звукового шума на основе GAN для обнаружения жертв на местах стихийных бедствий с помощью БПЛА

// IEEE Transactions on Services Computing. – 2023. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.researchgate.net/publication/376147388_GAN_Based_Audio_Noise_Suppression_for_Victim_Detection_at_Disaster_Sites_with_UAV (дата обращения 09.10.2025).

11. Manamperi Wageesha N., Abhayapala Thushara D., Samarasinghe Prasanga N., Zhang Jihui (Aimee). Drone audition: Audio signal enhancement from drone embedded microphones using multichannel Wiener filtering and Gaussian-mixture based post-filtering // Applied Acoustics. – 2024. – Vol. 216, N 9. – 13 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109818>.

12. Terwilliger A. M., Siegel J. E. The ai mechanic: Acoustic vehicle characterization neural networks // Sound. – 2022. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://arxiv.org/abs/2205.09667> (дата обращения 09.10.2025).

13. Tuleski, B.L., Yamaguchi, C.K., Stefenon, S.F., Coelho, L.d.S., Mariani, V.C. Audio-Based Engine Fault Diagnosis with Wavelet, Markov Blanket, ROCKET, and Optimized Machine Learning Classifiers // Sensors. – 2024. – Vol. 24, N 22. – 23 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24227316>

14. Liu W., Chen Z., Zheng M. An audio-based fault diagnosis method for quadrotors using convolutional neural network and transfer learning // 2020 American Control Conference (ACC). – 2020. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://arxiv.org/abs/2003.02649> (дата обращения 09.10.2025).

15. Anidjar O. H., Barak A., Ben-Moshe B., Hagai E. and Tuvyahu S. A Stethoscope for Drones: Transformers-Based Methods for UAVs Acoustic Anomaly Detection // IEEE Access – 2023.– Vol. 11 – P. 33336-33353.

16. Engine Acoustic Emissions. — 2023. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.kaggle.com/datasets/julienjta/engine-acoustic-emissions/data> (дата обращения 03.02.2026).

17. Chevtchenko S. F. et al. Drone-Based Sound Source Localization: A Systematic Literature Review // IEEE Access. – 2025. – Vol. 13. – P. 94256-94274.

References

1. Valdshtein K. V., Verkhova A. A., Yenin Yu. Yu., Gladevich A. A. Use of Modern Artificial Intelligence Models on Systems with Limited Resources // Information Technologies in High-Tech Industries (HTP): Proceedings of the III All-Russian Youth Scientific Conference (Saint Petersburg, March 13–14, 2025). – Saint Petersburg: Baltic State Technical University "VOENMEKH" named after D.F. Ustinov, 2025. – P. 162-163.

2. Lestenko N. A., Valdshtein K. V., Verkhova A. A. Modern Methods for Building Artificial Intelligence Systems for Audio Signal Processing // Noise Theory and Practice. – 2025. – Vol. 11, No. 1(40). – P. 26-42.

3. Jasim, Shahad. Real Time Drone Detection Based on Acoustics Using Hybrid Deep Learning Models // Journal of Internet Services and Information Security. – 2025. – No. 15. – P. 673-693.

4. Glüge S. et al. Robust low-cost drone detection and classification using convolutional neural networks in low SNR environments // IEEE Journal of Radio Frequency Identification. – 2024. – Vol. 8. – P. 821-830. DOI: <https://doi.org/10.1109/JRFID.2024.3487303>.

5. Stefanescu R. et al. WAVE-DETR Multi-Modal Visible and Acoustic Real-Life Drone Detector // Computer Vision and Pattern Recognition – 2025. – [Electronic resource]. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2509.09859> (accessed 05.10.2025).

