

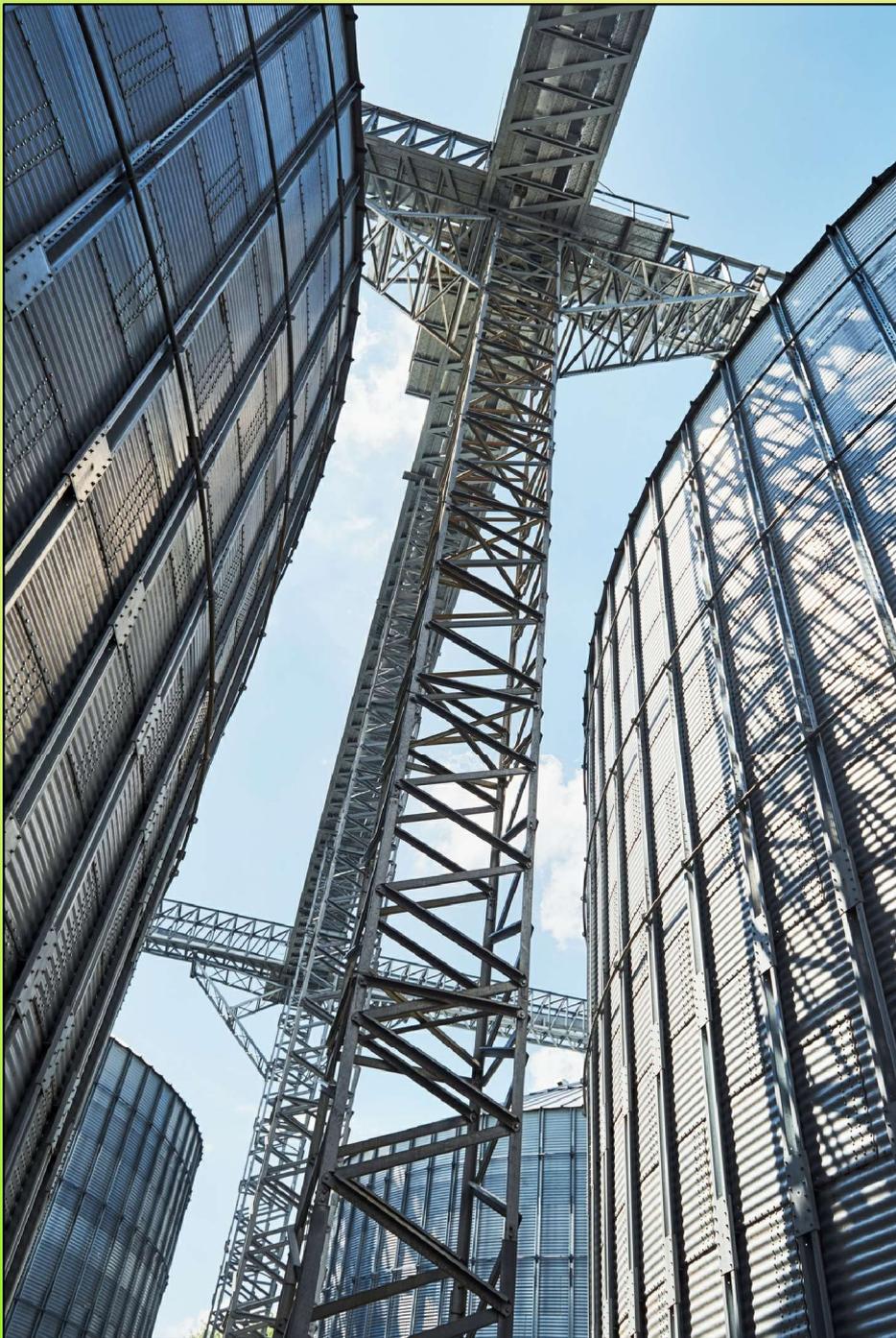
ISSN 2412-8627

Vol. 11 No. 1

# Noise

## Theory and Practice

Scientific Journal



I  
2025

Acoustic Design Institute

# Редакционная коллегия

## Главный редактор

Иванов Николай Игоревич



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

## Заместитель главного редактора

Тюрина Наталья Васильевна



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

## Члены редакционной коллегии

Шашурин Александр Евгеньевич



Доктор технических наук, профессор, и.о. ректора 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 «Экология и производственная безопасность», начальник международного управления 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, заведующий кафедрой «Плазмогазодинамика и теплотехника» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (г. Санкт-Петербург, РФ)

**Элькин Юрий Иосифович**



Доктор технических наук, профессор кафедры «Инженерно-экологические инновации и комплексная безопасность» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (г. Москва, РФ)

**Вельбель Александр Мотьявич**



Начальник акустического стенда научно-исследовательской лаборатории ООО "Арктос" (г. Санкт-Петербург, РФ)

**Элеонора Карлетти**



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

**Кобиров Эргаш Эгамбердиевич**



Доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой "Экология и безопасность жизнедеятельности" Самаркандского государственного университета им.Ш.Рашидова (г. Самарканд, Узбекистан)

## Editor-in-chief

Nickolay Ivanov



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

## Deputy Editor-in-chief

Natalya Tyurina



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

## Members of the Editorial Board

Aleksandr Shashurin



Doctor of Engineering Science, Professor, Executing Rector's Duty of the Baltic State Technical University 'VOENMEH' (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



Ph.D. of Engineering Science, Professor of the Department of Ecology and Industrial Safety, Head of the International Department 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, honored ecologist of the Samara region (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



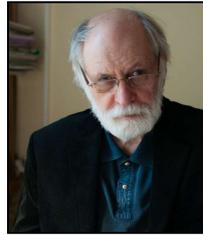
Doctor of Engineering Science, Professor, Chief Researcher at the Research Institute of Construction Physics, Professor of the Moscow State University of Printing Arts named after Ivan Fyodorov (Moscow, Russia)

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

## Yuri Elkin



Doctor of Engineering Science, Professor of the Department of 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)

## 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)

## 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)

Научный журнал  
Том 11 №1

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

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

выпускается с 2015 г.

Основателем журнала является д.т.н., профессор кафедры "Экология и производственная безопасность" Балтийского государственного технического университета "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова, основатель 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

**Фактический адрес редакции**

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

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

**Свидетельство**

ЭЛ № ФС 77-74057

**Содержание**

**Марфин Е.А., Овчинников М.Н.**

РУС

Спектральные характеристики шумов фильтрации газа в образцах карбонатных коллекторов

стр. 7-16

**Кирпичников В.Ю., Смольников В.Ю.,  
Кудаев А.В.**

РУС

Уменьшение вибрации и шумоизлучения пластины армированным вибропоглощающим покрытием на основе полимерной пленки

стр. 17-25

**Лестенко Н.А., Вальштейн К.В., Верхова А.А.**

РУС

Современные методы построения систем искусственного интеллекта для обработки аудиосигналов

стр. 26-42

**Рахматов Р.И., Говердовский В.Н., Карпов Е.В.**

РУС

Моделирование свойств низкочастотных абсорберов с акустическими черными дырами

стр. 43-52

**Буторина М.В., Те Цзявей, Элькин Ю.И.**

РУС

Сравнение нормативов и методов снижения шума в Китае и России

стр. 53-66

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

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

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

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

**Location address of the Editorial office**

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

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

**The certificate of registration**

ЭЛ № ФС 77-74057

## Contents

**Marfin E.A., Ovchinnikov M.M.** RUS

Spectral characteristics of gas filtration noise in carbonate reservoir samples

pp. 7-16

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

Reduction of vibration and noise emission of the plate with a reinforced vibration-absorbing coating based on a polymer film

pp. 17-25

**Lestenko N.A., Valshtein K.V., Verhova A.A.** RUS

Modern methods for building artificial intelligence systems for audio signal processing

pp. 26-42

**Rakhmatov R.I., Goverdovskiy V.N., Karpov E.V.** RUS

Modeling the properties of low-frequency absorbers with acoustic black holes

pp. 43-52

**Butorina M.V., Te Jiawei, Elkin Yu.I.** RUS

Comparison of noise limits and noise reduction measures in China and Russia

pp. 53-66

УДК: 534.141.4; 532.685  
OECD: 1.05 LE

## Спектральные характеристики шумов фильтрации газа в образцах карбонатных коллекторов

Марфин Е.А.<sup>1</sup>, Овчинников М.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>К.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории «Теплофизики и волновых технологий», Институт энергетики и перспективных технологий,

ФИЦ Казанский научный центр РАН, г. Казань, РФ,

<sup>2</sup>Д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры «Радиоэлектроники», Институт физики Казанского федерального университета, г. Казань, РФ

### Аннотация

В работе представлены результаты экспериментального исследования акустических характеристик шума потока газа в пористых образцах карбонатных пород. Получены спектры шумов фильтрации для образцов с различными значениями проницаемости при разных градиентах давления. На основе обобщения экспериментальных данных установлено, что среднее значение интенсивности шумов фильтрации зависит от градиента давления в четвертой степени, что подтверждает квадратичную зависимость амплитуды генерируемых звуковых колебаний от скорости фильтрации. Было установлено, что при одинаковой скорости фильтрации образцы с более низкой проницаемостью и пористостью демонстрировали более высокую интенсивность звука. Полученные результаты имеют важное значение для развития теории генерации фильтрационного шума и интерпретации данных, зарегистрированных скважинным шумомером.

**Ключевые слова:** керн, пористая среда, фильтрация, газ, акустическая эмиссия, спектр, интенсивность звука.

## *Spectral characteristics of gas filtration noise in carbonate reservoir samples*

*Marfin E.A.<sup>1</sup>, Ovchinnikov M.M.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*PhD, assistant professor, Leading researcher of the laboratory of Thermophysics and Wave Technologies, Federal Research Center 'Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences'*

<sup>2</sup>*DSc, assistant professor, professor of the department of Radioelectronics, Institute of Physics, Kazan Federal University, Kazan, Russia*

### **Abstract**

*The present paper sets out the findings of an experimental study into the acoustic characteristics of gas flow noise in porous carbonate rock samples. Filtration noise spectra for samples exhibiting different permeability values at varying pressure gradients were obtained, and generalized experimental data was found to demonstrate that the average value of filtration noise intensity depends on the pressure gradient to the fourth degree. This finding thus confirms the quadratic dependence of the amplitude of generated sound oscillations on the filtration velocity. Furthermore, it was established that, at a constant filtration rate, samples characterized by lower permeability and porosity exhibited higher sound intensity. The findings of this study are of significant importance for the advancement of the theory of filtration noise generation and the interpretation of borehole spectral noise logging data.*

**Keywords:** *core, porous medium, filtration, gas, acoustic emission, spectrum, sound intensity.*

## Введение

Для изучения состояния скважин и околоскважинного пространства применяются различные геофизические методы. Одним из наиболее перспективных и эффективных методов, используемых для исследования акустических характеристик в различных инженерных и геофизических задачах, является метод скважинной шумометрии [1-4]. Этот метод включает в себя регистрацию акустического шума, который возникает внутри скважины, а также последующую интерпретацию и анализ его спектральной картины [5]. Спектральный анализ позволяет выявить специфические особенности и закономерности в распределении частот шума, что, в свою очередь, предоставляет ценную информацию о процессе или явлении, которое вызывает этот шум. Источниками акустического шума в скважинах могут быть различные физические и механические процессы [6-8]. К таким источникам можно отнести, например, турбулентный шум, возникающий в результате течения жидкости или газа по трубопроводу. Кроме того, шум может быть обусловлен потоками, возникающими в местах нарушения целостности труб, а также заколонными перетоками, когда происходит движение пластового флюида через геологические образования в зоне между скважиной и продуктивным пластом. Еще одним важным источником акустического шума является фильтрация в пористых средах, где процессы переноса жидкости или газа сопровождаются определенными вибрациями и звуковыми колебаниями. В некоторых случаях акустическая эмиссия может исходить от элементов скважин и продуктивных пластов, которые подвергаются механическим нагрузкам и деформации, что также вызывает специфические акустические сигналы. В процессе разработки месторождений горные породы и продуктивные пласты испытывают различные напряжения и деформацию. Как отмечено в обзорной статье [9] и работе [10] источниками акустической эмиссии при таких нагружениях могут быть: перестройка структуры среды; трение частиц среды; образование трещин; фильтрация флюида; движение границ раздела «газ-жидкость». Шум каждого источника в скважине характеризуется уникальным амплитудно-частотным спектром [11].

Относительно механизма генерации звуковых колебаний при течении жидкости через пористые среды в настоящее время в научном сообществе отсутствует единое мнение. В научной литературе представлены различные гипотезы, объясняющие процессы, приводящие к образованию фильтрационного шума. Некоторые учёные утверждают, что движение жидкости в пористой среде связано с турбулентными явлениями, возникающими из-за образования микроскопических вихрей в потоке жидкости [12]. Взаимодействие этих вихрей с твердой поверхностью пор, в свою очередь, могут вызывать генерацию колебаний, аналогичную процессам в струйном осцилляторе Гельмгольца [13]. Другие исследователи акцентируют внимание на пульсирующем характере движения жидкости или газа, проходящего через межпоровые сужения в пласте, что также приводит к возникновению акустических колебаний и шума [14]. Спектральную «окраску» шумов фильтрации описывает альтернативная гипотеза, которая предполагает, что пористую среду можно рассматривать как совокупность резонаторов Гельмгольца [15]. Согласно ей, движение жидкости через такие резонаторы вызывает акустические колебания на их собственных резонансных частотах. Результаты экспериментальных исследований, представленных в работе [16], подтверждают эту гипотезу. В этих экспериментах, проведенных на образцах карбонатных пород и песчаников, было установлено, что известняковые образцы генерируют шум в диапазоне частот от 2 до 30 кГц, в то время как шум, исходящий от песчаника, значительно отличается и возникает в диапазоне от 1 до 5 кГц. При этом отмечено, что сложные по своей структуре карбонатные породы проявляют большую склонность к генерации акустических колебаний, чем более однородные песчаники. В работе [17] предложена

теория, объясняющая возникновение фильтрационного шума, которая согласуется [18] с результатами предыдущих экспериментов, проведенных авторами [19]. Тем не менее, отсутствие общепринятой теории фильтрационной шумогенерации продолжает вызывать значительные разногласия среди ученых, что, в свою очередь, затрудняет интерпретацию данных, получаемых при регистрации сигналов с помощью скважинных шумомеров.

В настоящей работе исследованы шумы, генерируемые при фильтрации газа через образцы карбонатных пористых сред. Выбор карбонатных коллекторов в качестве объектов исследования обусловлен тем, что в этих проницаемых породах, состоящих в основном из известняков и доломитов, содержится до 60% мировых запасов углеводородов. При этом характерной особенностью карбонатных пород также является анизотропия их коллекторских и физических свойств, обусловленная трещиноватостью [20].

## 1. Методика проведения экспериментов и объекты исследования

Для проведения экспериментальных исследований, направленных на анализ акустического шума, возникающего при фильтрации газов через пористую среду, был использован специально разработанный лабораторный стенд, схема которого представлена на рисунке 1, и соответствующая методика эксперимента. Детальное описание используемой методологии можно найти в работе [19]. В ходе эксперимента акустические колебания, возникающие в пористых образцах (1) при фильтрации газа, регистрировались с помощью контактного микрофона (6), который располагался на боковой поверхности исследуемого образца пористой среды. Такое расположение датчика позволяет исключить шумы натекания на него потока газа, выходящего из образца. Сигнал, полученный с контактного микрофона, подавался на предусилитель (7), для его усиления и дальнейшей обработки. После предусилителя сигнал поступал на анализатор спектра ZET 017-U4 (8), который выполнял функцию аналого-цифрового преобразования и обеспечивал преобразование аналогового сигнала в цифровую форму для последующего анализа. На заключительном этапе данные передавались на персональный компьютер (9), где проводилась их дальнейшая обработка и анализ с использованием специализированного программного обеспечения CoolEditPro. Такой комплексный подход позволяет получать данные, которые необходимы для детальной интерпретации акустических характеристик шума, генерируемого при фильтрации газа через пористую среду.

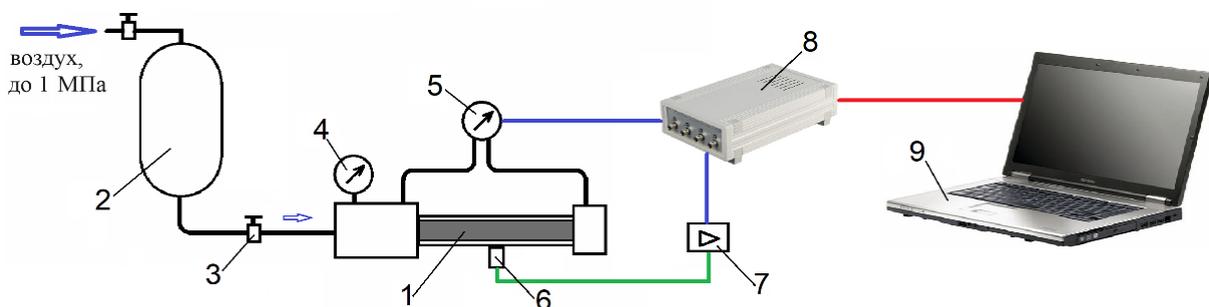


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – пористый образец, 2 – ресивер, 3 – вентиль-регулятор давления, 4 – стрелочный манометр, 5 – датчик разности давления, 6 – контактный микрофон, 7 – предусилитель, 8 – анализатор спектра, 9 – ноутбук

Объектами исследования в работе были пять образцов карбонатных пород нефтяных месторождений Татарстана, обладающих отличающимися

между собой фильтрационно-емкостными свойствами. Образцы диаметром 25 мм и высотой 50 мм отбирались исходя из их пригодности для предполагаемого анализа (рисунок 2). Фильтрационные и емкостные свойства их измерялись в лаборатории Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского федерального университета на анализаторе газопроницаемости и пористости ПИК-ПП (АО «Геологика»). Некоторые полученные характеристики пористых образцов представлены в таблице 1.

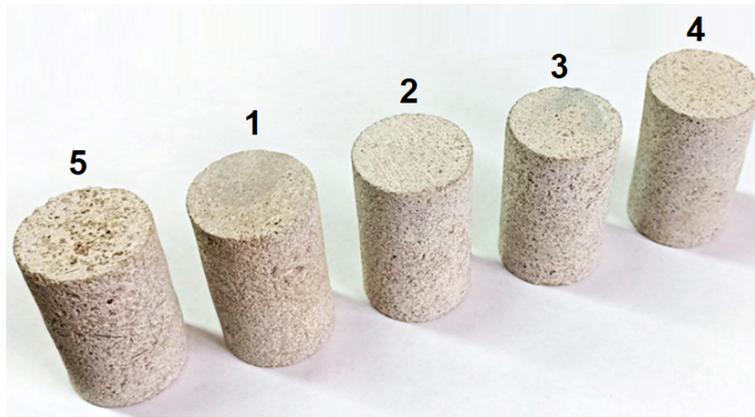


Рис. 2. Фотографии пористых образцов

Таблица 1

Свойства образцов карбонатных коллекторов

№ образца	Пористость, %	Проницаемость, мД	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
1	11,5	439	2700
2	13,6	598	2690
3	14,2	878	2710
4	15,8	1117	2660
5	16,8	1994	2690

## 2. Спектральные характеристики пористых образцов

Эксперименты проводились как в стационарном режиме при постоянном градиенте давления, так и в нестационарном режиме. Постоянный расход газа в первом случае обеспечивался регулятором давления (3). Во втором, для обеспечения нестационарного режима ресивер (2) заполнялся воздухом до определенного давления, вентиль (3) полностью открывался и весь воздух выходил из ресивера через пористый образец. При этом давление перед образцом падало, градиент давления и объемный расход снижались. В процессе фильтрации происходила генерация шума. Спектры шумов каждого образца отличались между собой. На рисунке 3 представлены спектры шумов фильтрации для некоторых образцов, полученные при различных градиентах давления. Общей чертой спектров для всех образцов является то, что характерные частоты ниже 10 кГц. В фильтрационном течении по закону Дарси скорость потока пропорциональна градиенту давления. Следовательно, увеличение перепада давления увеличивает скорость фильтрации и приводит к повышению амплитуды шума. При этом значения частот характерных пиков в спектре не меняются. Учитывая тот факт, что проницаемость пористых образцов отличается между собой, следовало ожидать, что и

максимальные амплитуды шума фильтрации при одинаковых градиентах давления будут разными, что и подтверждают представленные на рисунках 3 данные.