6. Berg A. P., Zhang Q., Wang M. Y. 15,500 Seconds: Lean UAV Classification Leveraging PEFT and Pre-Trained Networks // Machine Learning. – 2025. – [Electronic resource]. – URL: <https://www.arxiv.org/pdf/2506.11049v2> (accessed 05.10.2025).
7. Araz R. O. et al. Enhancing Neural Audio Fingerprint Robustness to Audio Degradation for Music Identification // Sound. – 2025. – [Electronic resource]. – URL: <https://arxiv.org/abs/2506.22661> (accessed 05.10.2025).
8. Hu F., Song X., He R., et al. Sound source localization based on residual network and channel attention module. // Scientific Reports. – 2023. – No. 13 [Electronic resource]. – URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-32657-7> (accessed 07.10.2025).
9. Youssef K., Barakat J. M. H., Said S., Kork S. A. and Beyrouthy T. An Approach for Single-Channel Sound Source Localization // IEEE Access. – 2024. – Vol. 14. – 12 p.
10. Premachandra Chintaka [et al.] GAN-Based Audio Noise Suppression for Victim Detection at Disaster Sites with UAVs // IEEE Transactions on Services Computing. – 2023. – [Electronic resource]. – URL: https://www.researchgate.net/publication/376147388_GAN_Based_Audio_Noise_Suppression_for_Victim_Detection_at_Disaster_Sites_with_UAV (accessed 09.10.2025).
11. Manamperi Wageesha N., Abhayapala Thushara D., Samarasinghe Prasanga N., Zhang Jihui (Aimee). Drone audition: Audio signal enhancement from drone embedded microphones using multichannel Wiener filtering and Gaussian-mixture based post-filtering // Applied Acoustics. – 2024. – Vol. 216, No. 9. – 13 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109818>.
12. Terwilliger A. M., Siegel J. E. The ai mechanic: Acoustic vehicle characterization neural networks // Sound. – 2022. – [Electronic resource]. – URL: <https://arxiv.org/abs/2205.09667> (accessed 09.10.2025).
13. Tuleski, B.L., Yamaguchi, C.K., Stefenon, S.F., Coelho, L.d.S., Mariani, V.C. Audio-Based Engine Fault Diagnosis with Wavelet, Markov Blanket, ROCKET, and Optimized Machine Learning Classifiers // Sensors. – 2024. – Vol. 24, No. 22. – 23 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24227316>
14. Liu W., Chen Z., Zheng M. An audio-based fault diagnosis method for quadrotors using convolutional neural network and transfer learning // 2020 American Control Conference (ACC). – 2020. – [Electronic resource]. – URL: <https://arxiv.org/abs/2003.02649> (accessed 09.10.2025).
15. Anidjar O. H., Barak A., Ben-Moshe B., Hagai E. and Tuvyahu S. A Stethoscope for Drones: Transformers-Based Methods for UAVs Acoustic Anomaly Detection // IEEE Access – 2023.– Vol. 11 – P. 33336-33353.
16. Engine Acoustic Emissions. – 2023. – [Electronic resource]. – URL: <https://www.kaggle.com/datasets/julienjta/engine-acoustic-emissions/data> (accessed 03.02.2026).
17. Chevtchenko S. F. et al. Drone-Based Sound Source Localization: A Systematic Literature Review // IEEE Access. – 2025. – Vol. 13. – P. 94256-94274.

УДК: 614.872.4

OECD: 1.03

Изучение акустических характеристик на площадке выхода комбайна

Крутова В.А.¹, Завьялов Д.С.²¹Д.т.н., доцент, и.о. зав. кафедрой «Механика деформируемого твердого тела»²Ассистент кафедры «Механика деформируемого твердого тела»^{1,2}Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

Целью данной работы является экспериментальное исследование акустических характеристик (уровней шума) на площадке выхода кормоуборочного комбайна при различных режимах его работы. Методы исследования включали натурные измерения уровней звукового давления и эквивалентных уровней звука в полевых условиях с использованием сертифицированных шумомеров-анализаторов спектра. Измерения проводились для различных конфигураций работающего оборудования: только двигатель, двигатель с отдельными агрегатами (молотильный барабан, вентилятор, роторы) и при работе всех технологических агрегатов одновременно. Полученные данные сравнивались с требованиями санитарных норм (ГОСТ, СанПиН). Основные результаты показали, что при работе только двигателя эквивалентный уровень шума превышает норму (80 дБА) на 5,9 дБА, достигая 85,9 дБА. При включении всех рабочих органов зафиксировано максимальное превышение на 15,4 дБА (уровень шума составил 95,4 дБА). Наиболее значительные превышения наблюдаются в средне- и высокочастотном диапазонах (125–8000 Гц). Кормоуборочный комбайн является интенсивным источником шума, создающим существенное превышение допустимых уровней на площадке выхода, что подтверждает необходимость совершенствования конструкций машин и применения дополнительных средств шумозащиты для обеспечения безопасности операторов и персонала.

Ключевые слова: уровни шума, комбайн, акустические характеристики, сельское хозяйство, уровень звукового давления

Studying the Acoustic Characteristics at the Combine Harvester's Discharge Area

*Krutova V.A.¹, Zavyalov D.S.²*¹*D.Sc., Associate Professor, Acting Head of the Department of Mechanics of Deformable Solids*²*Assistant of the Department of Mechanical of Deformable Solids*^{1,2}*Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia*

Abstract

The aim of this work is an experimental study of the acoustic characteristics (noise levels) at the exit area of a forage harvester under various operating modes. The research methods included field measurements of sound pressure levels and equivalent sound levels using certified sound level meters and spectrum analyzers.

Measurements were carried out for different configurations of the operating equipment: engine only, engine with individual units (threshing drum, fan, rotors), and with all technological units operating simultaneously. The obtained data were compared with the requirements of sanitary standards (GOST, SanPiN). The main results showed that with only the engine running, the equivalent noise level exceeds the standard (80 dBA) by 5.9 dBA, reaching 85.9 dBA. When all working parts were engaged, a maximum exceedance of 15.4 dBA was recorded (the noise level was 95.4 dBA). The most significant exceedances are observed in the mid- and high-frequency ranges (125–8000 Hz). The forage harvester is an intensive source of noise, creating a significant exceedance of permissible levels at the exit area, which confirms the need to improve machine designs and apply additional noise protection measures to ensure the safety of operators and personnel.

Keywords: noise levels, combine harvester, acoustic characteristics, agriculture, sound pressure level

Введение

Сельское хозяйство представляет собой одну из ключевых отраслей экономики, обеспечивающую продовольственную безопасность государства. Особую значимость в цикле сельскохозяйственных работ имеет уборочная кампания, эффективность которой во многом определяется трудом комбайнёров.

Работа оператора комбайна сопряжена с серьёзными профессиональными вызовами: ему необходимо одновременно управлять сложной техникой и визуально контролировать качество собираемого урожая. Это требует непрерывной концентрации внимания, а также периодического покидания кабины – для осмотра площадки выхода комбайна.