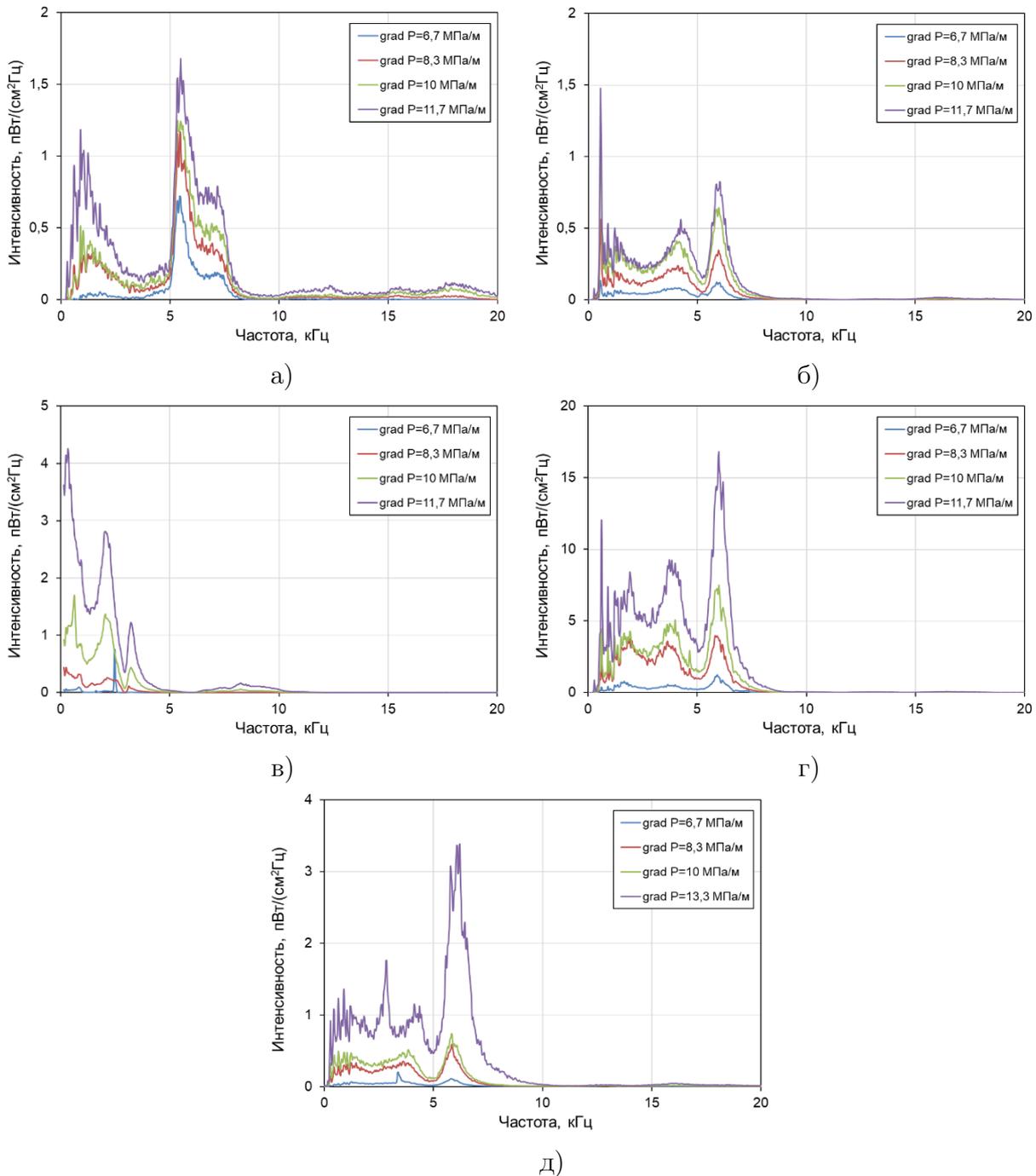


Рис. 3. Спектры приведенной к частоте интенсивности шумов фильтрации: а) образец 1, б) образец 2, в) образец 3, г) образец 4, д) образец 5

В спектре акустического шума наблюдается явный максимум, который возникает при каждом значении перепада давления. В предыдущей работе [21] были установлены зависимости между максимальным значением интенсивности шума в спектре и объемной скоростью фильтрации газа через образец. При этом для каждого конкретного образца эти зависимости имели свою уникальную форму. В рамках настоящего исследования были получены аналогичные зависимости для интегральной интенсивности шума фильтрации. Однако, когда мы разделили объемный расход на значение проницаемости,

экспериментальные данные для всех образцов оказались близкими к единой зависимости. На рисунке 4 представлена зависимость интегральной интенсивности шума фильтрации от градиента давления, который воздействует на пористый образец. Эта зависимость хорошо аппроксимируется степенной функцией с показателем степени, равным 4. Учитывая, что интенсивность звука пропорциональна квадрату амплитуды, можно сделать вывод, что амплитуда фильтрационных шумов будет зависеть от скорости фильтрации и изменяться как квадратичная функция от этой скорости. Также из полученных данных видно, что с увеличением проницаемости пористого образца генерация шумов начинает проявляться при более высоких значениях скоростей фильтрации. Это подтверждает вывод, сделанный в работе [16], о том, что акустический шум в образцах горных пород появляется только тогда, когда число Форкхаймера превышает значения в диапазоне 0,1–0,3. Полученные экспериментальные данные могут свидетельствовать о том, что перепад давления оказывает влияние на изменение структуры каналов фильтрации, например, на изменение размеров трещин. Важно отметить, что карбонатные коллекторы характеризуются не только пористостью, но и трещиноватостью, что играет значительную роль в их проницаемости. В качестве гипотезы можно предложить, что при увеличении градиента давления проницаемость трещин может снижаться. Это, в свою очередь, приводит к снижению общей проницаемости коллектора и уменьшению объемного расхода газа. Таким образом, результаты экспериментов подтверждают важность учета изменений в структуре трещин при оценке фильтрационных процессов в карбонатных коллекторах.

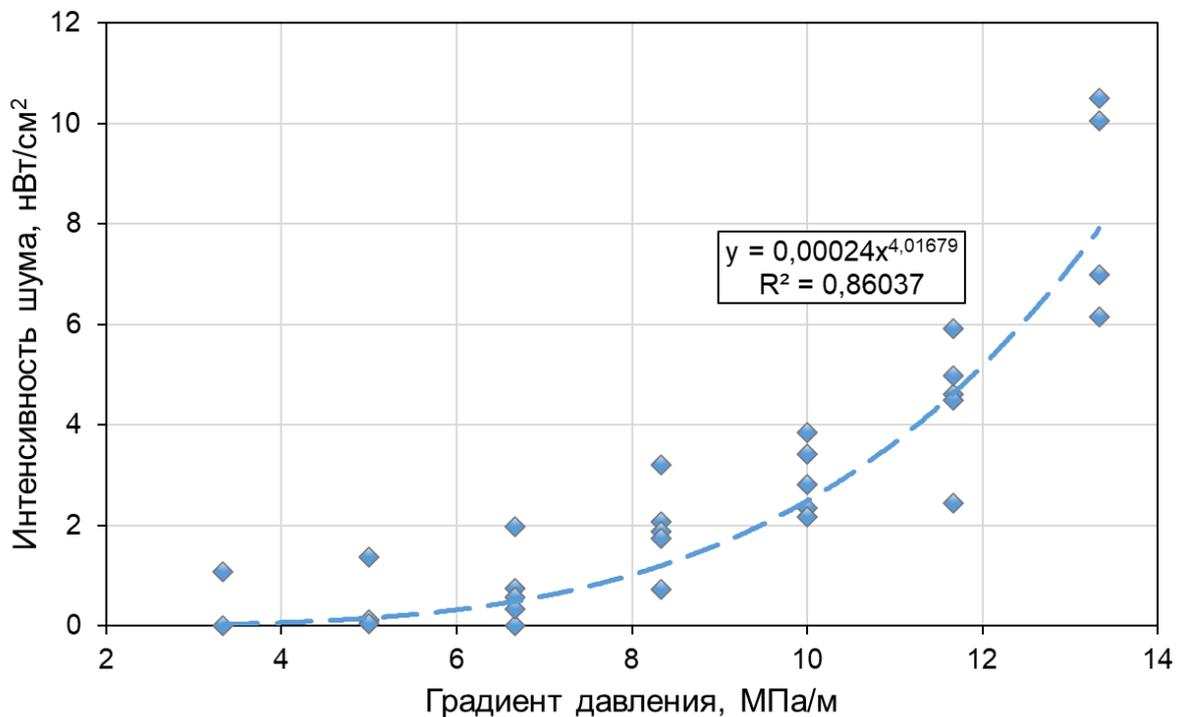


Рис. 4. Зависимость интенсивности шума фильтрации от градиента давления

### Заключение

В данной работе были исследованы акустические шумы, генерируемые потоком газа через образцы пористых сред. Эксперименты показали, что для карбонатных пород интегральная интенсивность шумов фильтрации зависит от градиента давления,

причем данная зависимость описывается степенной функцией с показателем 4. Это подтверждает гипотезу о квадратичной зависимости амплитуды акустических колебаний от скорости фильтрации. Важным результатом является то, что при одинаковых значениях скорости фильтрации образцы с более низкой проницаемостью и пористостью демонстрируют более высокую интенсивность шума. Эти данные помогают глубже понять механизмы формирования фильтрационного шума в пористых материалах. Также было выявлено, что увеличение проницаемости и пористости образца способствует снижению интенсивности генерируемого шума. Полученные результаты могут быть полезны при анализе акустических данных, получаемых с помощью скважинных шумомеров, и имеют важное значение для совершенствования методов мониторинга фильтрационных процессов в природных и инженерных системах [22]. В дальнейшем предполагается расширение экспериментов для более детальной проработки зависимости акустических характеристик от различных физических свойств образцов.

### Благодарности

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан» (соглашение №71/2024-ПД).

### Список литературы

1. Кузнецов Ю.И. Акустический каротаж как возможный метод исследования трещиноватости горных пород / Ю. И. Кузнецов // Каротажник. – 2017. – № 2(272). – С. 95-107.
2. Ройтер М. Акустический шум угольного пласта как показатель геодинамического состояния очистного забоя / М. Ройтер, М. Крах, У. Кислинг, Ю. А. Векслер // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 1. – С. 23-30.
3. Дрягин В.В. Каротаж акустической эмиссии в цикле повышения нефтеотдачи и контроля источников обводнения месторождения / В. В. Дрягин, Д. Б. Иванов, И. А. Черных, А. В. Шумилов // Каротажник. – 2014. – № 10(244). – С. 57-64.
4. Патент № 2787265 Российская Федерация, МПК G01V 1/40, G01V 1/48, E21B 47/107. Способ скважинной акустической шумометрии: № 2021139958: заявл. 30.12.2021; опубл. 09.01.2023 / Софронов И. Л., Михайлов Д. Н.; заявитель Шлюмберже Текнолоджи Б.В. – 22 с. – Текст: непосредственный.
5. Ovchinnikov M.N. Acoustic control of hydrodynamic flows in wells / M. N. Ovchinnikov, F. F. Karimov, A. S. Nikolaev // Georesources. – 2001. – №1. – P. 31–32.
6. Морозова К.Г. Связь состояния сдвиговой трещины в гранулированном материале и акустоэмиссионных и деформационных данных / К. Г. Морозова, А. А. Остапчук // Акустический журнал. – 2022. – Т. 68, № 5. – С. 543-549.
7. Дрягин В.В. Сейсмоакустическая эмиссия нефтепродуктивного пласта / В. В. Дрягин // Акустический журнал. – 2013. – Т. 59, № 6. – С. 744-751.
8. Лавров А.В. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) / А. В. Лавров, В. Л. Шкурятник // Акустический журнал. – 2005. – Т. 51, № 7. – С. 6-18.

9. Michlmayr G. Sources and characteristics of acoustic emissions from mechanically stressed geologic granular media - A review / G. Michlmayr, D. Cohen, D. Or // *Earth-Science Reviews*. – 2012. – Vol. 112, N (3-4). – P. 97-114.
10. Марфин Е.А. Акустическая эмиссия при фильтрации флюидов в пористых средах / Е. А. Марфин, М. Н. Овчинников // *Петрофизика сложных коллекторов: проблемы и перспективы: Альманах*. – М.: ООО «ЕАГЕ Геомодель», 2022. – С. 102-125.
11. Яруллин Р.К. Исследование факторов, определяющих амплитудно-частотные характеристики акустических шумов при проведении геофизических исследований / Р. К. Яруллин, Р. А. Валиуллин, А. Р. Яруллин [и др.] // *ПРОнефть. Профессионально о нефти*. – 2021. – Т. 6, № 2. – С. 20-27.
12. Nikolaev S.A. Sound Generation by a Filtrational Flow in Porous Media / S. A. Nikolaev, M. N. Ovchinnikov // *Akusticheskiy Zhurnal*. – 1992. – Vol. 38. № 1. – P. 114-118.
13. Марфин Е.А. Численные и экспериментальные исследования генерации звука в струйном осцилляторе Гельмгольца с целевой камерой / Е. А. Марфин, А. А. Абдрашитов // *Noise Theory and Practice*. – 2023. – Т. 9, № 3(34). – С. 7-17.
14. Ипатов А.И. Исследование амплитудно-частотных спектров сигналов акустического и электромагнитного шума при фильтрации флюидов в породах / А. И. Ипатов, А. В. Городнов, С. И. Ипатов [и др.] // *Геофизика*. – 2004. – № 2. – С. 25-30.
15. Иванова Э.А. Резонансы внутри ансамбля пор как возможная модель формирования спектра акустического излучения при фильтрации газа через пористые среды / Э. А. Иванова, Д. Н. Михайлов // *Ученые записки физического факультета Московского университета*. – 2017. – Т. 5. – 1750805.
16. Sergeev S. Laboratory investigation of sound induced by gas flow in porous media / S. Sergeev, N. Ryzhikov, D. Mikhailov // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 172. – P. 654-661.
17. Лебедев А.В. Численное моделирование шума фильтрации / А. В. Лебедев // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. – 2020. – Т. 63, № 2. – С. 155-171.
18. Лебедев А.В. Сравнение теории с результатами измерений шума фильтрации флюида в пористой среде / А. В. Лебедев // *Акустический журнал*. – 2022. – Т. 68, № 5. – С. 530-542.
19. Метелев И.С. Исследование акустических шумов при фильтрации газа через пористую среду / И. С. Метелев, М. Н. Овчинников, Е. А. Марфин [и др.] // *Акустический журнал*. – 2019. – Т. 65, № 2. – С. 214-222.
20. Лебедев А.В. Экспериментальное исследование медленной релаксации скорости звука в карбонатной горной породе / А. В. Лебедев, С. А. Манаков // *Акустический журнал*. – 2024. – Т. 70, № 2. – С. 253-272.
21. Марфин Е.А. Анализ спектральных характеристик фильтрационных шумов в образцах карбонатных пород / Е. А. Марфин, М. Н. Овчинников // *Карбонатные отложения 2024: [Электронный ресурс]: сборник тезисов Международной научно-практической конференции – Текстовое (символьное) электронное издание*. – Новокузнецк: Издательство «Знание-М», 2024.
22. Патент № 2788999 Российская Федерация, МПК E21B 47/10, G01V 1/50. Способ выявления интервалов притока и поглощения флюидов в работающих нефтегазовых скважинах: № 2022120861: заявл. 29.07.2022: опубл. 26.01.2023 / Михайлов Д. Н., Софронов И. Л., Сушина М. Р., Колодезева Е. Д.; заявитель Шлюмберже Текнолоджи Б.В. – 25 с. – Текст: непосредственный.

## References

1. Kuznetsov Yu.I. Acoustic logging as a possible method for studying rock fracturing / Yu. I. Kuznetsov // *Karotazhnik*. – 2017. – No. 2 (272). – P. 95-107.
2. Reuter M. Acoustic noise of a coal seam as an indicator of the geodynamic state of a production face / M. Reuter, M. Krakh, U. Kisling, Yu. A. Veksler // *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh*. – 2022. – No. 1. – P. 23-30.
3. Dryagin V.V. Acoustic emission logging in the cycle of enhanced oil recovery and control of field flooding sources / V. V. Dryagin, D. B. Ivanov, I. A. Chernykh, A. V. Shumilov // *Karotazhnik*. – 2014. – No. 10(244). – P. 57-64.
4. Patent No. 2787265 Russian Federation, IPC G01V 1/40, G01V 1/48, E21B 47/107. Method for borehole acoustic noise logging: No. 2021139958: declared 30.12.2021: published 09.01.2023 / Sofronov I. L., Mikhailov D. N.; zayavitel' SHlyumberzhe Teknologzhi B.V. – 22 c. – Tekst: neposredstvennyj.
5. Ovchinnikov M.N. Acoustic control of hydrodynamic flows in wells / M. N. Ovchinnikov, F. F. Karimov, A. S. Nikolaev // *Georesources*. – 2001. – №1. – P. 31–32.
6. Morozova K.G. Relationship between the state of a shear crack in a granular material and acoustic emission and deformation data / K. G. Morozova, A. A. Ostapchuk // *Akusticheskij Zhurnal*. – 2022. – Vol. 68, No. 5. – P. 543–549.
7. Dryagin V.V. Seismoacoustic emission of an oil-producing formation / V. V. Dryagin // *Akusticheskij Zhurnal*. – 2013. – Vol. 59, No. 6. – P. 744–751.
8. Lavrov A.V. Acoustic emission during deformation and failure of rocks (review) / A. V. Lavrov, V. L. Shkuratnik // *Akusticheskij Zhurnal*. – 2005. – Vol. 51, No. 7. – P. 6-18.
9. Michlmayr G. Sources and characteristics of acoustic emissions from mechanically stressed geologic granular media - A review / G. Michlmayr, D. Cohen, D. Or // *Earth-Science Reviews*. – 2012. – Vol. 112, N (3-4). –P. 97-114.
10. Marfin E.A. Acoustic emission during fluid filtration in porous media / E. A. Marfin, M. N. Ovchinnikov // *Petrofizika slozhnyh kollektorov: problemy i perspektivy: Al'manah*. – M.: OOO «EAGE Geomodel», 2022. – P. 102-125.
11. Yarullin R.K. Study of factors determining amplitude-frequency characteristics of acoustic noise during geophysical surveys / R. K. Yarullin, R. A. Valiullin, A. R. Yarullin [et al.] // *PROneft'. Professional'no o nefti*. – 2021. – Vol. 6, No. 2. – P. 20-27.
12. Nikolaev S.A. Sound Generation by a Filtrational Flow in Porous Media / S. A. Nikolaev, M. N. Ovchinnikov // *Akusticheskij Zhurnal*. – 1992. – Vol. 38. No. 1. – P. 114-118.
13. Marfin E.A. Numerical and experimental studies of sound generation in a Helmholtz jet oscillator with a slit chamber / E. A. Marfin, A. A. Abdrashitov // *Noise Theory and Practice*. – 2023. – Vol. 9, No. 3 (34). – P. 7-17.
14. Ipatov A.I. Study of amplitude-frequency spectra of acoustic and electromagnetic noise signals during fluid filtration in rocks / A. I. Ipatov, A. V. Gorodnov, S. I. Ipatov [et al.] // *Geophysics*. – 2004. – No. 2. – P. 25-30.
15. Ivanova E.A. Resonances within a pore ensemble as a possible model for the formation of an acoustic radiation spectrum during gas filtration through porous media / E. A. Ivanova, D. N. Mikhailov // *Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo universiteta*. – 2017. – Vol. 5. – 1750805.
16. Sergeev S. Laboratory investigation of sound induced by gas flow in porous media / S. Sergeev, N. Ryzhikov, D. Mikhailov // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 172. – P. 654-661.
17. Lebedev A.V. Numerical modeling of filtration noise / A. V. Lebedev // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Radiofizika*. – 2020. – Vol. 63, No. 2. – P. 155-171.
18. Lebedev A.V. Comparison of theory with measurement results of fluid filtration

noise in a porous medium / A. V. Lebedev // Akusticheskij Zhurnal. – 2022. – Vol. 68, No. 5. – P. 530-542.

19. Metelev I.S. Study of acoustic noise during gas filtration through a porous medium / I.S. Metelev, M.N. Ovchinnikov, E.A. Marfin [et al.] // Akusticheskij Zhurnal. – 2019. – Vol. 65, No. 2. – P. 214-222.

20. Lebedev A.V. Experimental study of slow relaxation of sound speed in carbonate rock / A.V. Lebedev, S.A. Manakov // Akusticheskij Zhurnal. – 2024. – Vol. 70, No. 2. – P. 253-272.

21. Marfin E.A. Analysis of spectral characteristics of filtration noise in carbonate rock samples / E. A. Marfin, M. N. Ovchinnikov // Karbonatnye otlozheniya 2024: [Elektronnyj resurs]: sbornik tezisov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii – Tekstovoe (simvol'noe) elektronnoe izdanie. – Novokuzneck: Izdatel'stvo «Znanie-M», 2024.

22. Patent No. 2788999 Russian Federation, IPC E21B 47/10, G01V 1/50. Method for identifying intervals of fluid inflow and absorption in operating oil and gas wells: No. 2022120861: declared 07/29/2022: published 01/26/2023 / Mikhailov D. N., Sofronov I. L., Sushina M. R., Kolodezeva E. D.; zayavitel' SHlyumberzhe Teknologzhi B.V. – 25 s. – Tekst: neposredstvennyj.

УДК: 534.13  
OECD: 2.03 PU

## Уменьшение вибрации и шумоизлучения пластины армированным вибропоглощающим покрытием на основе полимерной пленки

Кирпичников В.Ю.<sup>1</sup>, Смольников В.Ю.<sup>2</sup>, Кудаев А.В.<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Д.т.н., профессор, профессор кафедры «Экология и производственная безопасность»,

<sup>2</sup>Инженер 1-й категории, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,

<sup>3</sup>К.т.н., доцент, доцент кафедры «Экология и производственная безопасность»,

<sup>1,3</sup>Балтийский Государственный Технический Университет

«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,

<sup>1,2,3</sup> г. Санкт-Петербург, РФ

### Аннотация

Объектом является пластина (крышка) малогабаритного шумозаглушающего кожуха. Выполнено экспериментальное и расчетное определение эффективностей уменьшения вибрации и шумоизлучения пластины установленным на ее внешнюю поверхность армированным вибропоглощающим покрытием (АВП) на основе полимерной пленки. Для этого выбраны измеренные частотные спектры вибрации и шумоизлучения пластины при отсутствии и наличии покрытия, а также оценки его эффективностей. Результатом являются полученные экспериментальные и расчетные величины эффективностей уменьшения уровней вибрации и шумоизлучения пластины покрытием при пространственном (громкоговоритель) и сосредоточенном (вибромолоток) возбуждении пластины. Представлено сравнение величин эффективностей уменьшения вибрации и шумоизлучения пластины двумя вариантами АВП. Приведены формулы для выполнения оценок величин эффективностей АВП.

**Ключевые слова:** кожух, пластина, вибрация, шумоизлучение, армированное вибропоглощающее покрытие, эффективности, измерение, расчетная оценка.

## *Reduction of vibration and noise emission of the plate with a reinforced vibration-absorbing coating based on a polymer film*

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

*<sup>1</sup>DSc, Professor, Professor of the Department 'Ecology and industrial safety',*

*<sup>2</sup>1st category engineer, Federal State Unitary Enterprise 'Krylovsky State Scientific Center',*

*<sup>3</sup>PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department 'Ecology and industrial safety',*

*<sup>1,3</sup>Baltic State Technical University 'VOENMEH',*

*<sup>1,2,3</sup>St. Petersburg, Russia*

### Abstract

The object is a plate (cover) of a small-sized noise-attenuating casing. An experimental and computational determination of the effectiveness of reducing vibration and noise emission of a plate by installing a reinforced vibration-absorbing coating (VAC) based on a polymer film installed on its outer surface was carried out. For this purpose, the measured frequency spectra of vibration and noise emission of the plate were selected in the absence and presence of a coating, as well as estimates of its effectiveness. The result is the obtained experimental and calculated values of the efficiency of reducing the levels of vibration and

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

noise emission of the plate by the coating during spatial (loudspeaker) and concentrated (vibrating hammer) excitation of the plate. A comparison of the efficiency values of reducing vibration and noise emission of a plate by two VAC options is presented. Formulas are given for estimating the efficiency values of VAC.

**Keywords:** casing, plate, vibration, noise emission, reinforced vibration-absorbing coating, efficiency, measurement, calculation estimate.

## Введение

Одним из основных средств уменьшения уровней вибрации и шумоизлучения различного рода инженерных конструкций являются вибропоглощающие покрытия (ВПП). Применяют преимущественно три типа ВПП: мягкие, жесткие и армированные. Покрытия отличаются друг от друга конструктивным оформлением, а также инерционно-жесткостными параметрами вибропоглощающего вязкоупругого материала и его неодинаковой деформацией [1].

В последние годы все большее применение находят армированные вибропоглощающие покрытия (АВП) на основе поливинилацетата [2,3]. Согласно результатам многочисленных измерений эти покрытия даже при малых толщине и массе эффективно демпфируют конструкции в широком диапазоне частот их изгибных колебаний.

Несмотря на то, что АВП с диссипативным слоем из указанного материала чаще используются для уменьшения уровней шумоизлучения конструкций, а не их вибрации, опубликованные материалы с результатами эффективности этих средств по уменьшению уровней как вибрации, так и излучения конструкций в окружающую среду до настоящего времени отсутствуют.

Вместе с тем актуальность соответствующих исследований очевидна. Действительно, подобные АВП являются высокоэффективными и малогабаритными средствами уменьшения вибрации конструкций, порождающей их шумоизлучение, в диапазоне низких и средних звуковых частот, на которых другие существующие средства вибро- и звукопоглощения при много бóльших толщине и массе не работают или имеют значительно меньшую эффективность. На отсутствие и малую эффективность существующих ВПП по уменьшению уровней шумоизлучения пластинчатой конструкции, эффективно уменьшающих уровни ее вибрации на частотах меньших частоты совпадения, указывалось, например, в работе [4].

Целью настоящей работы является исследование эффективностей уменьшения различными вариантами АВП уровней как вибрации, так и шумоизлучения крышки шумозаглушающего кожуха, являющейся согласно экспериментальным исследованиям его основным конструктивным излучающим элементом.

## 1. Экспериментальная установка. Средства уменьшения вибрации и шума

Экспериментальные исследования выполнялись с использованием кожуха (рис. 1), корпус которого изготовлен из стальных уголков ( $20 \times 20 \times 1,5$  мм) и закрепленных на них стальных пластин. Размеры в плане пластин боковых стенок кожуха равняются  $0,3 \times 0,5$  м, а дна и крышки –  $0,5 \times 0,5$  м. Толщина пластин стенок и дна составляет 2 мм, а крышки – 1 мм. Каждая пластина стенок подкреплена пятью вертикальными ( $4 \times 40$  мм) и одним горизонтальным ( $4 \times 60$  мм) прямоугольными ребрами жесткости, а пластина дна – тремя стальными уголками ранее указанного размера и перекрестным

ребром жесткости с размерами поперечного сечения  $4 \times 60$  мм.

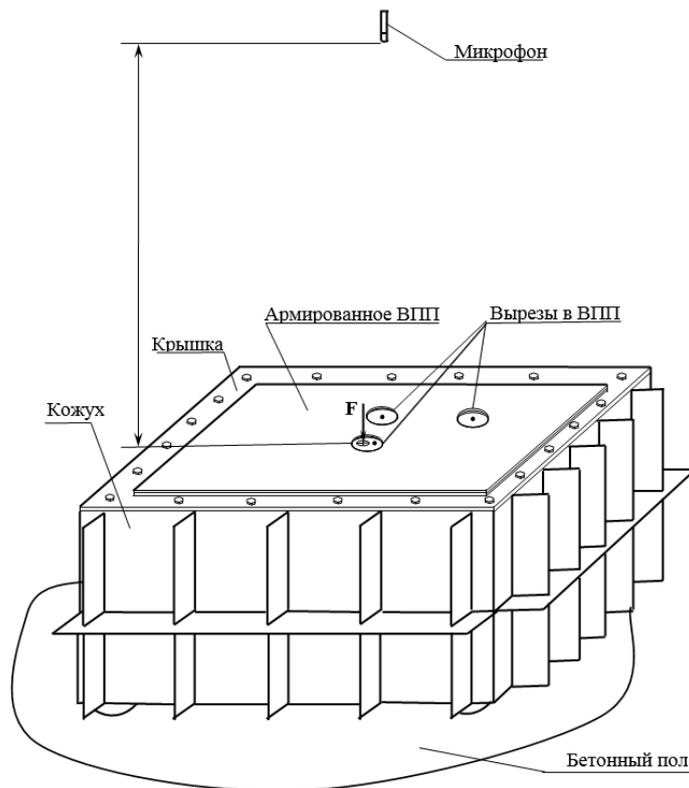


Рис. 1. Схема расположения точек измерения вибрации и звукового давления крышки кожуха

Влияние шумоизлучения стенок и дна на уровни звукового давления над крышкой было исключено внедрением нескольких противошумовых мероприятий. Пластины облицовывались изнутри армированным вибропоглощающим покрытием, состоящим из диссипативного слоя пористой резины толщиной 10 мм и стального листа толщиной 1 мм. На стальные листы АВП был установлен звукопоглощающий материал толщиной 30 мм с плотностью порядка  $40 \text{ кг/м}^3$ .

Для уменьшения возможного вибровозбуждения и последующего шумоизлучения бетонного пола кожух был установлен на четырёх амортизаторах с собственной частотой вертикальных колебаний при номинальной нагрузке  $\sim 20$  Гц.

Источниками вибрации и шумоизлучения крышки – основного излучателя шума, снижающего эффективность кожуха, – последовательно являлись громкоговоритель (пространственное возбуждение) с диаметром рупора 360 мм и миниатюрный вибромолоток (сосредоточенное возбуждение).

Плоскость рупора громкоговорителя располагалась от крышки на расстоянии  $\sim 130$  мм, а его ось совпадала с нормалью к поверхности крышки, проведенной из ее геометрического центра (ГЦ).

Ударное возбуждение крышки миниатюрным вибромолотком осуществлялось в ее ГЦ, а также в точках, находящихся на одинаковом кратчайшем расстоянии от ГЦ и одной из кромок, а также от ГЦ и одного из углов крышки. Над соответствующими точками возбуждения и измерения вибрации крышки в наносимых на нее покрытиях выполнялись отверстия диаметром 10 мм.

Измерения уровней шумоизлучения (звуковых давлений) крышки выполнялись в точках на нормали, проведенной из геометрического центра крышки, с расстояниями 0,5

и 1,0 м от ее поверхности.

Последовательно испытывались два типа АВП на внешней поверхности крышки кожуха, отличающихся толщиной стального армирующего листа, равной 0,18 мм (АВП1) и 0,56 мм (АВП2). В обоих покрытиях диссипативным слоем была полимерная пленка ВПС-2,5 из поливинилацетата толщиной 0,5 мм с лучшими вибродемпфирующими свойствами в диапазоне температур примерно от 10 до 30°C. Температура в лабораторном помещении, где проводились испытания, равнялась ~25°C. Масса АВП1 и АВП2 составляла примерно 15 и 35% массы крышки соответственно.

## 2. Результаты экспериментального определения эффективностей АВП

На начальном этапе измерений определялись вибрационные характеристики крышки при ее закреплении на корпусе кожуха.

При возбуждении как вибромолотком, так и громкоговорителем частота низшего максимума в спектрах вибровозбудимости  $A/F$ , дБ, и вибрации  $A$ , дБ, крышки была равной ~54 Гц (рис. 2).

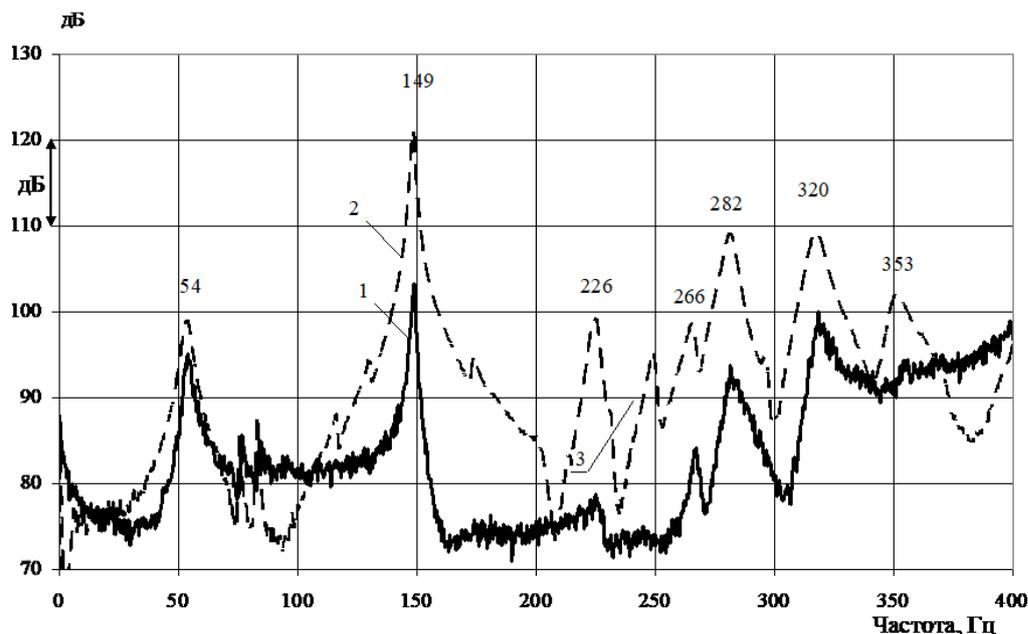


Рис. 2. Спектры входной вибровозбудимости при ударах вибромолотком (1) и вибрации при работе громкоговорителя (2) крышки в геометрическом центре

Наибольшие уровни  $A/F$ , дБ, и  $A$ , дБ, были зарегистрированы на частоте 149 Гц. С высокой вероятностью именно на ней имело место совместное возникновение резонансных явлений при колебаниях крышки и воздушного объема кожуха.

Экспериментально-расчетная оценка коэффициента потерь  $\eta$  колебательной энергии в крышке проводилась с использованием формулы:

$$\eta = \Delta f_p / f_p, \quad (1)$$

где  $\Delta f_p$  – ширина максимума на частоте  $f_p$  в спектрах входной вибровозбудимости или вибрации на уровне -3 дБ от его наибольшего уровня.

Определялись средние значения  $\eta$  по двадцати и тринадцати наиболее интенсивным максимумам в вибрационных спектрах  $A/F$  и  $A$ , соответственно, в

трех точках измерения. Их величины при возбуждении крышки вибромолотком и громкоговорителем оказались равными 0,030 и 0,034 соответственно.

Последовательная облицовка наружной поверхности крышки приводила к уменьшению уровней как ее вибрационных характеристик, так и шумоизлучения. В качестве примера на рис. 3 приведены узкополосные спектры  $A/F$ , дБ, в Гц возбуждаемой вибромолотком крышки при отсутствии (кривая 1) и наличии (кривая 2) на ней покрытия АВП2.

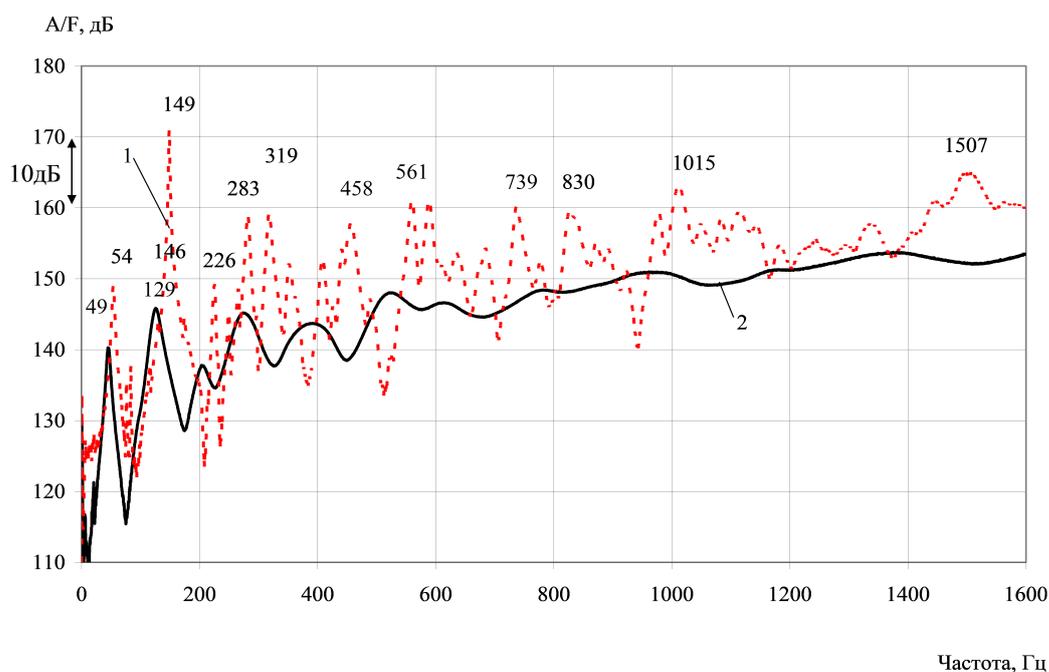


Рис. 3. Узкополосные спектры входной вибровозбудимости в Гц крышки, возбуждаемой вибромолотком, при отсутствии (1) и наличии (2) АВП2

Анализ показал, что средние по частотам и точкам измерения величины уменьшения покрытиями уровней вибрации  $\mathcal{E}_B$  двадцати наиболее интенсивных максимумов в спектрах входной и переходной вибровозбудимости  $A/F$ , дБ, крышки при ее возбуждении вибромолотком равняются 12 дБ (АВП1) и 17 дБ (АВП2).

Аналогичные средние значения эффективности  $\mathcal{E}_B$  покрытий, определенные по величинам уменьшения уровней вибрации тринадцати наиболее интенсивных максимумов в спектрах вибрации крышки, измеренной в трех точках при возбуждении громкоговорителем, составили 10 дБ (АВП1) и 14 дБ (АВП2).

Эффективность уменьшения покрытиями уровней шумоизлучения  $\mathcal{E}_Ш$ , дБ, крышки при ударах вибромолотком определялась при ее возбуждении в каждой из трех ранее указанных точек. Усредненная по тринадцати наиболее интенсивным максимумам в спектрах шумоизлучения и двум точкам измерения уровней звукового давления эффективность  $\mathcal{E}_Ш$  покрытий составила 9 дБ (АВП1) и 12 дБ (АВП2). Средние значения эффективности  $\mathcal{E}_Ш$  покрытий при работе громкоговорителя, определенные по шести наиболее выраженным максимумам в спектрах шумоизлучения крышки и точкам измерения, оказались равными 5 дБ (АВП1) и 7 дБ (АВП2).

Все полученные значения эффективности шумозаглушения  $\mathcal{E}_Ш$  были меньше ранее приведенных значений уменьшения вибровозбудимости  $\mathcal{E}_B$ . Соответствующая разница при возбуждении крышки вибромолотком составила 3 дБ (АВП1) и 5 дБ (АВП2), а при работе громкоговорителя – 5 дБ (АВП1) и 7 дБ (АВП2).

Учитывая практическую важность акустических характеристик шумозаглушающих кожухов не только в узких, но и в более широких частотных полосах, были выполнены измерения уровней шумоизлучения крышки при отсутствии и наличии покрытий в третьоктавных полосах частот. Соответствующие частотные зависимости их эффективности шумозаглушения  $\mathcal{E}_{\text{ш}}$  в диапазоне от 40 до 1250 Гц, определенной на расстоянии 1 м от крышки при работе громкоговорителя, приведены на рис. 4.

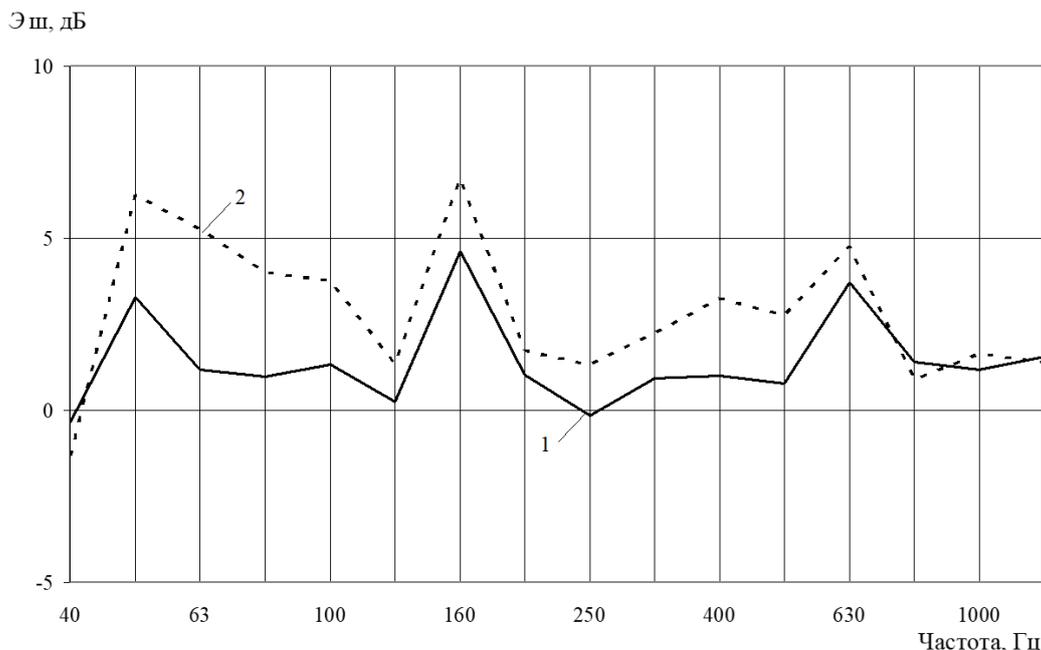


Рис. 4. Эффективность уменьшения третьоктавных уровней шумоизлучения крышки покрытиями АВП1 (1) и АВП2 (2) при работе громкоговорителя

Средние по третьоктавным полосам значения эффективности уменьшения уровней шумоизлучения крышки покрытиями составили  $\sim 2$  дБ (АВП1) и 3 дБ (АВП2). В полосах со среднегеометрическими частотами 50, 160 и 630 Гц, содержащими наиболее интенсивные максимумы уровней звукового давления, эффективность покрытий находится в пределах от 3 до 7 дБ.

### 3. Расчетная оценка эффективностей покрытий

Экспериментальные значения эффективностей уменьшения покрытиями уровней максимумов в спектрах вибрации  $\mathcal{E}_V$  и шумоизлучения  $\mathcal{E}_{\text{ш}}$  крышки были сопоставлены с их расчетными величинами.

Эффективность снижения вибраций  $\mathcal{E}_V$  покрытием определялись по формуле [5]:

$$\mathcal{E}_V = 20 \lg(\mu/4,5) - 20 \lg(\eta/\eta_0) + 23, \text{ дБ}, \quad (2)$$

где  $\mu$  — относительная масса покрытия в процентах к массе демфируемой крышки;  $\eta$  — значение коэффициента внутренних потерь колебательной энергии крышки при отсутствии покрытия ( $\eta$  принималось равным 0,032 — среднему по двум вариантам возбуждения крышки значению);  $\eta_0 = 0,003$ . (Формула справедлива при  $\mu > 4,5$ ). Расчетные значения эффективности  $\mathcal{E}_V$  покрытий составили 13 дБ (АВП1) и 20 дБ (АВП2).

Оба приведенных значения оказались близкими к их средним по частотам и точкам измерения величинам, находящимся при обоих вариантах возбуждения крышки

в пределах от 10 до 12 дБ (АВП1) и от 14 до 17 дБ (АВП2).