Существенным негативным фактором, влияющим на здоровье и производительность комбайнёров, выступают шум и вибрация. Они не только провоцируют развитие профессиональных заболеваний (вибрационной болезни, неврита слуховых нервов), но и приводят к снижению эффективности труда на 10–15 %. Поскольку деятельность комбайнёров имеет принципиальное значение для аграрного сектора, минимизация воздействия этих вредных факторов становится обязательной задачей.

Обзор литературы показывает, что существующие методики, алгоритмы, а также практические рекомендации по снижению виброакустических характеристик в основном касаются внутреннего шума, возникающего внутри кабин сельскохозяйственных машин [1-9]. Тогда как санитарные нормы, принятые для данного вида техники, регламентируют нормы шума на площадках выхода и на расстоянии 7,5 м от комбайна [10].

В настоящей работе впервые проведено детальное исследование внешнего шума кормоуборочного комбайна именно на площадке выхода – зоне периодического пребывания оператора. Новизна подхода заключается в отдельной оценке вклада каждого технологического агрегата (двигателя, молотильного барабана, вентилятора, роторов, наклонной камеры и жатки) в общий акустический фон.

1 Техническое описание кормоуборочного комбайна и требования к его акустическим характеристикам

Кормоуборочный комбайн представляет собой многофункциональную сельскохозяйственную машину, предназначенную для полной механизации процесса сбора и подготовки кормов. Он осуществляет скашивание, измельчение и погрузку в транспортное средство сеяных или естественных трав, а также подбор и измельчение

массы из валков. В отличие от зерноуборочного комбайна, основным продуктом является не зерно, а измельчённая зелёная масса (силос, сенаж), что определяет специфику его рабочих органов. На рисунке 1 приведена технологическая схема комбайна.

Универсальность такого вида комбайнов достигается за счет использования сменных рабочих органов – кроме жатки и подборщика, могут устанавливаться специальные головки для уборки кукурузы, подсолнечника и других культур с особыми агротехническими требованиями. Это превращает комбайн в ключевой элемент системы точного земледелия, способный адаптироваться к различным условиям уборки.

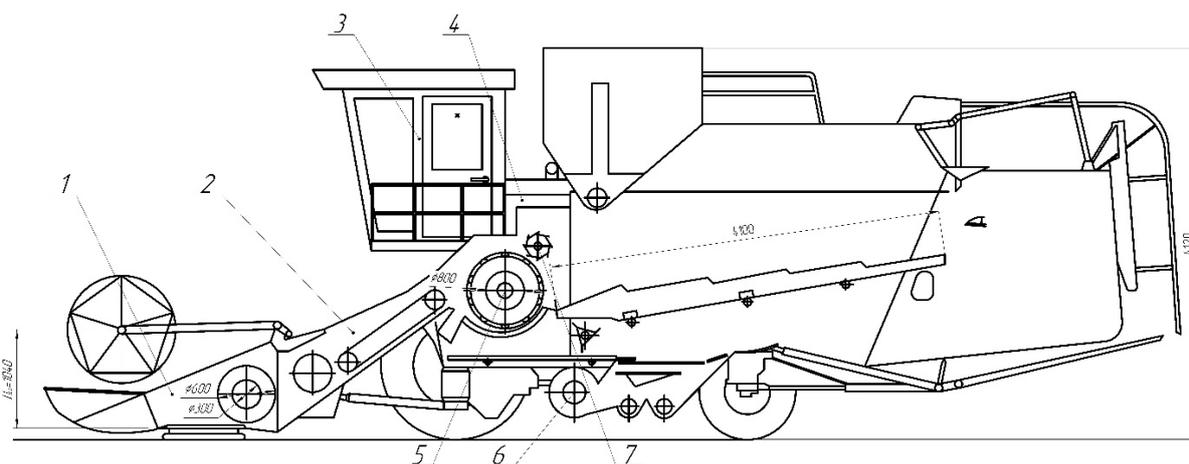


Рисунок 1 – Технологическая схема комбайна: 1 – жатка; 2 – наклонная камера; 3 – кабина; 4 – двигатель; 5 – измельчающий барабан; 6 – вентилятор; 7 – роторы

С точки зрения акустики, интерес представляют узлы, являющиеся основными источниками шума:

- Двигатель внутреннего сгорания (4) – высокооборотный дизель с турбонаддувом, создающий широкополосный шум и шум выхлопа.

- Измельчающий барабан (5) и роторы (7) – генерируют высокочастотный шум при резании и ударах.

- Вентилятор (6) – источник аэродинамического шума, обеспечивающий пневмотранспортировку измельченной массы по силосопроводу.

- Жатка (1) и наклонная камера (2) – создают шум при работе режущего аппарата и транспортировке стеблей.

Кабина оператора (3) выполняет функцию звукоизоляции, однако оператор периодически покидает её для осмотра технологических узлов, подвергаясь воздействию внешнего шума.

Таким образом, кормоуборочный комбайн представляет собой сложный сельскохозяйственный агрегат, сочетающий в себе несколько технологических операций, от скашивания до погрузки измельчённой массы. Высокая интенсивность работы и наличие множества механических узлов, таких как двигатель, молотильный барабан, вентилятор и роторы, неизбежно сопровождаются значительным уровнем шума. Учёт акустических характеристик в процессе проектирования и эксплуатации комбайнов является важным аспектом для создания безопасных условий труда операторов.

Современные стандарты и требования к комбайнам уделяют значительное внимание именно защите оператора от шума. Кабина является основным шумозащитным сооружением, и ее конструкция должна обеспечивать не только механическую безопасность, но и эффективную защиту от шума. Это достигается за счет применения

многослойного остекления, уплотнителей, виброизолирующего крепления кабины к раме, а также специальных звукопоглощающих материалов в отделке внутренних панелей.

Важным аспектом является также оценка внешнего шума, который воздействует на оператора, при его нахождении на открытом участке рабочей площадки, окружающую среду и персонал, работающий вблизи комбайна.

Требования к акустическим характеристикам на рабочих местах комбайнов установлены стандартами по шуму СанПиН 1.2.3685-21 [10], ГОСТ 12.1.003-2014 [11], ГОСТ 12.2.019-15 [12] (таблица 1).

Таблица 1 – Допустимые уровни шума на рабочих местах и на расстоянии 7,5 м от оси движения комбайна

Средние геометрические частоты октавных полос, Гц	Уровни звукового давления, дБ
31,5	107
63	95
125	87
250	82
500	78
1000	75
2000	73
4000	71
8000	69

Эквивалентный уровень звука на рабочих местах и на расстоянии 7,5 м от оси движения комбайна не должен превышать 80 дБА

Превышение данных нормативов требует разработки мер по снижению шума, что подтверждает актуальность данного исследования.

2 Методика измерения шума кормоуборочного комбайна

Целью экспериментальных исследований являлось определение уровней звука и звукового давления на площадке выхода кормоуборочного комбайна, при различных режимах работы технологических агрегатов.

Измерения акустических характеристик проводились в полевых условиях эксплуатации комбайнов на экспериментальной ферме в Ленинградской области. Испытания выполнялись последовательно в двух конфигурациях: при работе комбайна только с включенным двигателем, а также с поэтапным подключением технологических агрегатов для оценки их вклада в общий акустический профиль. Контроль рабочих параметров, включая частоту оборотов двигателя и кинематику рабочих органов комбайна, производился на основе показаний штатной системы мониторинга, данные с которой считывались на информационной панели, расположенной в кабине оператора.

Измерения проводились в нормируемом диапазоне частот 31,5–8000 Гц. Для каждого режима работы комбайна выполнялось не менее пяти измерений, длительность каждого составляла не менее 5 минут. При проведении испытаний были сведены к минимуму внешние источники шума. Измерения проводились на площадке выхода из кабины комбайна, причем микрофон шумомера, при проведении измерений, располагался на уровне органа слуха оператора.

Результаты данных измерений в зависимости от разброса полученных значений усреднялись следующим образом:

– если разность полученных значений меньше 7 дБА, то среднее значение определяется по формуле:

$$\bar{L} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i, \quad (1)$$

где L_i – измеренный уровень звука, дБА;

n – число измерений.

– если разность выше 7 дБА, то среднее значение определяется по формуле:

$$\bar{L} = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1L_i} - 10 \lg n. \quad (2)$$

Для измерений использовались следующие разновидности шумомеров: с микрофонами и вибропреобразователи (рисунок 2), характеристики которых приведены в таблице 2. Для проверки работоспособности приборов используется калибратор шума и вибрации - акустический «ЗАЩИТА-К».



Рисунок 2 – Шумомеры, используемые в ходе эксперимента

Таблица 2 – Перечень средств измерения

№ п/п	Наименование	Зав. №	Микрофон	Предусилитель
1	2	3	4	5
1	Шумомер – анализатор спектра	110096	ВМК-205 зав. № 6918	P200 зав. № 112671
2	Шумомер – анализатор спектра «Октава-110А»	120118	ВК 4133 зав. № 32365	P200 зав. № 154329
3	Шумомер-вибромметр, анализатор спектра «Экофизика-110А»	БА170428	ВМК-205 зав. № 5538	P200 зав. № 175187
4	Шумомер-вибромметр, анализатор спектра «Экофизика-110А»	БА170427	ВМК-205 зав. № 5942	P200 зав. № 175191

3 Результаты и обсуждения

Спектр шума на площадке выхода комбайна с выключенными технологическими агрегатами, то есть только с включенным двигателем представлен на рисунке 3, показывают отсутствие превышения уровня звукового давления на всех октавах для всех рассмотренных измерений.