Вычисление величин эффективности АВП по уменьшению резонансных максимумов в спектрах шумоизлучения  $\mathcal{E}_{\text{ш}}$ , дБ, крышки выполнялось с использованием приближенной формулы, учитывающей снижение мощности шумоизлучения крышки за счет увеличения покрытием ее массы и потерь колебательной энергии [4]:

$$\mathcal{E}_{\text{ш}} = 20 \lg \left( \frac{\eta + \eta_{\text{И}}}{\eta_0 + \eta_{\text{И}0}} \right) + 20 \lg \frac{m}{m_0}, \text{ дБ}, \quad (3)$$

Сугубо ориентировочные величины  $\eta_{\text{И}}$  и  $\eta_{\text{И}0}$  характеризуют потери энергии крышки на шумоизлучение при наличии и отсутствии покрытия. При выполнении расчетной оценки  $\mathcal{E}_{\text{ш}}$ , дБ, использовались приближенные формулы  $\eta_{\text{И}} = \rho c / \omega t$  и  $\eta_{\text{И}0} = \rho c / \omega t_0$  ( $\rho c$  – акустическое сопротивление воздуха;  $\omega = 2\pi f$ ;  $t$  и  $t_0$  – масса единицы поверхности крышки при наличии, 9 кг/м<sup>2</sup> (АВП1), 10,5 кг/м<sup>2</sup> (АВП2) и отсутствии, 7,8 кг/м<sup>2</sup>, покрытия). Значения коэффициента потерь пластины при отсутствии ( $\eta_0$ ) и наличии ( $\eta$ ) покрытия принимались равными их усредненным измеренным величинам 0,032 и 0,11 (АВП1), 0,15 (АВП2).

Частотные характеристики расчетных и экспериментальных значений эффективности шумозаглушения  $\mathcal{E}_{\text{ш}}$ , дБ, покрытий АВП1 и АВП2 приведены на рис. 5 и 6. Точками на рисунках указаны экспериментальные значения. Согласование расчетных и экспериментальных данных на большинстве частот, учитывая приближенность оценок, можно считать удовлетворительным. Исключением является частота 149 Гц с наибольшим уровнем вибровозбудимости крышки при ударах по ней вибромолотком.

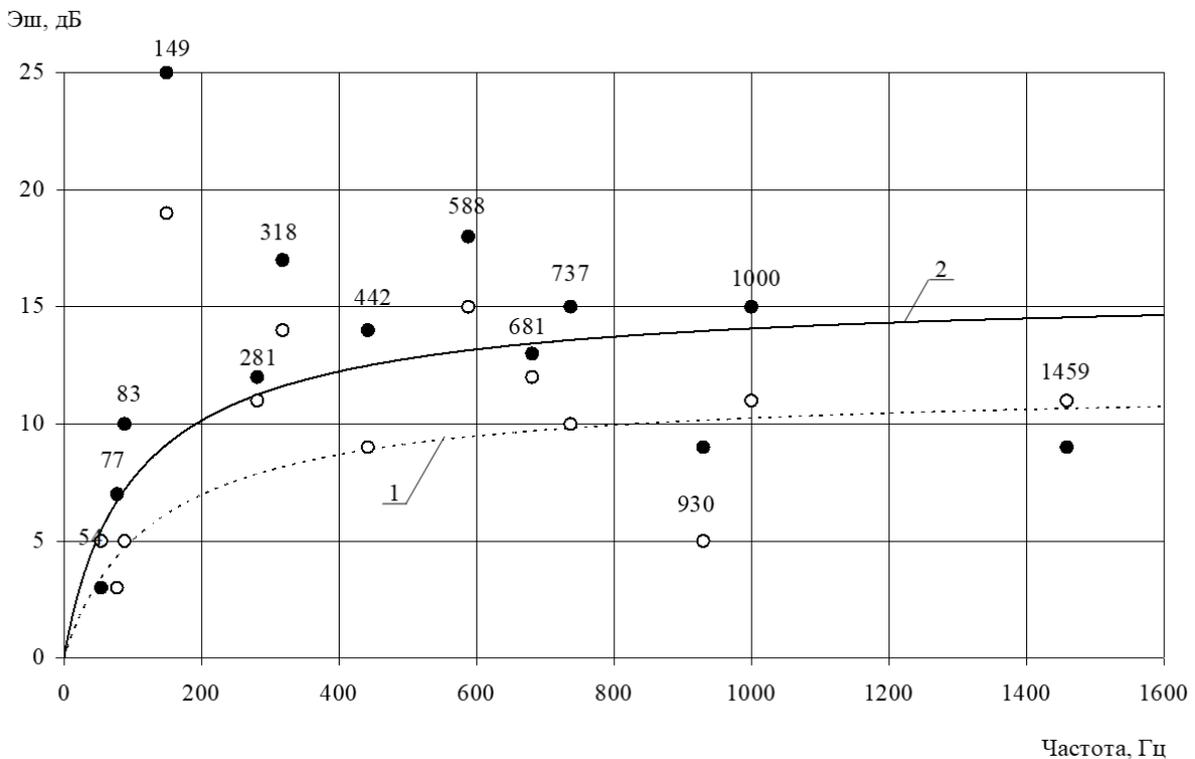


Рис. 5. Эффективность уменьшения уровней узкополосных максимумов в спектрах шумоизлучения крышки покрытиями АВП1 (○, кривая 1) и АВП2 (●, кривая 2) при ее возбуждении вибромолотком в геометрическом центре

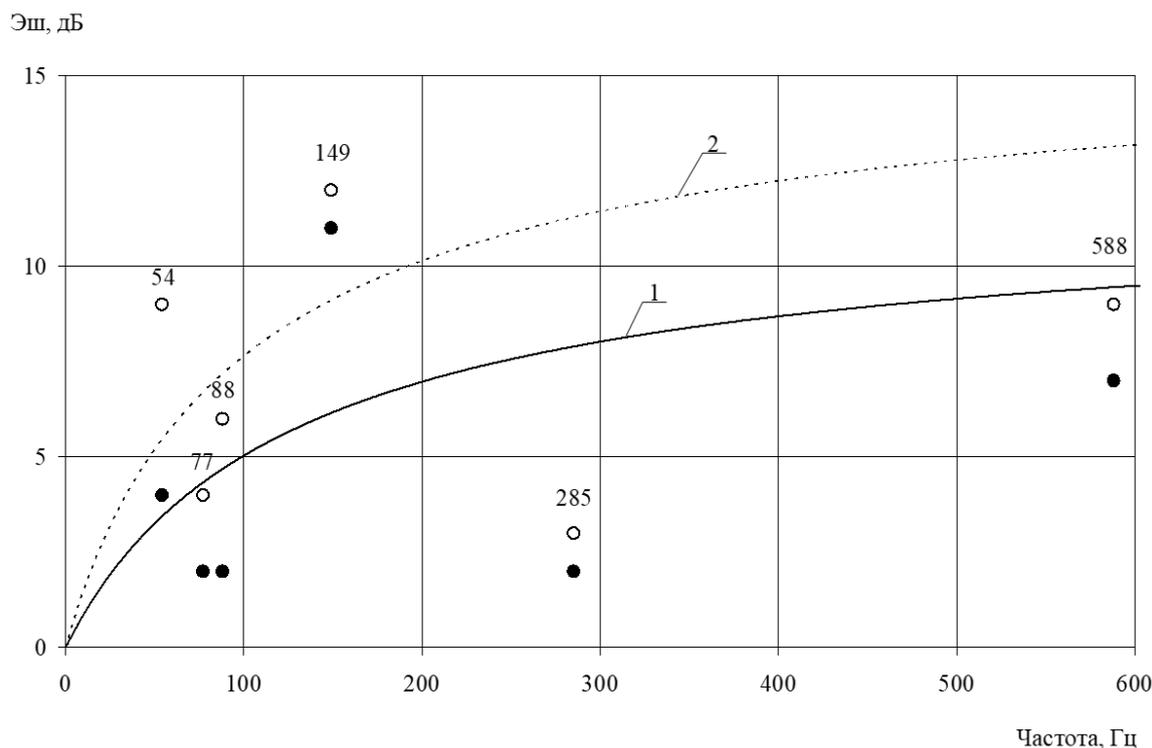


Рис. 6. Эффективность уменьшения уровней узкополосных максимумов в спектрах шумоизлучения крышки покрытиями АВП1 (●, кривая 1) и АВП2 (○, кривая 2) при работе громкоговорителя

## Заключение

К основным результатам работы отнесем следующие:

- выполнено экспериментальное определение эффективностей уменьшения уровней вибрации  $\mathcal{E}_B$  и шумозаглушения  $\mathcal{E}_\Pi$  крышки малогабаритного шумозаглушающего кожуха двумя последовательно устанавливаемыми вариантами армированного вибропоглощающего покрытия на основе полимерной пленки из поливинилацетата;

- получены средние по частотам и точкам измерения значения  $\mathcal{E}_B$  и  $\mathcal{E}_\Pi$  покрытий при сосредоточенном (вибромолоток) и пространственном (громкоговоритель) возбуждении крышки;

- показано, что при обеих нагрузках эффективность покрытий по уменьшению вибрации крышки превосходит их эффективность по уменьшению ее шумоизлучения;

- проведено сравнение средних экспериментальных значений  $\mathcal{E}_B$  и  $\mathcal{E}_\Pi$  с их оценочными величинами и установлено удовлетворительное согласование экспериментальных и расчетных данных.

Содержащиеся в статье результаты могут быть использованы при разработке и практическом применении армированных вибропоглощающих покрытий на основе поливинилацетата для эффективного уменьшения низкочастотных уровней вибрации и шумоизлучения инженерных пластинчатых конструкций различных видов транспорта.

### Список литературы

1. Никифоров А.С. Акустическое проектирование судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1990.
2. Алексеев С.А., Сятковский А.И. Вибродемпфирующие свойства полимерных пленок // Судостроение. 2015. № 6. С. 45–46.
3. Кирпичников В.Ю., Сятковский А.И., Шашурин А.Е., Кудаев А.В. Экспериментальные исследования эффективности вибропоглощающего покрытия с металлическим армирующим слоем различной толщины. *Noise Theory and Practice*. 2022; 1 (8). С. 29-34.
4. Канаев Б.А., Тартаковский Б.Д. Об оценке эффективности вибропоглощающих покрытий по излучению в окружающую среду // Вопросы судостроения. Серия: акустика. ЦНИИ «Румб». 1984. С. 63–66.
5. Кирпичников В.Ю., Савенко В.В., Смольников В.Ю. Малогабаритные средства вибродемпфирования толстолистовой пластинчатой конструкции // Труды Крыловского государственного научного центра. 2024. Вып. 4 (410).

### References

1. Nikiforov A.S. Acoustic design of ship structures. Directory. L.: Shipbuilding, 1990.
2. Alekseev S.A., Syatkovsky A.I. Vibro-damping properties of polymer films // Shipbuilding. 2015. № 6. pp. 45–46.
3. Kirpichnikov V. Yu., Syatkovsky A.I., Shashurin A.E., Kudaev A.V. Experimental studies of the effectiveness of a vibration-absorbing coating with a metal reinforcing layer of various thickness. *Noise Theory and Practice*. 2022; 1 (8). pp. 29-34.
4. Kanaev B.A., Tartakovsky B.D. On assessing the effectiveness of vibration-absorbing coatings in terms of radiation into the environment // Questions of shipbuilding. Series: acoustics. Central Research Institute "Rumb". 1984. pp. 63–66.
5. Kirpichnikov V. Yu., Savenko V.V., Smolnikov V. Yu. Small-sized means of vibration damping of thick-sheet plate structures // Works of the Krylov State Scientific Center. 2024. Issue. 4 (410).

УДК: 004.8  
ОЕСД: 2.02

## Современные методы построения систем искусственного интеллекта для обработки аудиосигналов

Лестенко Н.А.<sup>1\*</sup>, Вальштейн К.В.<sup>2</sup>, Верховова А.А.<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>Преподаватель, <sup>2</sup>Старший преподаватель, <sup>3</sup>Магистрант,  
<sup>1,2,3</sup>Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»  
им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, Россия

### Аннотация

В данной статье рассматриваются различные подходы для обработки аудиосигнала, в том числе на базе технологий искусственного интеллекта для задач распознавания речи, детектирования объектов, генерации речи и шумоподавления. В статье рассматриваются классические математические методы обработки сигнала, такие как быстрое преобразование Фурье (БПФ), мел-кепстральные коэффициенты (MFCC) и дискретное вейвлет-преобразование (ДВП). Вместе с этим рассматриваются другие подходы к обработке аудиосигнала такие, как системы искусственного интеллекта для выделения признаков сигнала, использующие расширенные причинно-следственные сверточные слои при проектировании архитектуры ИНС, примером которых может быть WaveNet, а также более новую технологию – трансформеры, на которых базируются Whisper и Waveformer. Данная статья акцентирует внимание на переходе от традиционных методов к искусственным нейронным сетям с использованием технологии трансформеров и диффузионных моделей, а также приводит пример использования некоторых из рассматриваемых методов для решения различных задач.

**Ключевые слова:** искусственная нейронная сеть, быстрое преобразование Фурье, вейвлет-преобразование, мел-кепстральные коэффициенты, DCC, Whisper, обработка аудиосигналов.

## *Modern methods for building artificial intelligence systems for audio signal processing*

Lestenko N.A.<sup>1\*</sup>, Valshtein K.V.<sup>2</sup>, Verhova A.A.<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>Lecturer, <sup>2</sup>Senior Lecturer, <sup>3</sup>Master student,  
<sup>1,2,3</sup>Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia

### Abstract

This article explores various approaches to audio signal processing, including AI-based technologies for tasks such as speech recognition, object detection, speech generation, and noise suppression. The article covers classical mathematical signal processing methods such as the Fast Fourier Transform (FFT), Mel-frequency cepstral coefficients (MFCC), and discrete wavelet transform (DWT). Additionally, other approaches to audio signal processing are considered, such as artificial intelligence systems for feature extraction using dilated causal convolutional layers in neural network architecture design, exemplified by WaveNet, as well as more recent transformer-based technologies like Whisper and Waveformer. The article emphasizes the transition from traditional methods to artificial neural networks using transformer and diffusion model technologies, as well as demonstrating examples of successful using some of methods for different audio processing tasks.

---

\*E-mail: lazarev30\_12@mail.ru (Лестенко Н.А.)

**Keywords:** Artificial Neural Network, Fast Fourier Transform (FFT), Wavelet Transform, Mel-frequency Cepstral Coefficients (MFCC), Dilated Causal Convolution (DCC), Whisper, Audio Signal Processing.

## Введение

Технологии искусственного интеллекта (ИИ) активно внедряются в различные процессы уже на протяжении нескольких десятилетий. Всё это время они развивались, переходя от абстрактных теорий принятия решения и обработки данных к созданию сложных мультимодальных интеллектуальных систем. Широкую популярность обрели большие языковые модели (LLM) и диффузионные модели для создания и обработки изображений. Также существует множество моделей ИИ, использующихся для задач, связанных с обработкой аудио информации. Обзор современного состояния подобных моделей и будет представлен в данной статье.

Прежде чем перейти к обзору существующих моделей, следует кратко затронуть виды задач, связанные с обработкой аудио. К таким задачам можно отнести следующие:

- сигнала (преобразование аудиоинформации в иной формат, например – распознавание речи (STT, speech-to-text), либо построение карты помещения [1]);
- детектирование объектов (определение параметров и типа источника аудиосигнала, например – диаризация диктора [2]);
- генерация сигнала (преобразование текста в речь (TTS, text-to-speech), либо создание сигнала на основе полученной от пользователя информации, например – генерация музыки [3]);
- изменение параметров сигнала (обработка и нелинейная фильтрация существующего сигнала, например – выделение и удаление посторонних шумов [4]).

Конкретная задача диктует выбор метода предварительной обработки входного сигнала и ключевые моменты модели для работы с ним. Эти моменты и будут разобраны в данной статье.

### 1. Методы предобработки входного сигнала

Входной аудиосигнал как правило представляет собой дискретизированную последовательность амплитуд в каждый момент времени. Эти значения абстрактны и сложны для дальнейшей обработки, поэтому для многих задач выполняется дополнительный этап подготовки, заключающийся в выделении основных характеристик обрабатываемого сигнала. Обычно сигнал разбивается на пересекающиеся кадры фиксированной продолжительности, каждый из которых обрабатывается отдельно, при этом степень их пересечения выбирается таким образом, чтобы не допустить образования неполных кадров.

Конкретные методы получения дополнительной информации различаются в зависимости от задачи обработки сигнала. Классическим является алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ), однако он часто дополняется или заменяется иными инструментами. Так в статье [5] для задач, связанных с обработкой речи, показана эффективность мел-кепстральных коэффициентов – их использование позволило обработать и распознать речь в реальном времени. В статье [6] для обработки речи используется метод Residual Vector Quantization, который получает характеристики аудиосигнала в виде отдельных векторов, использование данного метода позволило достичь естественного звучания генерируемого речевого сигнала. В то же время в статье [7] показана эффективность вейвлет преобразований для решения различных

классов задач – в ней показано что вейвлет преобразования при меньшей вычислительной сложности оказываются столь же эффективны, как и БФТ или мел-кепстральные коэффициенты.

Некоторые из перечисленных методов следует рассмотреть подробнее для большего понимания структуры входного сигнала. Стоит начать с классического алгоритма быстрого преобразования Фурье.

В качестве примера будет использован специально записанный аудиофайл с речью и уличным шумом. Это позволит продемонстрировать эффекты от применения различных методов предобработки сигнала. Общий вид исследуемого сигнала показан на рисунке 1. Следует заметить, что была проведена нормализация амплитуды сигнала с целью удобства обработки. Для построения изображений сигнала с использованием классических методов предобработки была написана отдельная программа на языке Python.

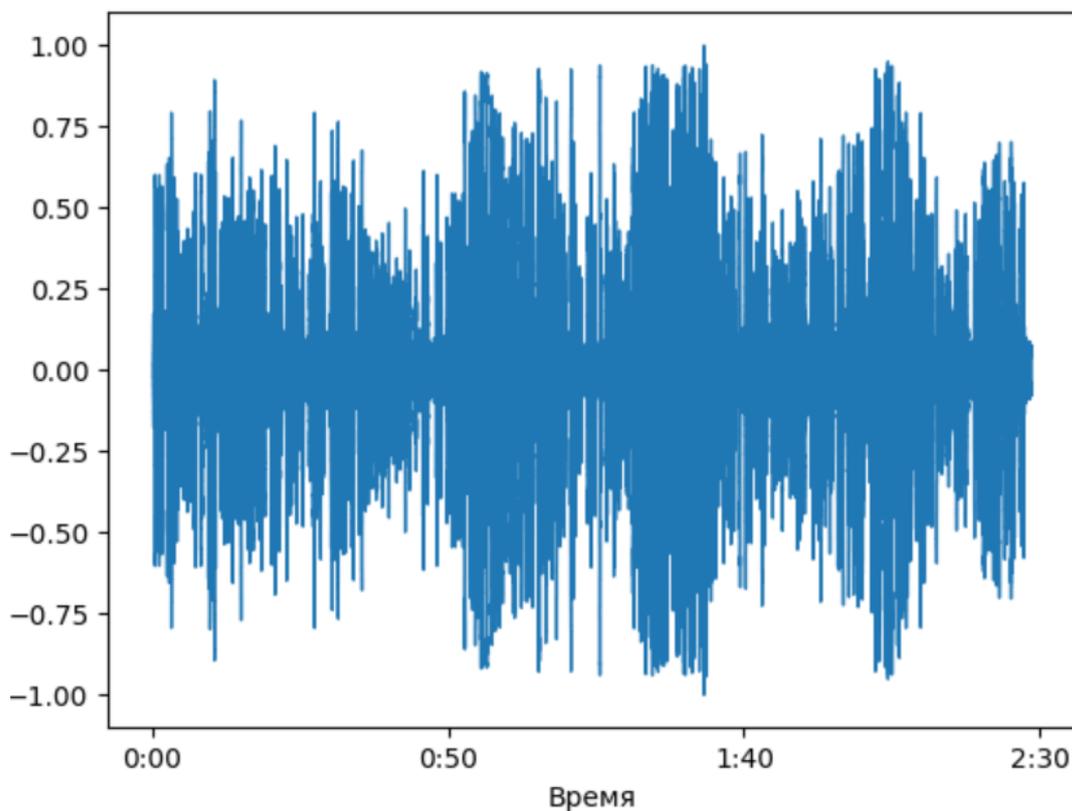


Рис. 1. Исходный сигнал

Классическое преобразование Фурье позволяет разложить сигнал любой формы на составляющие амплитуды и фазового сдвига сигнала, что позволяет определить, какие гармонические колебания и в какой частоте присутствуют в исходном сигнале.

Но ввиду дискретности сигналов реального мира, где сигнал представляется конечной последовательностью чисел во временной и в частотной области, для разложения сигнала на составляющие применяют Дискретное преобразование Фурье (ДПФ).

$$\sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn} = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \left( \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - i * \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right), \quad k = 0, \dots, N-1, \quad (1)$$

где  $N$  – количество значений сигнала, измеренных за период, а также количество компонент разложения;

$x_n$  – измеренные значения сигнала;  
 $k$  – индекс частоты. Частота  $k$ -го сигнала равна  $K/T$ ,  
 $i$  – мнимая единица,

Так как на выходе преобразования получаются конечные суммы, что подходит для использования в цифровой форме, в частности, для алгоритмов цифровой обработки сигналов. Но данный подход оказывается затратным по вычислительным мощностям, так как его сложность оценивается как  $O(N^2)$ . Поэтому на практике применяется оптимизированный алгоритм ДПФ, известный как быстрое преобразование Фурье. Вычислительная сложность БПФ оценивается как  $O(N \log(N))$ , что делает БПФ особенно полезным для обработки сигналов в реальном времени и работы с большими данными. На выходе после БПФ получается массив комплексных чисел, из данного массива можно извлечь амплитудную и частотную информацию о входном сигнале, а также фазовый спектр сигнала. Результат может быть представлен графически, что отображено на рисунке 2.