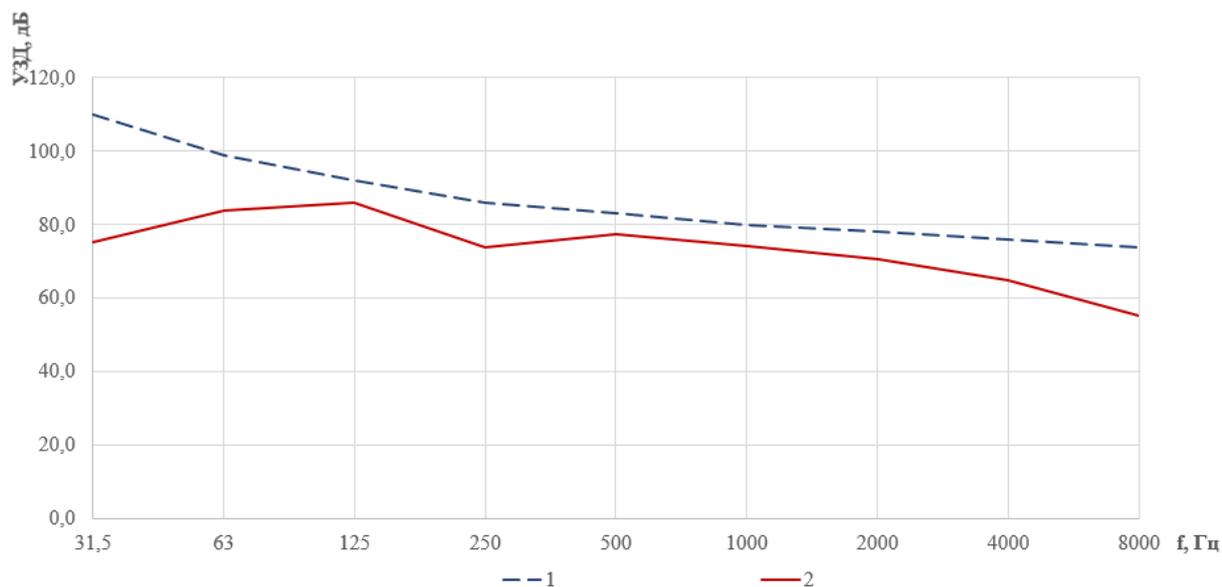


Рисунок 3 – Спектры шума на площадке выхода комбайна: 1 – санитарная норма; 2 – с включенным двигателем

Спектры шума на площадке выхода комбайна с установленными технологическими агрегатами, представленные на рисунке 4, показывают отсутствие в первых октавах превышения уровня звукового давления (УЗД) для всех рассмотренных измерений. Далее отмечаются превышения для всех испытаний в которых были включены молотильный барабан, вентилятор и роторы: на частоте равной 125 Гц, наибольшая (с включёнными двигателем, молотильным барабаном, вентилятором, роторами, наклонной камерой и жаткой) разница между санитарной нормой и полученным уровнем звукового давления составляет 9 дБ, на частоте 250 Гц, наибольшая разница между санитарной нормой и полученным уровнем звукового давления составляет 11 дБ. В интервале 500...8000 Гц величина превышения достигает своего максимального значения, равного 10 дБ (на частоте 500 Гц достигает 14 дБ, 1000 Гц – 11 дБ, 2000 Гц – 8 дБ, 4000 Гц – 6 дБ, на частоте 8000 Гц превышение составляет 5 дБ).

На рисунке 5 приведена сравнительная гистограмма значений эквивалентного уровня звука (дБА) на площадке выхода комбайна относительно установленных санитарных норм.

Измерения показали, что в случае с работающим двигателем значение эквивалентного уровня звука превышает санитарную норму. Значение эквивалентного уровня звука при рабочем двигателе равно 85,9 дБА, что превышает значение санитарной нормы на 5,9 дБА.

На рисунке 6 приведена сравнительная гистограмма значений эквивалентного уровня звука (дБА) на площадке выхода комбайна с установленными технологическими агрегатами относительно установленных санитарных норм.

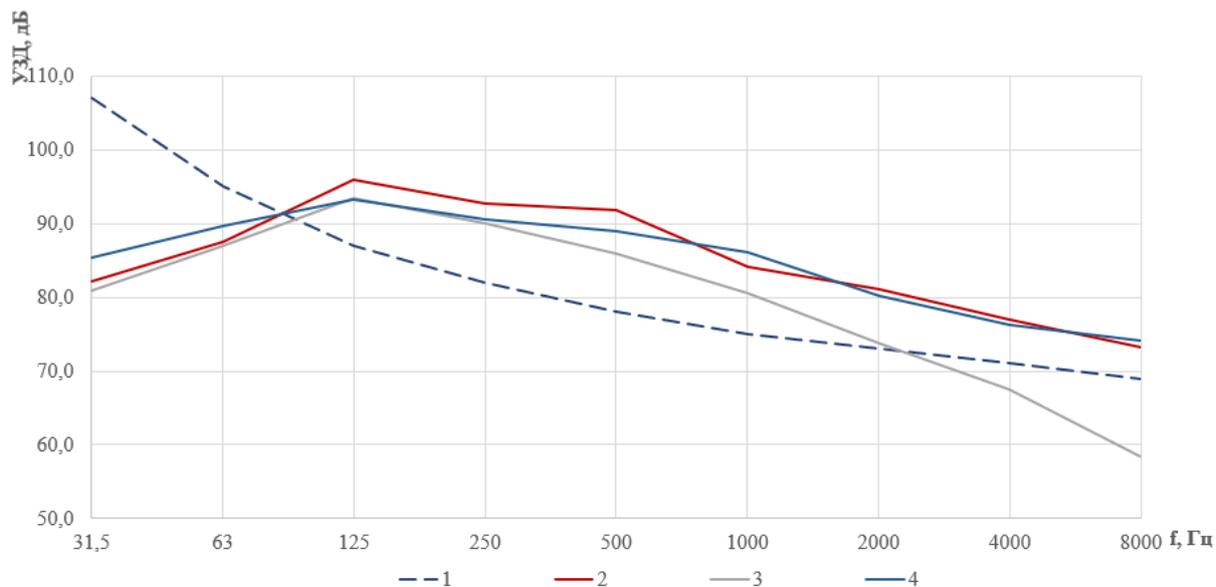


Рисунок 4 – Спектры шума на площадке выхода комбайна с установленными технологическими агрегатами: 1 – санитарная норма; 2 – с включёнными двигателем, молотильным барабаном, вентилятором и роторами; 3 – с включёнными двигателем, молотильным барабаном, вентилятором, роторами и наклонной камерой; 4 – со всеми включенными технологическими агрегатами