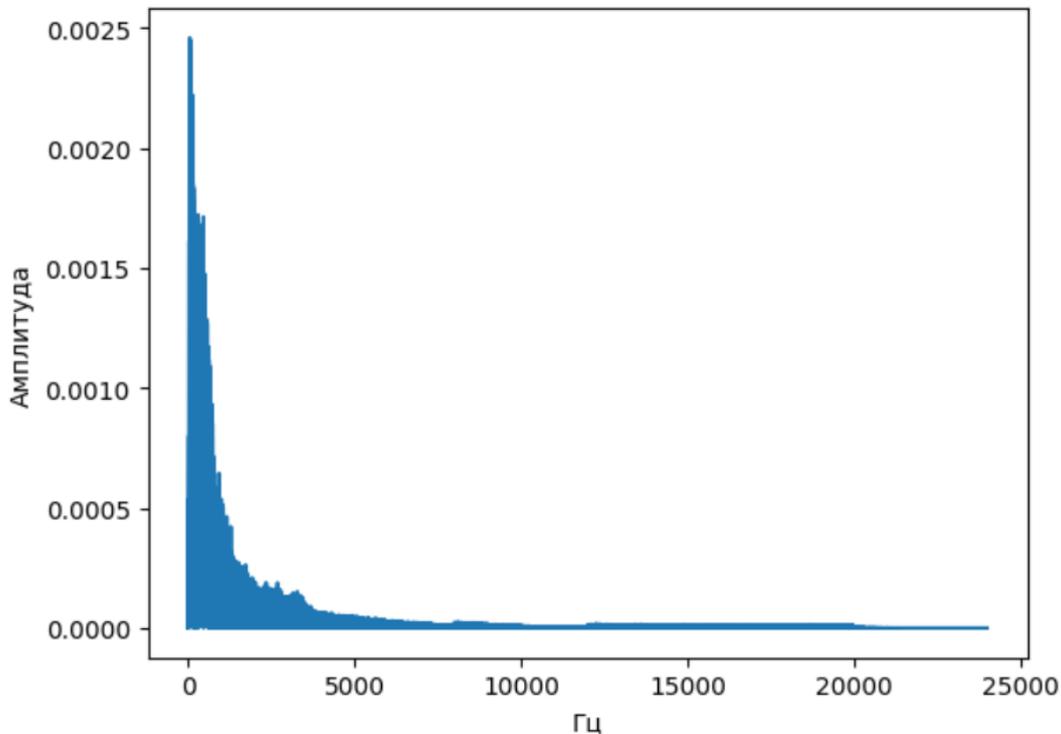


Рис. 2. Преобразование Фурье

Полученные данные служат универсальным представлением исходного сигнала в сжатом виде без потери информации, однако для многих задач предпочтительнее использовать более специализированные механизмы. Так как спектр, полученный с помощью БПФ не содержит временных характеристик сигнала, то для его последовательной обработки часто используют оконное преобразование Фурье (ОПФ, Short Time Fourier Transform – STFT), формирующее спектрограмму сигнала.

По сути, алгоритм ОПФ прост – специальная оконная функция (вид которой зависит от желаемых характеристик) перемножается на фрагмент исходного сигнала и над результатом выполняется БПФ. После этого окно «сдвигается» по входному сигналу и процесс повторяется. Результирующие значения частоты и амплитуды оказываются связаны с конкретной отсечкой по времени и могут полноценно описывать динамику изменения выходного сигнала со временем, при этом используя для хранения информации

меньше данных, нежели исходный аудиосигнал. На основе полученных данных можно построить спектрограмму сигнала, подобную показанной на рисунке 3.

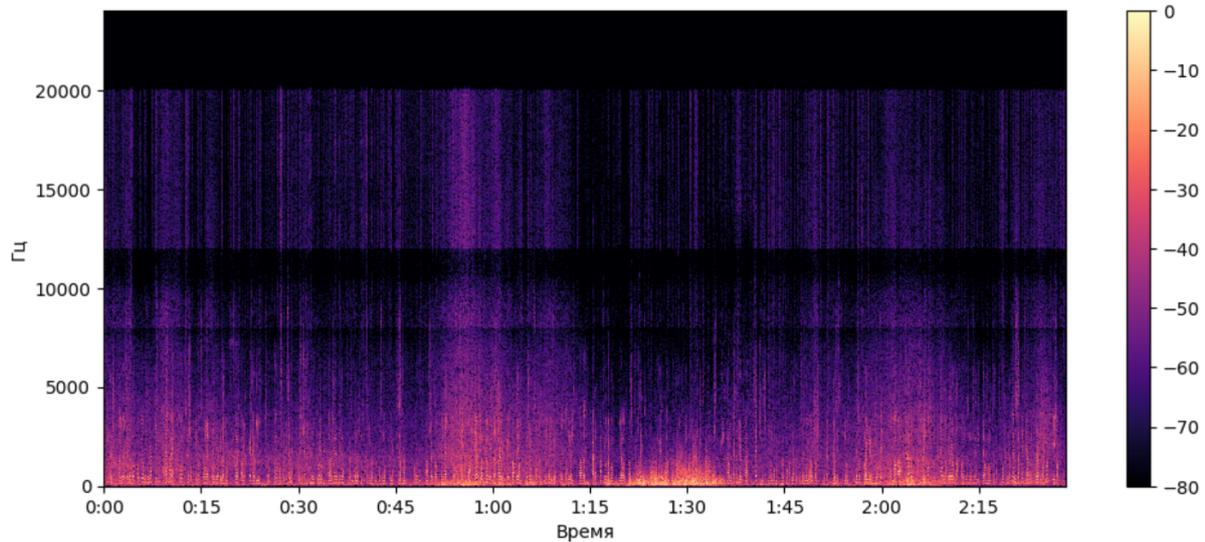


Рис. 3. Спектрограмма аудиосигнала, полученная с помощью ОПФ

Недостатков у STFT несколько: во-первых, вид оконной функции и размер окна не могут изменяться с течением времени, что не позволяет динамически менять разрешающую способность полученной спектрограммы, а во-вторых, невозможно полноценное восстановление сигнала из спектрограммы, что ограничивает использование подобных методов предобработки сигнала. Также для ряда задач использование классических оконных функций оказывается недостаточно, требуется иной алгоритм.

Например, в задачах анализа речи часто используются мел-кепстральные коэффициенты (MFCC), позволяющие построить мел-спектрограмму. В стандартной спектрограмме частотная ось линейна и измеряется в герцах (Гц). Однако слуховая система человека более чувствительна к изменениям на низких частотах, чем на высоких, и эта чувствительность уменьшается логарифмически с увеличением частоты. Шкала Мел - это перцептивная шкала, которая аппроксимирует нелинейную частотную характеристику человеческого уха. Для создания мел-спектрограммы используется ОПФ, при этом аудиосигнал разбивается на короткие сегменты для получения последовательности частотных спектров. Кроме того, каждый спектр пропускается через набор фильтров, так называемый банк фильтров мела, для преобразования частот в Мел шкалу. По сути, главное отличие MFCC от обычного ОПФ – использование логарифмической шкалы, что позволяет решить один из недостатков классического ОПФ – однородность получаемой информации. Пример мел-спектрограммы показан на рисунке 4.

Как видно из рисунка, использование MFCC позволило получить более подробные сведения о частотном диапазоне, соответствующем звучащей речи в обрабатываемом сигнале. Данный метод предобработки показывает себя крайне эффективно в случае, если поставленная задача связана исключительно с обработкой речи, однако в случае универсального решения их диапазона не хватает для единообразного представления всех частот сигнала. В этом случае помимо уже упоминавшегося БПФ используют иные техники, например, вейвлет преобразование.

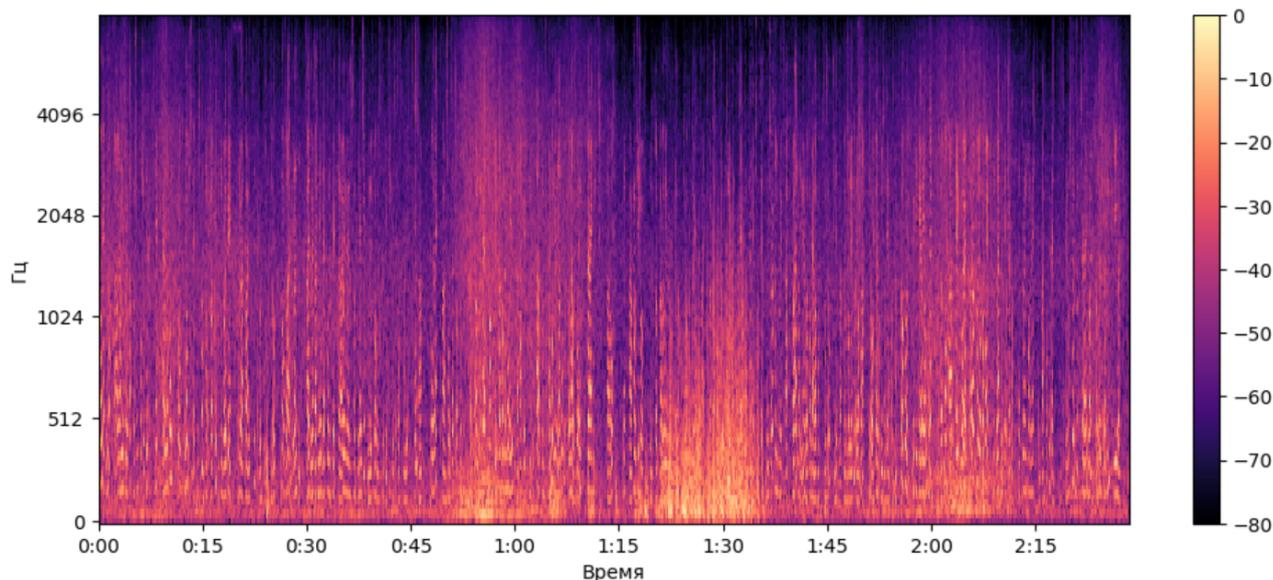


Рис. 4. Мел-спектрограмма

Вейвлет преобразования представляют собой семейства вейвлет функций, каждая из которых позволяет детектировать требуемые для конкретной задачи свойства исследуемого сигнала и их изменения со временем. Общая формула таких преобразований представлена ниже:

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (2)$$

где  $a$  – положительное число, описывающее временной масштаб,

$b$  – натуральное число, описывающее временной сдвиг,

$t$  – текущее время,

$\psi(t)$  – материнская вейвлет функция, задающая исследуемые характеристики сигнала.

Конкретная функция  $\psi$  зависит от исследуемой характеристики сигнала. Математический аппарат для вычисления подобных функций достаточно сложен и требователен к ресурсам, поэтому на практике применяется так называемое дискретное вейвлет преобразование (ДВП), которое является альтернативой БПФ. Данное семейство преобразований применяется при известном типе сигнала и позволяет получить из него информацию о присутствии определённого спектра частот в различные моменты времени для дальнейшего анализа. Результатом ДВП является набор так называемых аппроксимирующих (сА) и детализирующих (сD) коэффициентов. При этом часто ДВП применяется повторно, что позволяет получить единый набор сА и несколько наборов сD. При этом каждый следующий набор детализирующих коэффициентов меньше предыдущего в два раза, но при этом позволяет лучше отобразить общую картину сигнала. Графически результат ДВП можно представить в виде тепловой картины, содержащей полученные наборы коэффициентов. Пример отображён на рисунке 5.

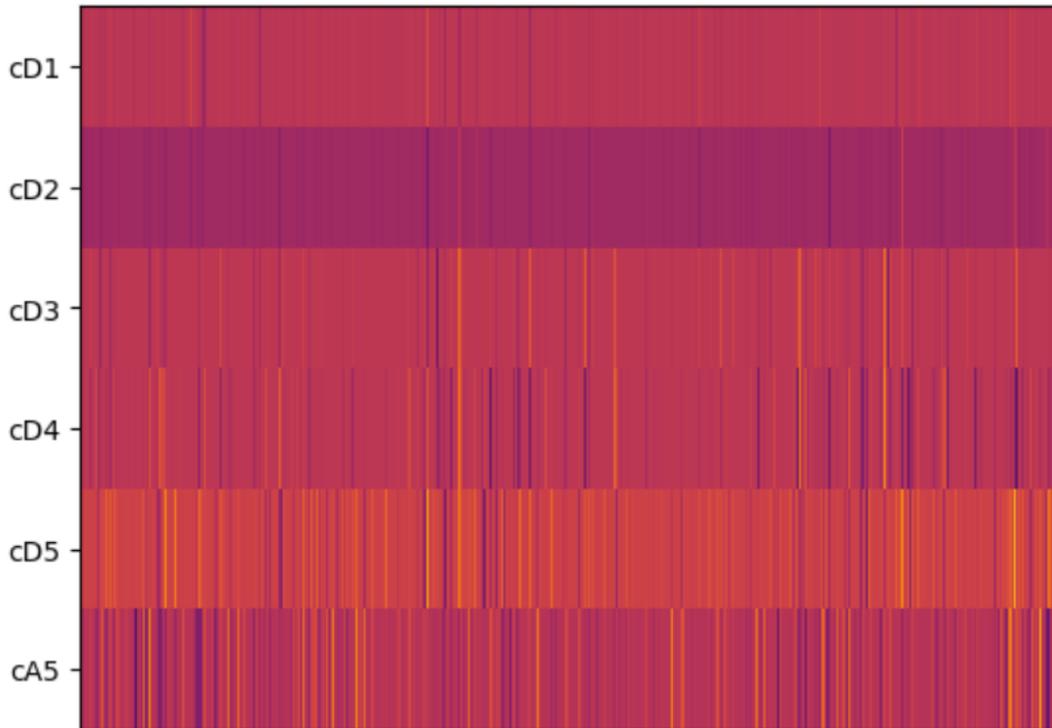


Рис. 5. Результат применения пяти уровней ДВП к сигналу

Ряд методов предобработки сигнала сводятся не к математическим преобразованиям, а к использованию системы ИИ для выделения признаков сигнала. Развитие нейронных сетей привело к появлению так называемых расширенных причинно-следственных свёрточных слоёв (dilated causal convolution), которые активно используются для преобразования исходного сигнала в скрытое пространство, хранящее обработанные признаки входного сигнала и позволяющее анализировать сигнал в реальном времени. Обычные свёрточные сети хорошо справляются с обработкой аудиосигнала [8-10] – для этого обычно используется так называемая одномерная свёрточная сеть (Convolution1D), которая проходит одномерным ядром свёртки по исходному сигналу и генерирует карту признаков как показано на рисунке 6.

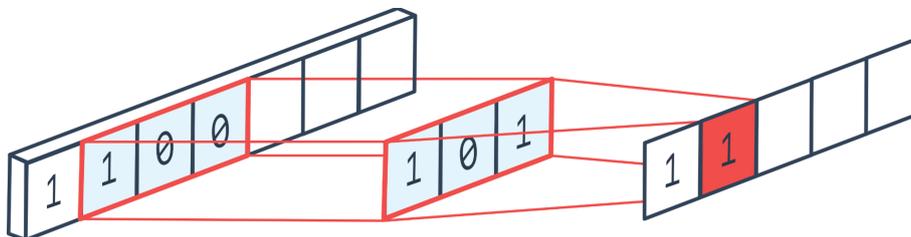


Рис. 6. Пример работы одномерного свёрточного слоя [11]

Однако для аудиосигнала важно, чтобы свёрточная сеть не могла «заглянуть в будущее» и учитывала только предыдущие параметры исследуемого сигнала при генерации карты признаков. Это привело к появлению причинно-следственных слоёв свёртки (causal convolution), описанных в [12]. Изображение из данного источника приведено на рисунке 7.

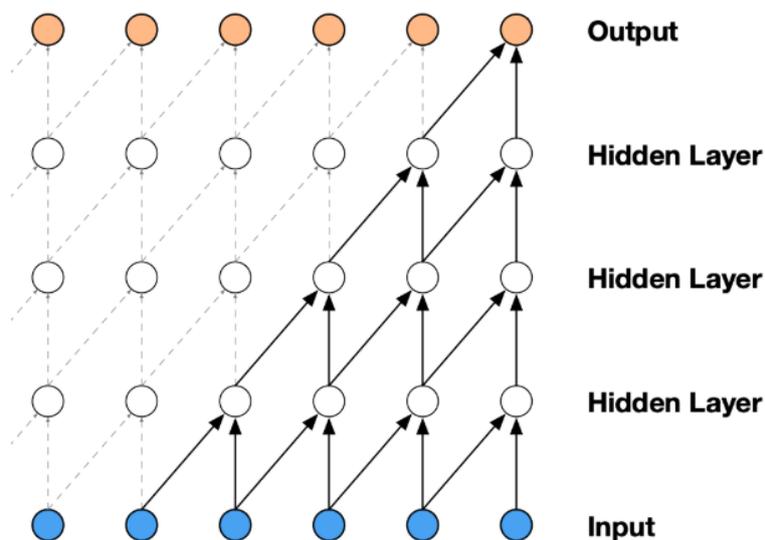


Рис. 7. Пример работы причинно-следственного свёрточного слоя

Фильтр подобных слоёв обрабатывает информацию только об уже прошедших во времени сигналах, не заглядывая в «будущее». Для большего охвата входного сигнала, смещение обрабатываемых значений изменяется в зависимости от слоя и числа сигналов, образуя так называемые расширенные причинно-следственные свёрточные слои, изображение которых заимствовано из [12], показано на рисунке 8.

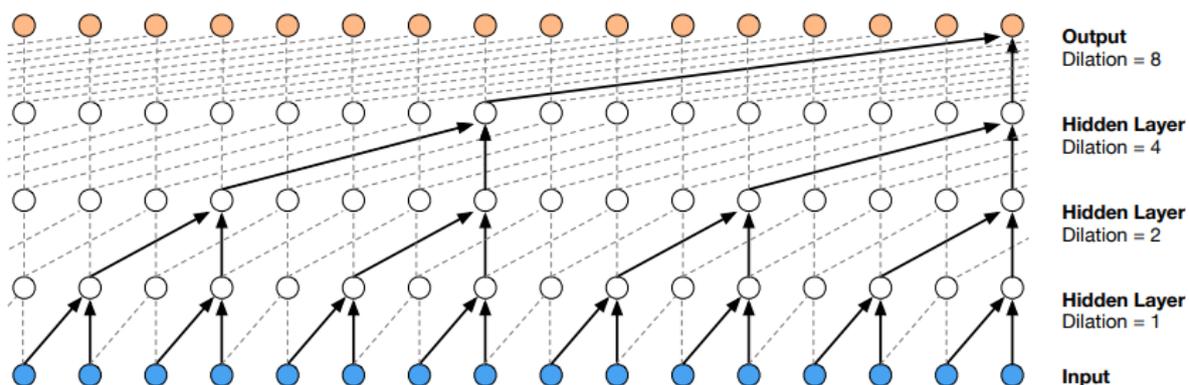


Рис. 8. Пример работы DCC

Подобные слои позволяют сократить вычисления, при этом сохранив достаточно информации для принятия сетью корректного решения. Аудиосигнал, обработанный с помощью набора DCC переводится в так называемое скрытое пространство (latent space), которое содержит информацию о выявленных в процессе свёртки признаках и пригодно для дальнейшей обработки.

После любого из методов предобработки сигнал сохраняет основную информацию и свойства, главные из которых – непрерывность во времени и наличие зависимостей между элементами последовательности. Каждый кадр исходного сигнала предобрабатывается согласно выбранному методу и передаётся в модель ИИ, которая может использовать как классические методы машинного обучения (например, скрытые марковские модели или байесовский классификатор), так и методы глубокого обучения, основанные на построении многослойных нейронных сетей для обработки сигналов. Современные архитектуры глубоких нейронных сетей для обработки аудиосигнала и будут рассмотрены далее.

## 2. Архитектуры современных систем искусственного интеллекта для обработки аудиосигнала на базе глубоких нейронных сетей

В последние десять лет область ИИ, связанная с глубоким обучением, бурно развивается. В рамках одной статьи практически невозможно разобрать всё множество появившихся в последнее время архитектур и моделей, но можно выделить наиболее характерные для решаемых задач и подходов к организации обработки входных данных. В статье [13] приводится экспериментальное сравнение нескольких архитектур искусственных нейронных сетей (ИНС) для задачи программной эмуляции аналогового усилителя сигнала электрогитары. Сравнение показало, что современные архитектуры свёрточных и рекуррентных сетей способны полноценно заменить аналоговые усилители для обработки предварительно записанного сигнала, однако работа в реальном времени требует значительных ресурсов. Но уже относительно простые рекуррентные модели, построенные на основе LSTM слоёв способны достаточно эффективно эмулировать гитарные педали в реальном времени, будучи использованы на одноплатном компьютере Raspberry Pi 4 [14].