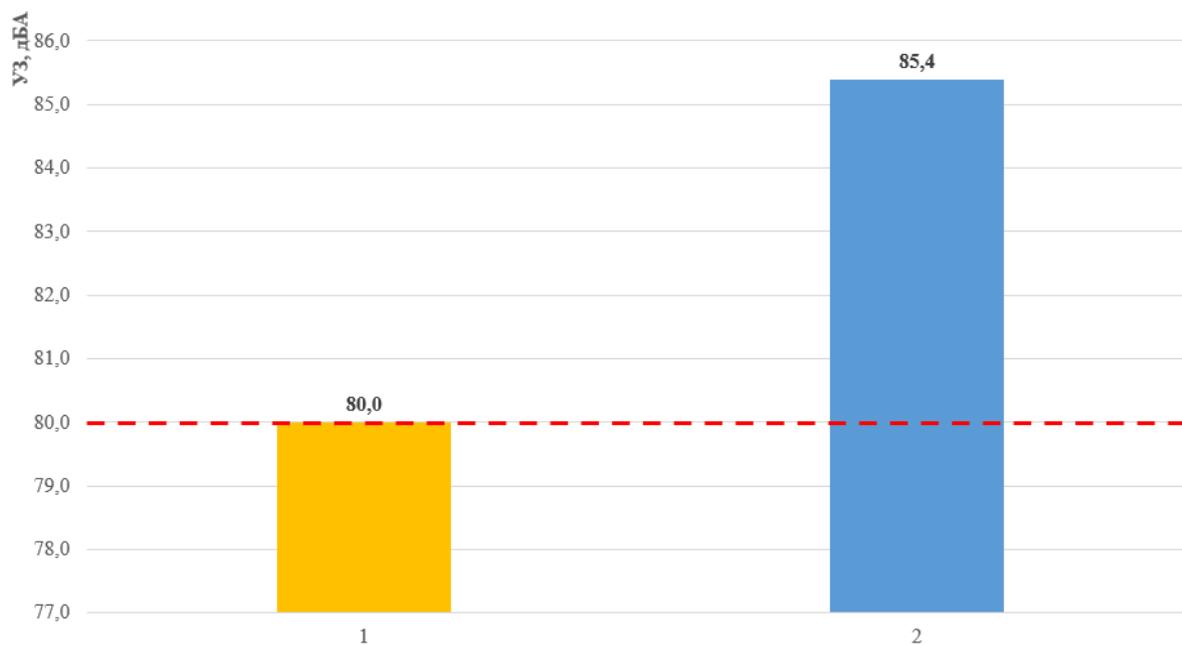


Рисунок 5 – Эквивалентные уровни звука на площадке выхода комбайна: 1 – санитарная норма; 2 – с включенным двигателем

Из измерений видно, что во всех случаях значения эквивалентных уровней звука превышают санитарную норму. Наибольшее значение эквивалентного уровня звука достигается в случае, когда всё оборудование комбайна включено, а именно кондиционер, двигатель, молотильный барабан, вентилятор, роторы, наклонная камера и равно 95,4 дБА, что превышает значение санитарной нормы на 15,4 дБА.