Рассмотренная в статье [14] генеративная ИНС WaveNet [12] от компании Google DeepMind, заслуживает отдельного обзора, как характерный пример многозадачной ИНС, успешно применяющейся как для обработки сигнала, так и для задач TTS и STT. Основой модели являются упомянутые ранее слои DCC, а полная архитектура указана на рисунке 9.

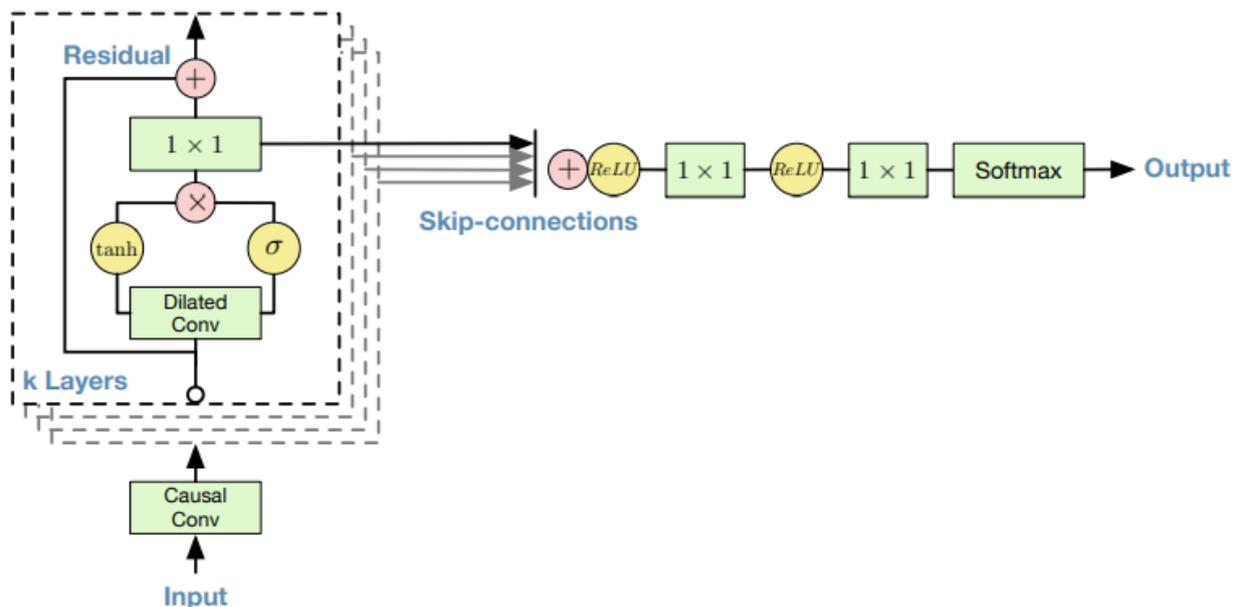


Рис. 9. Архитектура сети WaveNet [12]

Для задачи TTS на вход сети подаются предсказанные на основе текста мелкепстральные коэффициенты, описывающие произносимую фразу, вместе с полученными из эталона характеристиками диктора. На выходе сеть генерирует аудиосигнал, соответствующий желаемым характеристикам. Для задач обработки сигнала во время обучения, построенная по данной архитектуре модель учится характерным образом фильтровать входной сигнал. Получив характеристики входного сигнала, она обучается изменять их, что приводит к добавлению желаемого звукового эффекта. Данная архитектура до сих пор популярна, однако сложна в обучении и требовательна к ресурсам, что ограничивает её применимость.

С развитием архитектуры трансформеров, появились исследования о применимости ИНС, использующих механизм внимания [15] для задач обработки аудиосигнала. Характерными примерами являются популярные ИНС Whisper, Wav2Vec, xtts\_v2 и многие другие.

Whisper [16] – семейство популярных моделей для распознавание речи от компании OpenAI. Важной особенностью является наличие версий модели, оптимизированных для работы в реальном времени на низкопроизводительных устройствах, таких как одноплатные компьютеры (например, Raspberry Pi) или мобильные телефоны, что значительно расширяет возможности применения данных моделей. В основе моделей лежит технология построения сетей – трансформеров GPT, обрабатывающая мел-кепстральные коэффициенты входного сигнала. Архитектура сети представлена на рисунке 10.

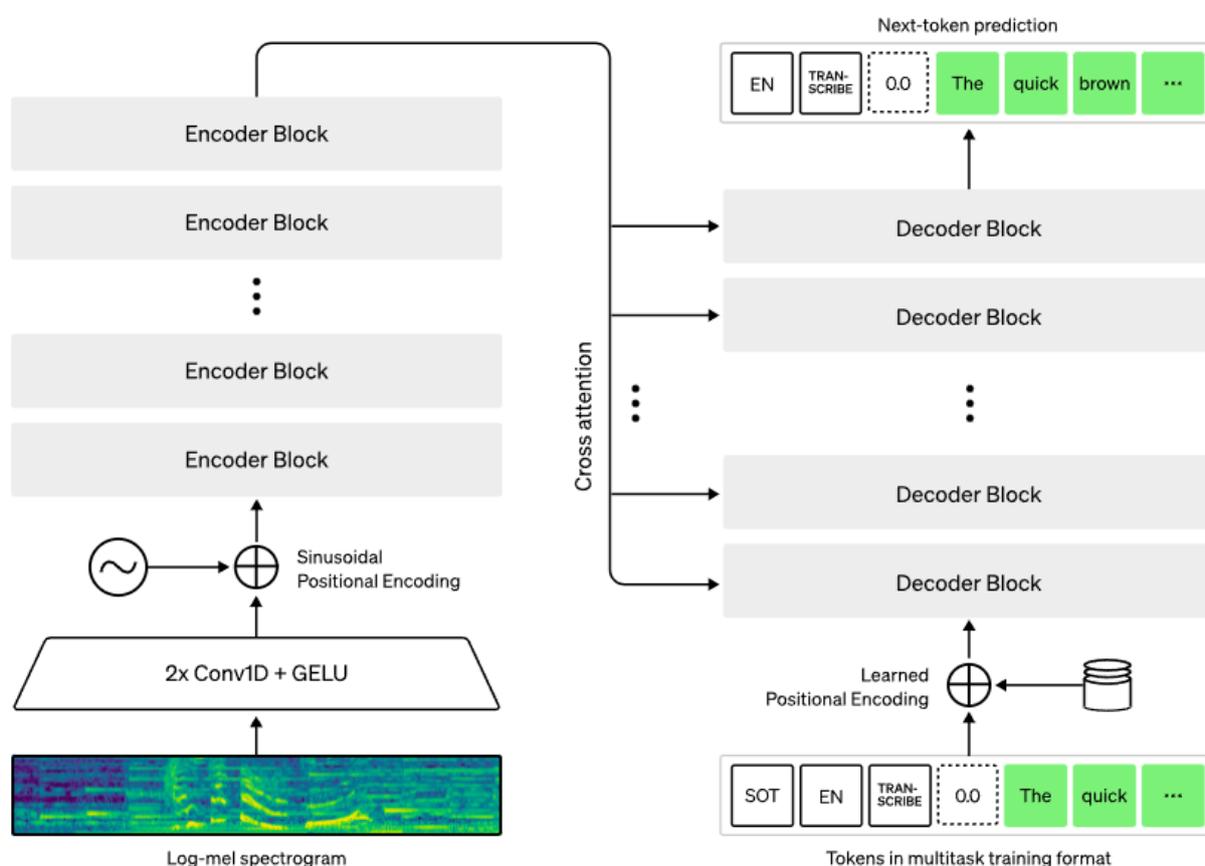


Рис. 10. Архитектура сети Whisper [16]

Данная архитектура является одной из ведущих при проектировании систем распознавания речи. Важным достоинством является соблюдение правил пунктуации при генерации результирующего текста и поддержка нескольких языков, включая русский. При этом модель **small** всего с 74 миллионами параметров обеспечивает приемлемое качество и возможность работы в реальном времени на одноплатном компьютере Raspberry Pi 5.

xtts\_v2 [17] от компании Coqui – популярная генеративная модель TTS, позволяющая копировать эталонный голос на основе шестисекундного отрывка. Однако, хотя веса модели распространяются свободно, её архитектура закрыта и узнать можно только некоторые её особенности. В её основе также лежит

GPT модель для обработки входного текста и преобразования его в скрытое пространство, восстанавливаемое при помощи VQ-VAE в целевой аудиосигнал, изменённый с учётом токенов, полученных при помощи того же VQ-VAE из эталонного аудиофайла. Эксперимент по использованию данной модели, проведённый при написании данной статьи, показал хорошее по мнению опрошенных слушателей качество результирующего сигнала при генерации текста на русском языке и небольшое время работы при использовании GPU Nvidia 4080 RTX. На рисунке 11 показана мел-спектрограмма эталонного сигнала, а на рисунке 12 – сгенерированного моделью. Стоит заметить, что сгенерированный сигнал лишён фоновых шумов и, ввиду скопированной манеры разговора диктор, содержит набор пауз.

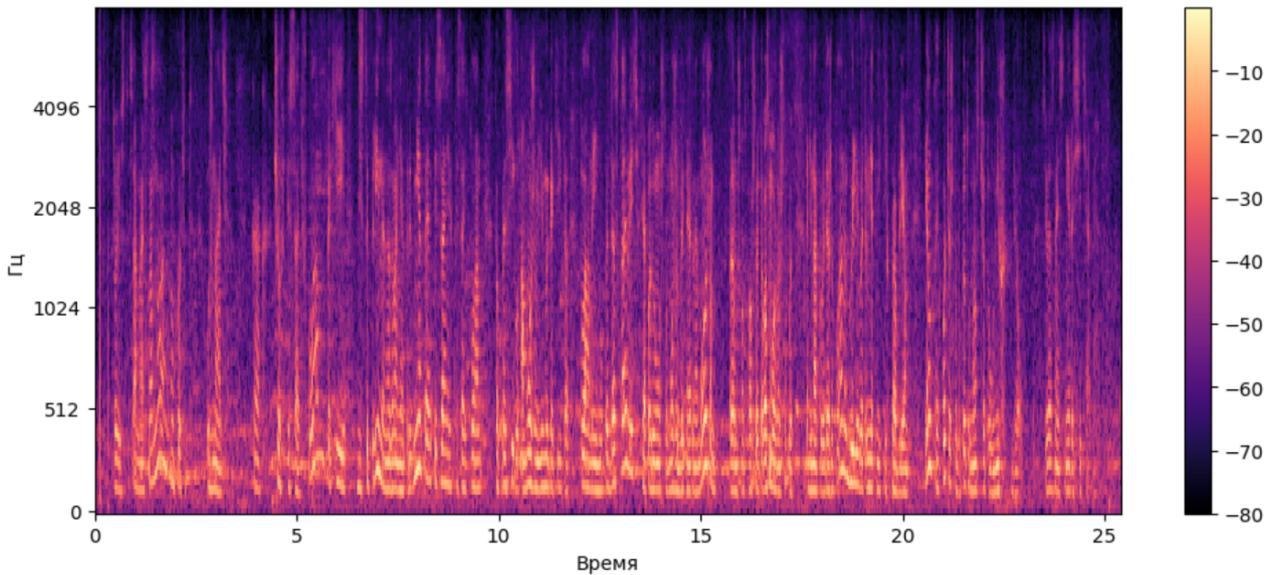


Рис. 11. Мел-спектрограмма эталонного сигнала диктора

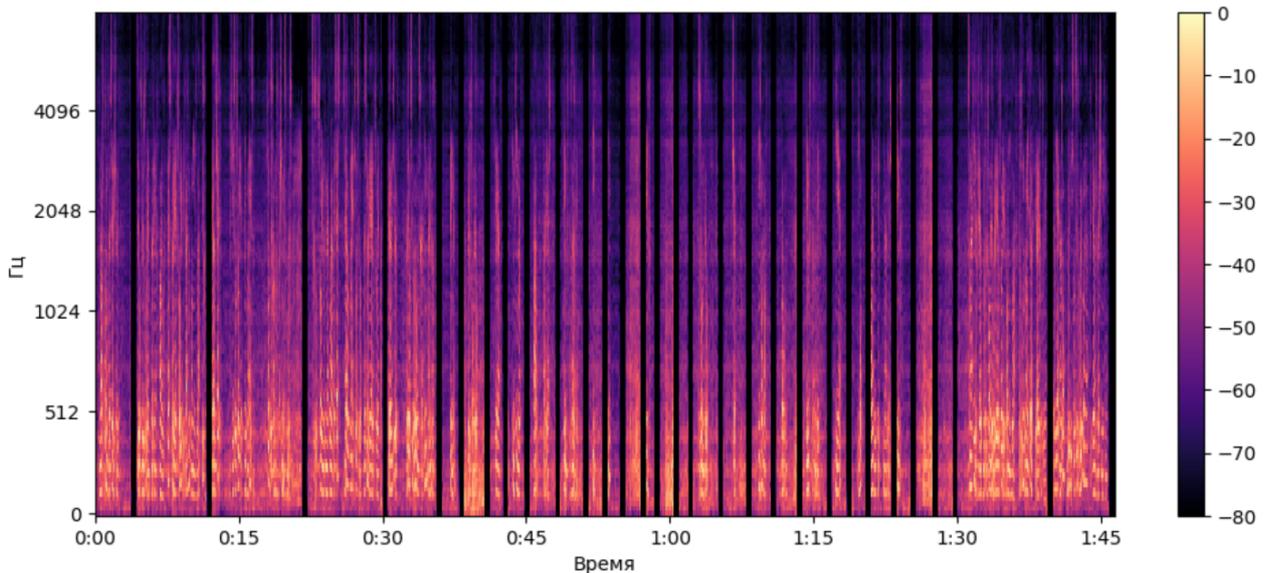


Рис. 12. Мел-спектрограмма сгенерированного сигнала диктора

Для задачи разделения сигнала хорошо себя показывает модель Waveformer [18]. Она позволяет при вычислении на ЦПУ достигать задержки всего в 20 мс. Данная архитектура позволяет обучить модель, подходящую для выделения сигнала от отдельного объекта в исходном аудиосигнале, разделения входного сигнала на все отдельные сигналы, а также задач, связанных с подавлением шумов в обрабатываемом сигнале. Архитектура данной модели показана на рисунке 13.

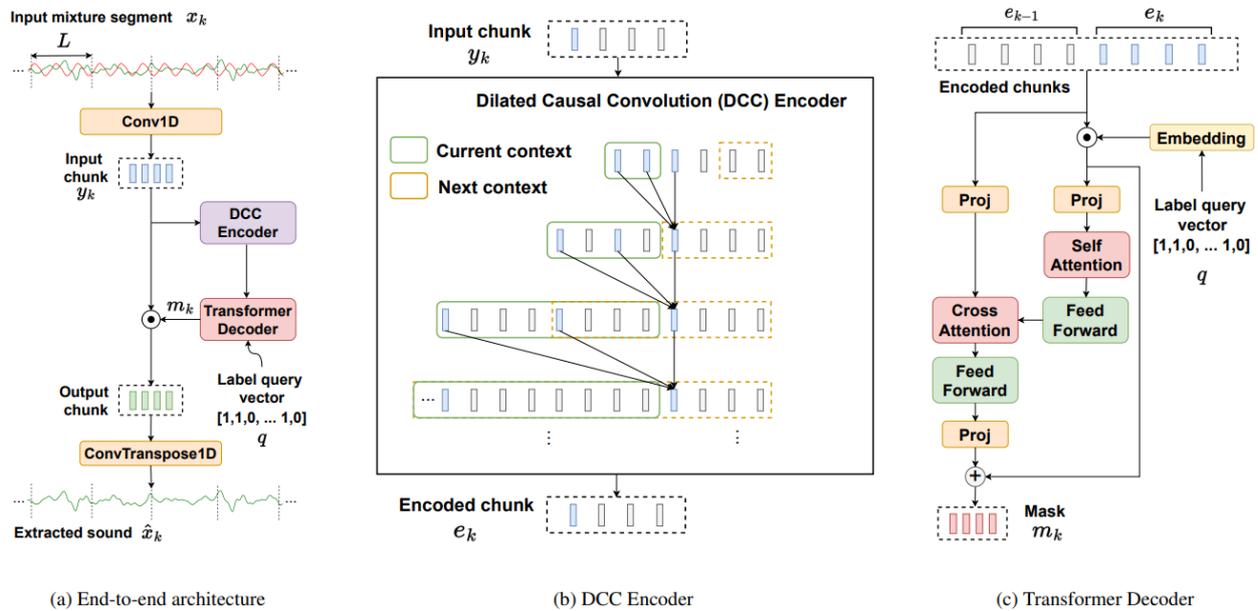


Рис. 13. Архитектура сети Waveformer [18]

На вход подаётся фрагмент исходного файла в необработанной форме. Полученный сигнал проходит сначала через слой одномерной свёртки, а затем переводится в скрытое пространство посредством набора DCC слоёв. Скрытое пространство передаётся в декодер трансформера, который с учётом полученного запроса выделяет маску для искомого сигнала. Полученная маска суммируется с входным сигналом и вновь передаётся на слой одномерной свёртки для получения результата.

Для задач шумоподавления существует множество различных подходов, начиная от описанного ранее Waveformer и применения диффузионной модели, популярной для исправления зашумлённости изображений [19]. Так в статье [20] показана эффективность использования архитектуры U-Net для удаления гауссовского шума из аудиосигнала. При написании настоящей статьи был проведён эксперимент с использованием модели aTENNuate [21], которая использует слои, моделирующие пространство состояний (SSM State Space Model), описанные в статье [22]. Данные слои являются модификацией рекуррентных слоёв и показывают себе эффективнее при построении глубоких сетей для обработки изменяющегося во времени сигнала. Модель aTENNuate обучалась по методу автокодировщика и её архитектура представлена на рисунке 14.

В ходе проведённого эксперимента, модель эффективно удалила шумы из ряда аудиосигналов, потратив в среднем 10 секунд на обработку ранее описанного сигнала. Полученный сигнал показан на рисунке 15.

Можно также привести мел-кепстральные коэффициенты полученного сигнала (рисунок 16), которые показывают, что связанные с речью частоты в основном не подверглись изменению, что показывает эффективность данного метода. Визуальные паузы на графике связаны с манерой речи.

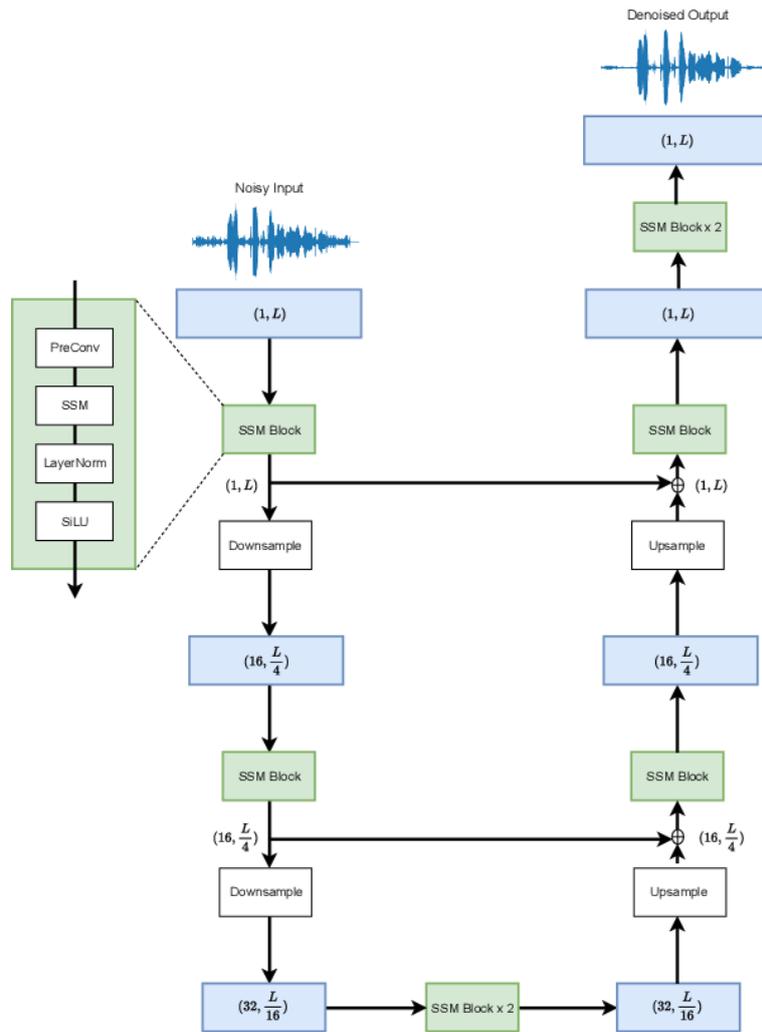


Рис. 14. Архитектура сети aTENNuate [21]

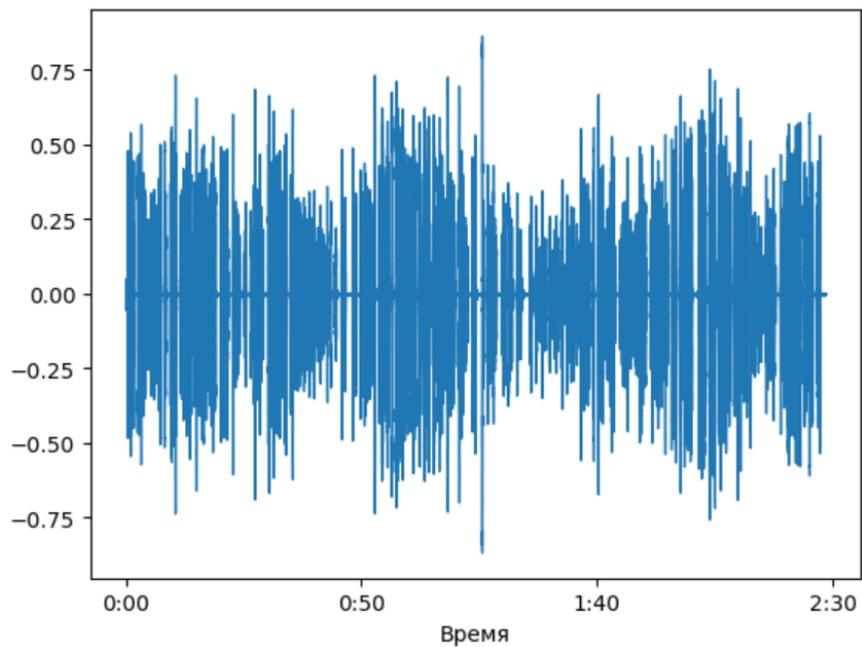


Рис. 15. Сигнал после обработки aTENNuate

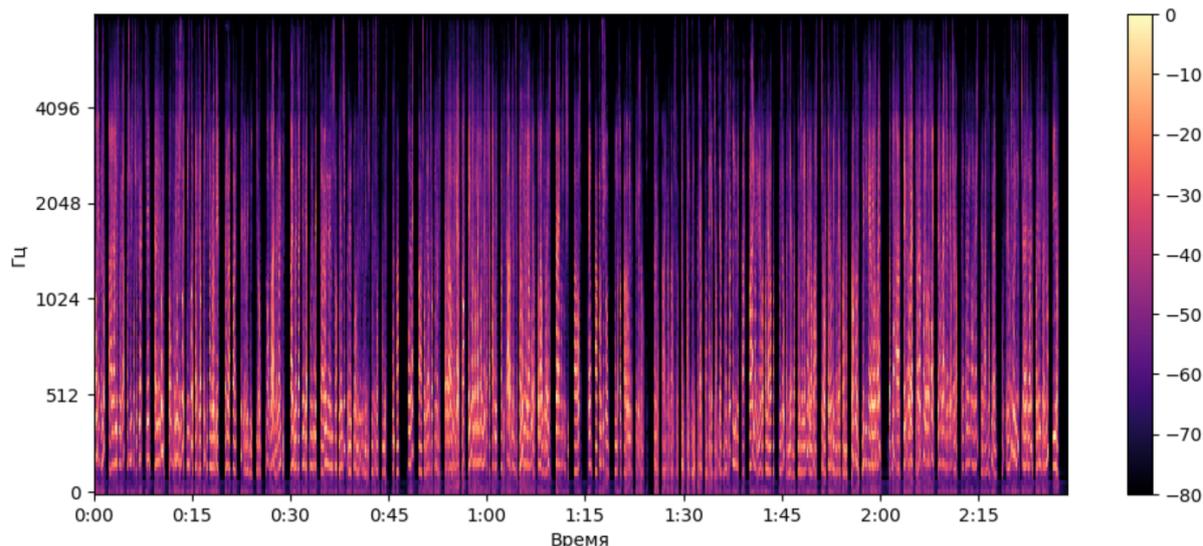


Рис. 16. Мел-спектрограмма сигнала после обработки aTENNuate

### Заключение

Применение современных методов построения систем искусственного интеллекта для обработки аудиосигналов позволяют достичь высокой производительности и точности. При этом, хотя обучение глубоких нейронных сетей и требует значительных ресурсных затрат, но современные технологии квантования и оптимизации позволяют использовать предобученные модели ИНС на широком спектре устройств, в том числе с ограниченными вычислительными возможностями.

Методы предобработки сигнала и конкретная архитектура ИНС сильно отличаются в зависимости от выполняемой задачи, что должно быть учтено при проектировании. Современные тенденции развития систем ИИ для обработки аудиосигнала говорят об постепенном уходе от использования БПФ в задачах комплексной обработки сигнала в пользу использования DCC и перевода сигнала в скрытое пространство, позволяющее использовать при обработке сигнала архитектуру ИНС трансформер и диффузионные модели. В то же время задачи обработки речи всё ещё активно подразумевают использование MFCC для построения мел-спектрограммы входного сигнала. Использование DCC показало свою эффективность при удалении шумов из исследуемого аудиосигнала без значительных искажений полезной части сигнала.

### Список литературы

1. Yeon I. et al. EchoScan: Scanning Complex Indoor Geometries via Acoustic Echoes //arXiv preprint arXiv:2310.11728. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.11728>
2. Sato H. et al. Speakerbeam-ss: Real-time target speaker extraction with lightweight conv-tasnet and state space modeling //arXiv preprint arXiv:2407.01857. – 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.01857>
3. Lam M. W. Y. et al. Efficient neural music generation //Advances in Neural Information Processing Systems. – 2024. – Т. 36. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.15719>
4. Pei Y. R., Shrivastava R., Sidharth F. N. U. Real-time Speech Enhancement on

Raw Signals with Deep State-space Modeling //arXiv preprint arXiv:2409.03377. – 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.03377>

5. Zhou, R., Zhao, S., Luo, M. et al. MFCC based real-time speech reproduction and recognition using distributed acoustic sensing technology. *Optoelectron. Lett.* 20, 222–227 (2024) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11801-024-3167-5>

6. Peng P. et al. Voicecraft: Zero-shot speech editing and text-to-speech in the wild //arXiv preprint arXiv:2403.16973. – 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.16973>

7. Tzanetakis, George & Essl, Georg & Cook, Perry. (2001). Audio Analysis using the Discrete Wavelet Transform. *Proceedings of the Conference in Acoustics and Music Theory Applications.* 318-323.

8. de Benito-Gorron, D., Lozano-Diez, A., Toledano, D.T. et al. Exploring convolutional, recurrent, and hybrid deep neural networks for speech and music detection in a large audio dataset. *J AUDIO SPEECH MUSIC PROC.* 2019, 9 (2019). DOI <https://doi.org/10.1186/s13636-019-0152-1>

9. Попов Владислав Николаевич, Ладыгин Павел Сергеевич, Карев Валентин Витальевич, Борцова Яна Игоревна РАЗРАБОТКА СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АУДИОСИГНАЛОВ // Известия АлтГУ. 2022. №1 (123).

10. К.И. Дементьева, А.А. Ракитский Метод для восстановления аудиосигнала с помощью свёрточных нейронных сетей. *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии.* 2022 Т.20, №3. С. 38–50.

11. Subhash D. Convolution Made Easy [Электронный ресурс] // Medium. – URL: <https://darshanasubhash.medium.com/convolution-made-easy-83d90371ed25> (дата обращения: 26.02.2025).

12. Oord A. WaveNet: A Generative Model for Raw Audio //arXiv preprint arXiv:1609.03499. – 2016. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1609.03499>

13. Wright A. et al. Real-time guitar amplifier emulation with deep learning //Applied Sciences. – 2020. – Т. 10. – №. 3. – С. 766. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10030766>

14. Bloemer K. Neural Networks for Real-Time Audio: Raspberry-Pi Guitar Pedal // Towards Data Science. – 24.05.2021. – URL: <https://towardsdatascience.com/neural-networks-for-real-time-audio-raspberry-pi-guitar-pedal-bded4b6b7f31> (дата обращения: 08.02.2025).

15. Vaswani A. Attention is all you need //Advances in Neural Information Processing Systems. – 2017. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>

16. Radford A. et al. Robust speech recognition via large-scale weak supervision //International conference on machine learning. – PMLR, 2023. – С. 28492-28518. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.04356>

17. Coqui. XTTS [Электронный ресурс] // Coqui TTS Documentation. – URL: <https://docs.coqui.ai/en/latest/models/xtts.html> (дата обращения: 08.02.2025).

18. Veluri B. et al. Real-time target sound extraction //ICASSP 2023-2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – IEEE, 2023. – С. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.02250>

19. Ho J., Jain A., Abbeel P. Denoising diffusion probabilistic models //Advances in neural information processing systems. – 2020. – Т. 33. – С. 6840-6851 DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.11239>

20. Wang P. et al. Diffusion Gaussian Mixture Audio Denoise //arXiv preprint arXiv:2406.09154. – 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.09154>

21. Pei Y. R., Shrivastava R., Sidharth F. N. U. Real-time Speech Enhancement on Raw Signals with Deep State-space Modeling //arXiv preprint arXiv:2409.03377. – 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.03377>

22. Gu A., Goel K., Ré C. Efficiently modeling long sequences with structured state spaces //arXiv preprint arXiv:2111.00396. – 2021. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.00396>

## References

1. Yeon I. et al. EchoScan: Scanning Complex Indoor Geometries via Acoustic Echoes //arXiv preprint arXiv:2310.11728. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.11728>
2. Sato H. et al. Speakerbeam-ss: Real-time target speaker extraction with lightweight conv-tasnet and state space modeling //arXiv preprint arXiv:2407.01857. – 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.01857>
3. Lam M. W. Y. et al. Efficient neural music generation //Advances in Neural Information Processing Systems. – 2024. – T. 36. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.15719>
4. Pei Y. R., Shrivastava R., Sidharth F. N. U. Real-time Speech Enhancement on Raw Signals with Deep State-space Modeling //arXiv preprint arXiv:2409.03377. – 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.03377>
5. Zhou, R., Zhao, S., Luo, M. et al. MFCC based real-time speech reproduction and recognition using distributed acoustic sensing technology. Optoelectron. Lett. 20, 222–227 (2024) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11801-024-3167-5>
6. Peng P. et al. Voicecraft: Zero-shot speech editing and text-to-speech in the wild //arXiv preprint arXiv:2403.16973. – 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.16973>
7. Tzanetakis, George & Essl, Georg & Cook, Perry. (2001). Audio Analysis using the Discrete Wavelet Transform. Proceedings of the Conference in Acoustics and Music Theory Applications. 318-323.
8. de Benito-Gorron, D., Lozano-Diez, A., Toledano, D.T. et al. Exploring convolutional, recurrent, and hybrid deep neural networks for speech and music detection in a large audio dataset. J AUDIO SPEECH MUSIC PROC. 2019, 9 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1186/s13636-019-0152-1>
9. Popov Vladislav Nikolaevich, Ladygin Pavel Sergeevich, Karev Valentin Vitalievich, Bortsova Yana Igorevna DEVELOPMENT OF CONVOLUTION OF A NEURAL NETWORK FOR CLASSIFICATION OF AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF AUDIO SIGNALS // News of Altai State University. 2022. No. 1 (123).
10. K.I. Dementieva, A.A. Rakitskiy Method for audio signal restoration using convolutional neural networks. Bulletin of NSU. Series: Information technologies. 2022 T.20, No. 3. pp. 38–50.
11. Subhash D. Convolution Made Easy // Medium. – URL: <https://darshanasubhash.medium.com/convolution-made-easy-83d90371ed25>
12. Oord A. WaveNet: A Generative Model for Raw Audio //arXiv preprint arXiv:1609.03499. – 2016. DOI <https://doi.org/10.48550/arXiv.1609.03499>
13. Wright A. et al. Real-time guitar amplifier emulation with deep learning //Applied Sciences. – 2020. – T. 10. – №. 3. – C. 766. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10030766>
14. Bloemer K. Neural Networks for Real-Time Audio: Raspberry-Pi Guitar Pedal // Towards Data Science. – 24.05.2021. – URL: <https://towardsdatascience.com/neural-networks-for-real-time-audio-raspberry-pi-guitar-pedal-bded4b6b7f31> (дата обращения: 08.02.2025).
15. Vaswani A. Attention is all you need //Advances in Neural Information Processing Systems. – 2017. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>
16. Radford A. et al. Robust speech recognition via large-scale weak supervision

//International conference on machine learning. – PMLR, 2023. – С. 28492-28518. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.04356>

17. Coqui. XTTS // Coqui TTS Documentation. – URL: <https://docs.coqui.ai/en/latest/models/xtts.html>

18. Veluri B. et al. Real-time target sound extraction //ICASSP 2023-2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – IEEE, 2023. – С. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.02250>

19. Ho J., Jain A., Abbeel P. Denoising diffusion probabilistic models //Advances in neural information processing systems. – 2020. – Т. 33. – С. 6840-6851 DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.11239>

20. Wang P. et al. Diffusion Gaussian Mixture Audio Denoise //arXiv preprint arXiv:2406.09154. – 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.09154>

21. Pei Y. R., Shrivastava R., Sidharth F. N. U. Real-time Speech Enhancement on Raw Signals with Deep State-space Modeling //arXiv preprint arXiv:2409.03377. – 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.03377>

22. Gu A., Goel K., Ré C. Efficiently modeling long sequences with structured state spaces //arXiv preprint arXiv:2111.00396. – 2021. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.00396>

УДК: 629.017:629.018

OECD: 629.017:629.018

## Моделирование свойств низкочастотных абсорберов с акустическими черными дырами

Рахматов Р.И.<sup>1\*</sup>, Говердовский В.Н.<sup>2</sup>, Карпов Е.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>К.т.н., главный специалист, Государственный научный центр РФ ФГУП «НАМИ»,

<sup>2</sup>Д.т.н., в.н.с., <sup>3</sup>Д.ф.-м.н., в.н.с.,

<sup>2,3</sup>Московский политехнический университет,

<sup>1,2,3</sup> г. Москва, РФ

### Аннотация

В статье представлен подход к разработке системы снижения структурного шума на низких частотах, критических для качественного звукового восприятия операторами и пассажирами транспортной техники. Он включает проектирование шумопоглощающей метаструктуры, содержащей композитный элемент с эффектом акустической черной дыры, разработку и реализацию численных алгоритмов моделирования и анализа свойств модели системы, локальную валидацию модели путем расчета и сравнения значений функции передачи шума до и после установки метаструктуры в источниках низкочастотной структурной вибрации элементов конструкции легкового автомобиля. Применение подхода может качественно изменить возможности практического решения проблемы структурного шума до безопасного и комфортного уровней в современных и перспективных типах транспортной техники.

**Ключевые слова:** автотранспортное средство, низкочастотный структурный шум, динамический абсорбер, метаструктура, акустическая черная дыра.

## *Modeling the properties of low-frequency absorbers with acoustic black holes*

*Rakhmatov R.I.<sup>1\*</sup>, Goverdovskiy V.N.<sup>2</sup>, Karpov E.V.<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup>PhD, chief specialist, State Research Center «NAMI»,*

*<sup>2</sup>DSc, leading researcher, <sup>3</sup>DSc, leading researcher,*

*<sup>2,3</sup>Moscow Polytechnic University,*

*<sup>1,2,3</sup>Moscow, Russia*

### **Abstract**

*This paper presents an approach for developing the systems suppressing the low-frequency structural noise critically affecting the sound perception of men-operators and passengers in the motor vehicles. This includes the design of a sound-absorbing metastructure comprising a composite element with an effect of the acoustic black hole, development and realization of numerical algorithms for modeling and analyzing the properties of the system model, and local validation of the model by calculating and comparing the values of the noise transmission function before and after inserting the metastructure into the sources of the low-frequency structural vibration of the motor vehicle constructive parts. The use of the approach can qualitatively change the possibilities for practical solving the issue of structural noise to safe and comfortable levels in advanced and promising types of the motor vehicles.*

**Keywords:** *motor vehicle, low frequency structural noise, dynamic absorber, metastructure, acoustic black hole.*

---

\*E-mail: rakhmatov.rakhmatdzhon@gmail.com (Рахматов Р.И.)

## Введение

Низкочастотные структурные вибрации и шум трудноразрешимая и, в то же время, ключевая проблема обеспечения безопасности и функциональной активности операторов, комфорта пассажиров, надежной работы бортового оборудования. Поиск решений проблемы есть одно из основных направлений совершенствования современной и создания новых видов транспортной техники [1–7]. Причина сложности поиска состоит в большом количестве источников колебаний, интенсивность которых может многократно усиливаться извне [8, 9]. Традиционные механизмы динамического гашения и структурного демпфирования не могут быть использованы вследствие жестких ограничений к количеству присоединительных мест, размерам и весу подобных механизмов, избыточных для структуры объекта защиты [10, 11].

Разработчики пытаются найти решения комплексной проблемы виброакустики. Достаточно широкое распространение получили динамические абсорберы (ДА) с эффектом акустической черной дыры (АЧД) [12]. Феноменологическая модель действия ДА+АЧД в колебательных системах исследуемого типа представляется следующим образом. Происходит частичная «перекачка» энергии низкочастотных структурных вибраций от источника к ДА и замедление распространения волн звуковых частот в «акустическом волноводе» с эффектом АЧД. Известные подходы к исследованию моделей ДА+АЧД отличаются оригинальностью и имеют определенную эффективность [13–16]. Известные модели ДА+АЧД пока далеки от технических решений для практической реализации комбинированного механизма подавления колебаний, вредных и опасных для человека и техники, и, главное, рассчитаны на снижение структурного шума в диапазонах частот 1–10 кГц и выше.

Однако ключевая проблема в том, что критическими для качественного звукового восприятия человеком, например, водителем и пассажирами автотранспортного средства (АТС), являются низкие звуковые частоты, в частности, 50–500 Гц. В данной статье рассматриваются вопросы проектирования и исследования моделей системы снижения низкочастотного структурного шума с помощью метаструктур, элементами которых являются ДА+АЧД. Представлены результаты решения новых задач численного моделирования и модального анализа элементов метаструктур, расчета и сравнения значений функции передачи шума (ФПШ) до и после установки моделей элементов метаструктур в точках элементов конструкции реального АТС с максимальным уровнем структурных вибраций (пучности колебаний) в исследуемом диапазоне частот.

### 1. Разработка структуры и дизайна ДА+АЧД

Одна из схем модели системы снижения структурного шума представлена на рисунке 1. Модель на рисунке 1а содержит, в общем случае, элемент 1 вибрирующей поверхности конструкции АТС и метаструктуру, включающую монолитный или составной элемент 2 (ДА+АЧД), прикрепляемый к элементу 1 в расчетной или экспериментально установленной точке воздействия структурной вибрации (в узле пучности колебаний), и, при необходимости, дополнительный элемент 3 для повышения качества шумопоглощения в исследуемом диапазоне звуковых частот. Центральное плато ДА+АЧД толщиной  $h = const$  предназначено для присоединения данного элемента метаструктуры к поверхности элемента 1 в зонах пучности колебаний. Воронкообразная часть ДА+АЧД имеет переменную геометрию в радиальном направлении: от максимального  $R = var$  до минимального  $r = var$  значений. При этом, общая глубина элемента 2 метаструктуры составляет  $H = var$ , включая суммарную толщину  $h_0 = var$  одно- или многослойного дополнительного элемента 3.

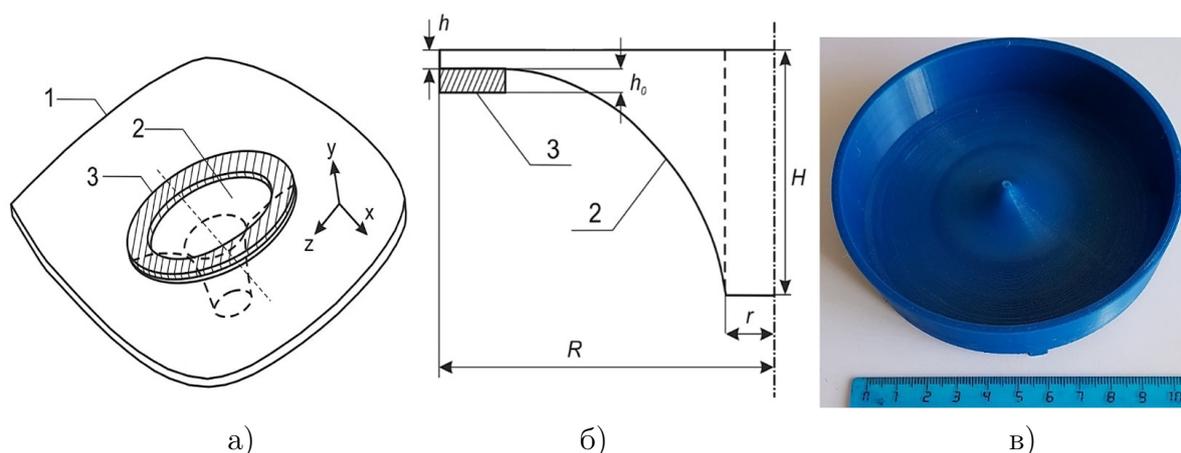


Рис. 1. Модель системы снижения структурного шума: (а) общая компоновочная схема, где 1 - элемент конструкции, излучающей колебания, 2 - элемент ДА+АЧД метаструктуры, 3 - дополнительный элемент метаструктуры, (б) геометрия (вариант) ДА+АЧД, (в) физическая (лабораторная) модель (вариант) ДА+АЧД

Элемент 2 (ДА+АЧД) метаструктуры (см. пример на рис. 1б) проектируется из композитных материалов и представляет собой осесимметричное тело вращения с переменными профилем и толщинами в радиальном и осевом направлениях, элемент 3 – также из композитных материалов. Элементы метаструктуры проектируются на основе полимерных композитов, способных обеспечить решение акустической проблемы в исследуемом диапазоне частот. В настоящее время разрабатывается практический дизайн элемента 2 (ДА+АЧД), в частности, изготовлены физические модели (см. пример на рис. 1в) из полиамидов с неорганическими полидисперсными наполнителями. Элемент 3, в зависимости от конкретной задачи, может быть выполнен из одного или двух тонких слоев различных композитов. Например, разработанные тест-образцы композитов на основе вспененных, с открытой пористостью 84–93%, и волокнистых материалов с наполнителями, показали возможность, по меньшей мере, на 12–17 дБ повышения качества шумопоглощения в полосе частот  $f = 125\text{--}250$  Гц [17, 18]. На этапе МКЭ-моделирования системы (см. далее) характеристики (упругости, пористости и др.) композитных материалов задаются в пределах значений, которые позволяют сместить показатели эффективности системы в сторону низких частот.