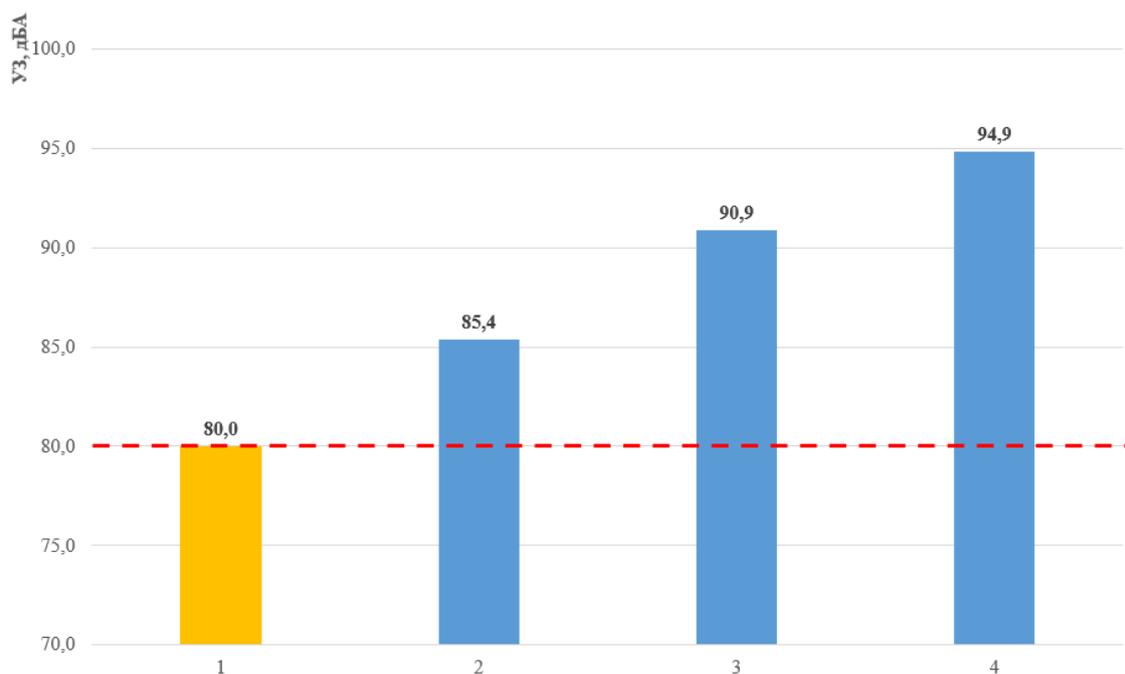


Рисунок 6 – Эквивалентные уровни звука на площадке выхода комбайна с установленными технологическими агрегатами: 1 – санитарная норма; 2 – с включённым двигателем, молотильным барабаном, вентилятором и роторами; 3 – с включённым двигателем, молотильным барабаном, вентилятором, роторами и наклонной камерой; 4 – со всеми включенными технологическими агрегатами

Проведённые исследования демонстрируют значительную зависимость уровня шума на площадке выхода комбайна от состава работающих технологических агрегатов. В режиме работы только двигателя спектральные характеристики не превышают санитарных норм во всех октавных полосах, однако эквивалентный уровень звука показывает превышение на 5,9 дБА.

При поэтапном включении рабочих органов – молотильного барабана, вентилятора, роторов, наклонной камеры и жатки – наблюдаются существенные превышения санитарных норм как в отдельных октавах (особенно на низких и средних частотах), так эквивалентного уровня звука. Максимальное превышение, достигающее 15,4 дБА, фиксируется при работе всех агрегатов одновременно.

Заключение

Проведённые исследования акустических характеристик на площадке выхода кормоуборочного комбайна показали, что уровень шума, создаваемый его работой, является значительным и в большинстве случаев превышает установленные санитарные нормы. В частности:

1. Без работающего оборудования наблюдается превышение санитарных норм по эквивалентному уровню звука. Максимальное значение эквивалентного уровня звука составило 85,9 дБА, что на 5,9 дБА выше допустимого значения (80 дБА).

2. При работе всех основных агрегатов (двигателя, молотильного барабана, вентилятора, роторов, наклонной камеры, жатки) уровень шума возрастает существенно. Максимальное значение достигает 95,4 дБА, что превышает норму на 15,4 дБА.

3. Наиболее значительные превышения наблюдаются в средне- и высокочастотных диапазонах (125–8000 Гц), что связано с работой режущих, измельчающих и вентиляционных устройств.

Таким образом, кормоуборочный комбайн является мощным источником шума, что создаёт риски для здоровья оператора и персонала, работающего вблизи техники. Несмотря на наличие шумоизолированной кабины, внешний шум остаётся значительным, особенно в условиях выполнения полевых работ.

Проведённые исследования подтверждают актуальность задачи снижения шумового воздействия сельскохозяйственной техники и необходимость учёта акустических факторов на этапах её проектирования и эксплуатации.

Список использованных источников

1. Çakmak B. et al. Vibration and noise characteristics of flap type olive harvesters // Applied Ergonomics. – 2011. – Vol. 42, № 3. – P. 397–402. – DOI: <https://doi.org/10.1016/2010.08.015>.
2. Шашурин А.Е. Снижение внутреннего шума звукоизолирующими кабинами: на примере строительного-дорожного машин : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.06. – СПб.: Изд-во БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2010. – 182 с.
3. Cecchini M. Noise Exposure, Prevention, and Control in Agriculture and Forestry: A Scoping Review // Safety. - 2024. - Vol. 55, N 1. - P. 15-28. - DOI: [10.3390/safety10010015](https://doi.org/10.3390/safety10010015).
4. Безручко А.Ф., Костенич В.Г., Бондаренко И.И., Жданович Д.Е. [и др.] Методика исследований шума агрегатов и систем трактора // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. - 2024. - N 2. - С. 141-146.
5. Jing J., Sun H., Liang R., Chen S. [et al.] Noise Testing of the Conveyor Trough Sprocket and Surface Noise Reduction Performance Evaluation of the Cavity Structure in a Combine Harvester // Agriculture. - 2025. - Vol. 15, N 12. – P. 1299. - DOI: [10.3390/agriculture15121299](https://doi.org/10.3390/agriculture15121299).
6. Barač Ž., Plaščak I., Radocaj D., Jurišić M. The Impact of Noise on Agricultural Tractor Operator in Relation to Certain Operational Parameters: An Analytical Hierarchy Process (AHP) Approach // Proceedings of the 52nd International Symposium on Agricultural Engineering "Actual Tasks on Agricultural Engineering". - Opatija, Croatia, 2025. - P. 1-16. - DOI: [10.3390/agriculture15050466](https://doi.org/10.3390/agriculture15050466).
7. Han H.-W., Kang M.-W., Lee S.-H., Seo Y.-H., Cho S.-J., Kim J.-G., Kim Y.-J., Park Y.-J. Root cause analysis of noise transfer in an entire tractor system using multi-layer operational transfer path analysis // Smart Agricultural Technology. - 2025. - Vol. 10, Article 100754. - DOI: [10.1016/j.atech.2024.100754](https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100754).
8. Analysis of earth-moving machines noise: A new method of separation of noise sources contributions / M. S. Atabekyan, N. I. Ivanov, G. M. Kurtsev [et al.] // 8th European Conference on Noise Control 2009, EURONOISE 2009 - Proceedings of the Institute of Acoustics, Edinburgh, 26–28 октября 2009 года. Vol. 31. – Edinburgh, 2009. – EDN RHQGEJ.
9. Stangl G. A., Porterfield J. G., Lowery R. L. Tractor Exhaust Noise Evaluation Technique // Transactions of the ASAE. – 1973. – Vol. 16, № 4. – P. 601–605. – DOI: [10.13031/2013.37581](https://doi.org/10.13031/2013.37581).
10. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания // Роспотребнадзор : [Электронный ресурс]. - URL: https://www.rospotrebnadzor.ru/files/news/GN_sreda%20_obitaniya_compressed.pdf.
11. ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности // Техэксперт : [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200118606>.

12. ГОСТ 12.2.019-2015 Система стандартов безопасности труда. Тракторы и машины самоходные сельскохозяйственные. Общие требования безопасности // Техэксперт : [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200137155>.

References

1. Çakmak B. et al. Vibration and noise characteristics of flap type olive harvesters // Applied Ergonomics. – 2011. – Vol. 42, № 3. – P. 397–402. – DOI: <https://doi.org/10.1016/2010.08.015>.
2. Shashurin A.E. Snizhenie vnutrennego shuma zvukoizoliruyushchimi kabinami: na primere stroitel'no-dorozhnykh mashin : dis. ... kand. tekhn. nauk : 01.04.06. – SPb.: Izd-vo BGTU «VOENMEH», 2010. – 182 p.
3. Cecchini M. Noise Exposure, Prevention, and Control in Agriculture and Forestry: A Scoping Review // Safety. - 2024. - Vol. 55, N 1. - P. 15-28. - DOI: [10.3390/safety10010015](https://doi.org/10.3390/safety10010015).
4. Bezruchko A.F., Kostenich V.G., Bondarenko I.I., Zhdanovich D.E., [et al.] Methodology for Studying the Noise of Tractor Units and Systems // Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy. – 2024. – N 2. – P. 141-146.
5. Jing J., Sun H., Liang R., Chen S. [et al.] Noise Testing of the Conveyor Trough Sprocket and Surface Noise Reduction Performance Evaluation of the Cavity Structure in a Combine Harvester // Agriculture. - 2025. - Vol. 15, N 12. – P. 1299. - DOI: [10.3390/agriculture15121299](https://doi.org/10.3390/agriculture15121299).
6. Barač Ž., Plaščak I., Radocaj D., Jurišić M. The Impact of Noise on Agricultural Tractor Operator in Relation to Certain Operational Parameters: An Analytical Hierarchy Process (AHP) Approach // Proceedings of the 52nd International Symposium on Agricultural Engineering "Actual Tasks on Agricultural Engineering". - Opatija, Croatia, 2025. - P. 1-16. - DOI: [10.3390/agriculture15050466](https://doi.org/10.3390/agriculture15050466).
7. Han H.-W., Kang M.-W., Lee S.-H., Seo Y.-H., Cho S.-J., Kim J.-G., Kim Y.-J., Park Y.-J. Root cause analysis of noise transfer in an entire tractor system using multi-layer operational transfer path analysis // Smart Agricultural Technology. - 2025. - Vol. 10, Article 100754. - DOI: [10.1016/j.atech.2024.100754](https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100754).
8. Analysis of earth-moving machines noise: A new method of separation of noise sources contributions / M. S. Atabekyan, N. I. Ivanov, G. M. Kurtsev [et al.] // 8th European Conference on Noise Control 2009, EURONOISE 2009 - Proceedings of the Institute of Acoustics, Edinburgh, 26–28 октября 2009 года. Vol. 31. – Edinburgh, 2009. – EDN RHQGEJ.
9. Stangl G. A., Porterfield J. G., Lowery R. L. Tractor Exhaust Noise Evaluation Technique // Transactions of the ASAE. – 1973. – Vol. 16, № 4. – P. 601–605. – DOI: [10.13031/2013.37581](https://doi.org/10.13031/2013.37581).
10. SanPiN 1.2.3685-21 Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans // Rospotrebnadzor : [Electronic resource]. - URL: https://www.rospotrebnadzor.ru/files/news/GN_sreda%20_obitaniya_compressed.pdf.
11. GOST 12.1.003-2014 Occupational Safety Standards System. Noise. General Safety Requirements // Techexpert : [Electronic resource]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200118606>.
12. GOST 12.2.019-2015 Occupational Safety Standards System. Tractors and Self-Propelled Agricultural Machines. General Safety Requirements // Techexpert : [Electronic resource]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200137155>.



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