## 2. Алгоритм моделирования и анализа динамики модели системы

С помощью ранее разработанных и апробированных численных процедур [9] сгенерированы характеристики источников структурных вибраций и исследованы модальные характеристики модели системы снижения низкочастотного структурного шума. Рассчитаны входные и выходные значения звукового давления и, соответственно, ФПШ до и после установки элемента метаструктуры ДА+АЧД на вибрирующую поверхность в определенных точках элементов конструкции АТС. Рассчитаны также сравнительные оценки эффективности снижения структурного шума по критерию эффективности ФПШ в исследуемом диапазоне низких частот. Для повышения достоверности результатов МКЭ-моделирования и анализа свойств разрабатываемой метаструктуры использованы экспериментальные данные измерения интенсивности колебаний определенных элементов конструкции реального АТС (легкового автомобиля представительского класса) [9]. Общий алгоритм моделирования и анализа динамики модели системы защиты (снижения структурного шума) показан на рисунке 2.

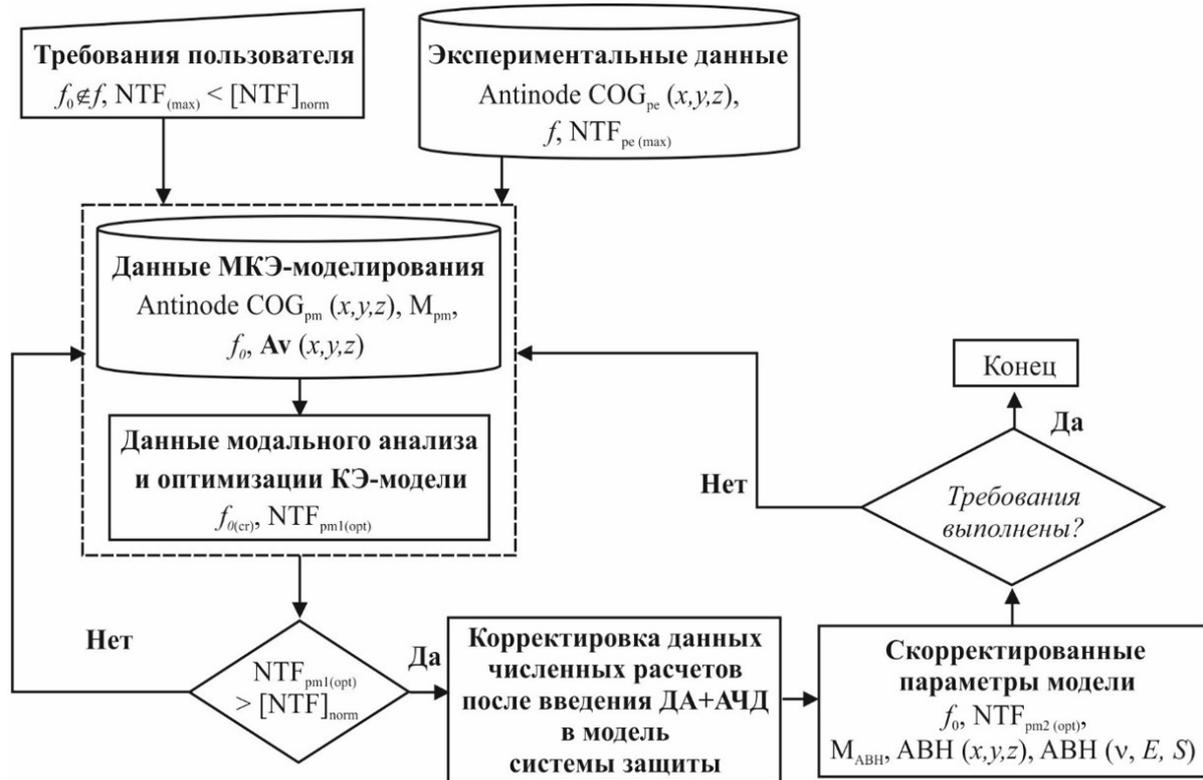


Рис. 2. Алгоритм моделирования и реализации процедур анализа динамики модели системы снижения низкочастотного структурного шума с помощью метаструктуры, содержащей ДА+АЧД элемент

На рисунке 2 приняты следующие обозначения:  $f_0$  и  $f$  – диапазоны частот собственных и вынужденных колебаний поверхностей панелей пола АТС;  $f_0(cr)$  – критические частоты;  $Av(x,y,z)$  вектор собственных форм колебаний;  $NTF$  – значения ФПШ, где нижние индексы 1 и 2 относятся к значениям ФПШ до и после установки ДА+АЧД,  $max$  – к максимальным,  $norm$  – к допустимым и  $pe$  – экспериментальным (измеренным на определенной панели АТС), соответственно;  $Antinode\ COG_{pe}(x,y,z)$  и  $Antinode\ COG_{pm}(x,y,z)$  – координаты мест пучности колебаний, полученных экспериментально и задаваемые при МКЭ-моделировании;  $M_{pm}$  и  $M_{АВН}$  – массы панели и ДА+АЧД;  $АВН(x,y,z)$  и  $АВН(v, E, S)$  – локальные координаты установки, механические характеристики и габаритные размеры ДА+АЧД, соответственно.

В соответствии с разработанным алгоритмом, решены задачи МКЭ-моделирования и исследования динамики модели системы, включая: (а) разработку структуры и геометрии КЭ-модели элемента метаструктуры со свойствами ДА+АЧД, при заданных габаритных и компоновочных ограничениях локальных зон пучности колебаний панелей АТС; (б) анализ структурных вибраций поверхностей элементов конструкций (панелей) реального АТС, (в) расчет и оптимизацию звуковых частот до и после установки данного элемента метаструктуры; (г) получение численных соотношений и анализ превышения целевых значений ФПШ с идентификацией зон пучности колебаний; (д) сравнительный анализ уровней низкочастотного структурного шума до и после установки элемента метаструктуры в зонах пучности, спрогнозированных на этапе экспериментального (стендового) исследования; (е) оптимизацию КЭ-модели для оценки возможности настройки структуры и геометрии элемента метаструктуры со свойствами ДА+АЧД для последующих этапов практического проектирования.

### 3. Моделирование и сравнительный анализ свойств вариантов модели системы по критерию эффективности снижения структурного шума ФПШ

Далее выполнен цикл МКЭ-моделирования динамической реакции по критерию эффективности ФПШ для различных вариантов модели системы снижения структурного шума на входное вибрационное воздействие в заданном диапазоне низких частот, установленной в заданных точках основных и вторичных источников возникновения такого воздействия.

В частности, выполнен модальный анализ вариантов подобной модели. Для этого, с учетом ограничений на компоновку вибрирующих элементов (например, панелей днища АТС), путем оптимизационных расчетов с помощью апробированных численных процедур и экспериментальных исследований [9], выбраны значения масс, механических и геометрических характеристик КЭ-модели элемента метаструктуры со свойствами ДА+АЧД. Некоторые результаты (репрезентативная выборка частот и форм колебаний) численного решения данной задачи представлены на рис. 3.

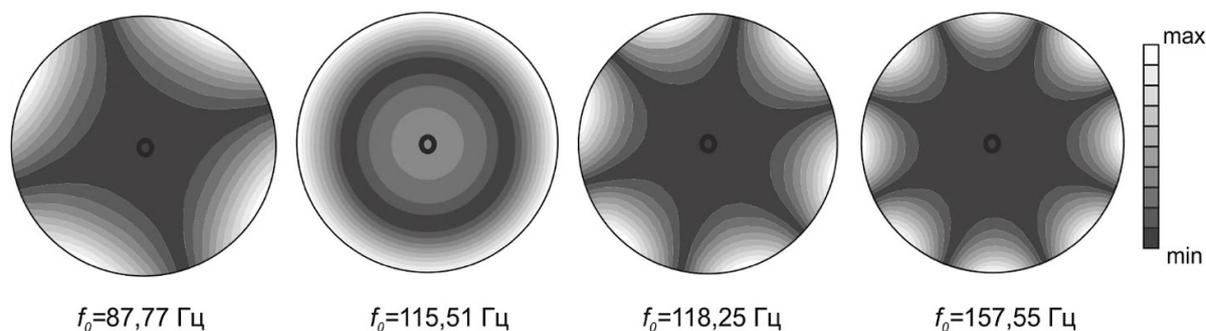


Рис. 3. Формы и частоты собственных колебаний модели системы, включающей элемент метаструктуры с эффектом ДА+АЧД

Анализ расчетных данных показывает, что первая (фундаментальная) частота модели системы составляет 87,77 Гц, что лишь на  $\sim 2\%$  отличается от целевого значения 86 Гц, соответствующего частоте максимальных значений ФПШ, измеренных в контрольных точках определенных элементов конструкции реальных легковых АТС представительского класса (в частотности, автомобилей АURUS).

Моделирование и сравнительные оценки значений ФПШ выполнены для масштабных КЭ-моделей элемента метаструктуры ДА+АЧД, присоединяемого к элементам конструкции реального АТС. Данные модели присоединялись в точках А и Б локальных пространств элементов конструкции с максимальной пучностью колебаний (вибрации панели днища). Микрофоны 1 и 2 устанавливались у левого и правого ушей водителя, 3 и 4 – у левого и правого ушей заднего пассажира (см. рисунок 4).

Для анализа расчетных значений ФПШ задавалось гармоническое единичное воздействие, например, в точках крепления промежуточной опоры карданного вала ( $Z$ -направление), в левой передней точке крепления заднего подрамника ( $Y$ -направление) и правой передней точке крепления заднего подрамника ( $Y$ -направление). Выбранные точки и направления имеют максимальные амплитуды ФПШ относительно других точек крепления основных и вторичных источников воздействия. За точку отклика на такие воздействия принято, согласно ГОСТ 33555-2015 «Автомобильные транспортные средства. Шум внутренний. Допустимые уровни и методы испытаний», левое ухо пассажира, сидящего на заднем сидении справа (см. точку 3 на рисунке 4).

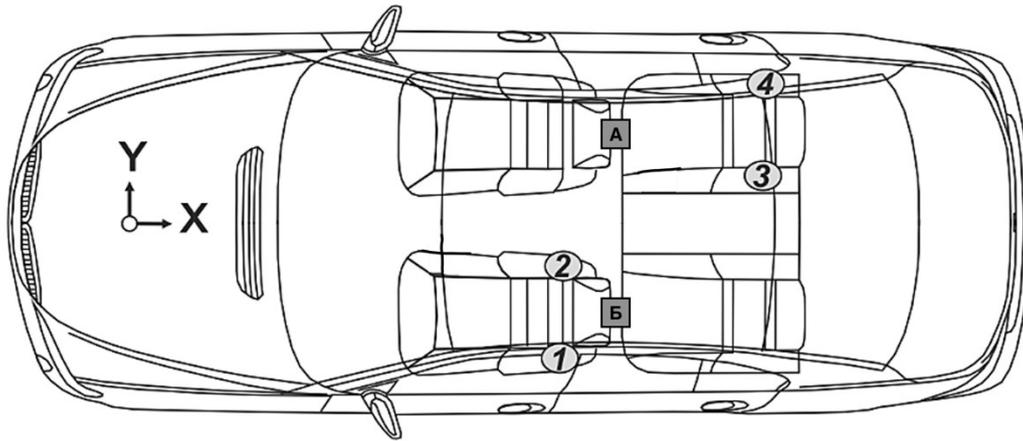


Рис. 4. Схема (план) размещения моделей ДА+АЧД и микрофонов

В таблице 1 представлены примеры граничных условий для решения задачи численного анализа динамики модели системы. Это - координаты мест установки элементов метаструктур со свойствами ДА+АЧД вблизи локальных зон максимальной пучности колебаний (низкочастотной вибрации) панелей АТС. Такие зоны, согласно данным стендовых измерений, располагаются под ногами пассажиров на заднем сидении. Координаты установки пары масштабных моделей элементов метаструктуры, обозначенных точками А и Б на рисунке 4, заданы в глобальной системе координат АТС.

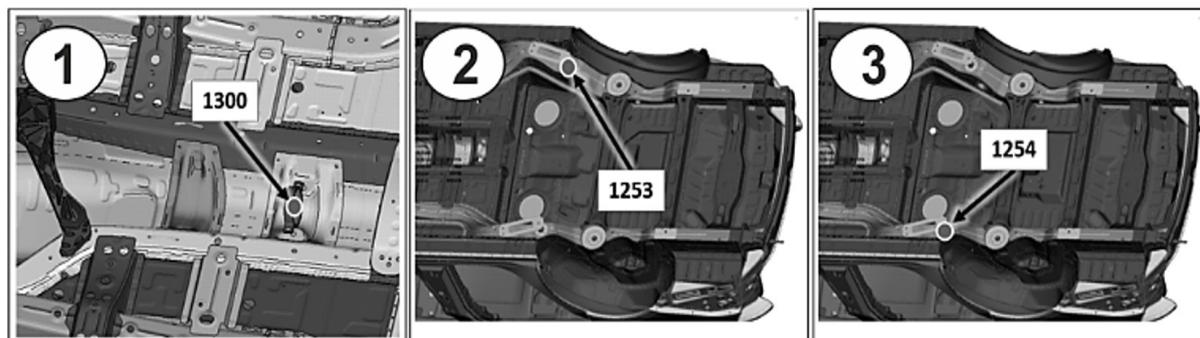
Таблица 1

Локальные координаты установки пары ДА+АЧД

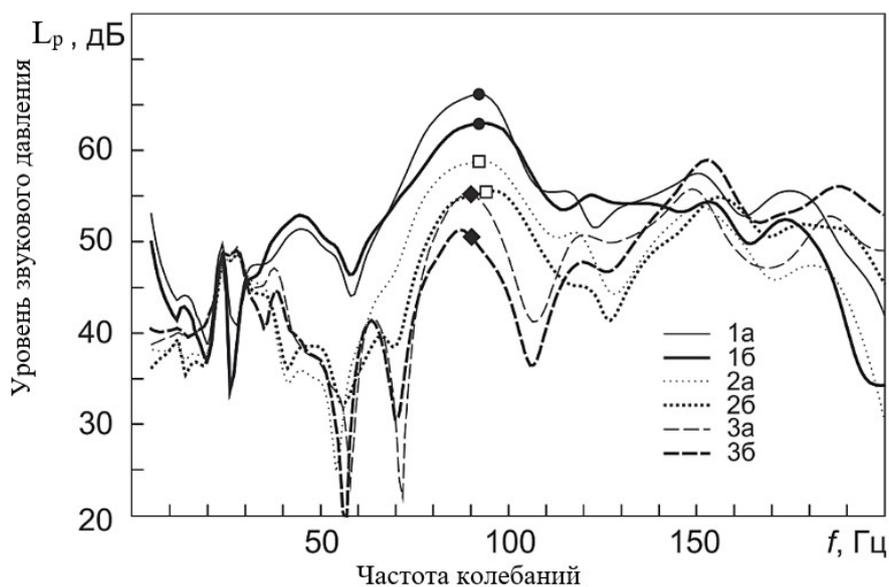
Масса расчетной модели ДА+АЧД, кг	m=0,386		
Положение центра тяжести масштабной КЭ-модели элемента метаструктуры, установленного на правой панели (точка А) днища салона, в глобальной системе координат АТС, мм	$X_1=2074,7$	$Y=334,1$	$Z=-76,8$
Положение центра тяжести масштабной КЭ-модели элемента метаструктуры, установленной на левой панели (точка Б) днища салона, в глобальной системе координат АТС, мм	$X=2074,7$	$Y=-334,1$	$Z=-76,8$

Расчетные оценки эффективности системы снижения структурного шума (по величине уровня звукового давления  $L_p$ , дБ) в диапазоне частот 10-200 Гц с помощью КЭ-моделей ДА+АЧД сделаны в точках элементов конструкции АТС, где, согласно измерениям, выявлены максимумы таких колебаний. При этом в качестве опорного давления принимается значение  $P_0 = 20$  мкПа. Примеры сравнительных значений ФПШ для легкового АТС представительского класса приведены на рисунке 5. Здесь, цифрами 1, 2 и 3 обозначены зоны источников низкочастотного вибрационного воздействия, где 1 — точка крепления промежуточной опоры карданного вала ( $Z$ -направление, точка 1300), 2 — левая передняя точка крепления заднего подрамника ( $Y$ -направление, точка 1253), 3 — правая передняя точка крепления заднего подрамника ( $Y$ -направление, точка 1254). Графики 1а–3а соответствуют результатам расчетов

ФПШ до установки, а графики 16-36 — после установки элемента метаструктуры ДА+АЧД в модель системы. Анализ результатов МКЭ-моделирования показывает, что разрабатываемая модель элемента ДА+АЧД метаструктуры способна существенно, на 5-6 дБ, снизить уровни структурного шума в исследуемом диапазоне низких частот.



а)



б)

Рис. 5. Сравнительные оценки эффективности снижения структурного шума: (а) элементы конструкции легкового АТС и точки низкочастотного вибрационного воздействия, (б) результаты моделирования отклика (структурного шума)

## Заключение

В статье рассмотрен подход к решению одной из критических проблем виброакустики транспортной техники: низкочастотного структурного шума, влияющего на качественное звуковое восприятие водителями и пассажирами АТС. Представлены результаты разработки и тестирования подхода применительно к решению данной проблемы для легкового АТС представительского класса. В частности, разработана модель системы снижения структурного шума в заданном диапазоне частот, содержащей элемент шумопоглощающей метаструктуры с эффектом акустической черной дыры. Разработаны и реализованы алгоритмы численного моделирования и анализа свойств модели системы. Расчеты показали, что предложенная модель элемента метаструктуры способна существенно, на 5-6 дБ, уменьшить уровни структурного шума, генерируемого вибрирующими поверхностями определенных элементов конструкции реального

АТС. Локальная валидация результатов моделирования показала, что характерными источниками таких колебаний являются точки вибрирующих элементов конструкции кузова (переднего и заднего подрамников), трансмиссии (промежуточной опоры крепления карданного вала), а также системы выхлопа отработанных газов.

Авторы также прогнозируют практическую возможность достижения качественно нового уровня снижения структурного шума в диапазоне частот, наиболее вредных и опасных для человека, а также бортовой электроники, например, до 20 дБ и более. С этой целью, ведется разработка дизайна шумопоглощающих метаструктур с настраиваемыми геометрическими и функциональными характеристиками на основе прочных, легких полимерных композитных материалов с модифицирующими полидисперсными наполнителями. Это позволит решить на практике задачи снижения структурного шума в заданном диапазоне частот до безопасных и комфортных уровней в перспективных видах транспортной техники различного назначения.

Исследования, результаты которых представлены в статье, выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда, научный проект № 23-19-00258. Авторы выражают благодарность также М.А. Миронову, ведущему научному сотруднику Акустического института имени акад. Н.Н. Андреева, за полезные консультации.

### Список литературы

1. Y. Liao, H. Huang, G. Chang et al., Research on low-frequency noise control of automobiles based on acoustic metamaterial // *Materials*. - № 15. – 2022. С. 3261.
2. Мунин А.Г. Авиационная акустика. М.: Машиностроение, 1986.
3. Ермаков В.Ю., Кузнецов Д.А., Телепнев П.П., Сова А.Н. Предложение по виброзащите прецизионной оптико-электронной аппаратуры космического аппарата «Спектр-УФ» // *Вопросы электромеханики*. - Т. 135. – 2013. - С. 17-20.
4. Пименов И.К., Кузнецова А.Д. Выявление и устранение причин низкочастотных колебаний плиты плавающего пола машинного отделения // *Noise Theory and Practice*. – № 8(1). – 2022. - С. 35-44.
5. Кирпичников В.Ю., Сятковский А.И., Шашурин А.Е., Кудаев А.В. Экспериментальные исследования эффективности вибропоглощающего покрытия с металлическим армирующим слоем различной // *Noise Theory and Practice*. – № 8(1). – 2022. - С. 29-34.
6. Кирпичников В.Ю., Смольников В.Ю., Кудаев А.В., Гусева Е.В., Сятковский А.И. Экспериментальные исследования вибродемпфирующих свойств композитных материалов на основе бумажно-слоистых пластиков hpl, содержащих встроенные слои из термопластичных пленок вpc-2,5 // *Noise Theory and Practice*. – № 8(4). – 2022. - С. 40-48.
7. Сятковский А.И., Рюткянен Е.А., Кудаев А.В. Демпфирование в трехслойных конструкциях металл-полимер-металл с термопластичной поливинилацетатной пленкой. // *Noise Theory and Practice*. – № 2(8). – 2022. - С. 24-34.
8. Y. Wang, H. Guo, C. Yang, Vehicle interior noise mechanism and prediction. In the book *Vehicle Interior Sound Quality. Analysis, Evaluation and Control* // Springer. – 2023. - P. 5-62.
9. Рахматов Р.И., Тремясов В.В., Ликеев А.П. и др. Исследования модальных характеристик с целью комплексной валидации расчётной модели на примере кузова современного автотранспортного средства. // *Труды НАМИ. Автомобилестроение*. - № 3. – 2023. - С. 6-32.

10. M. Lee, V.N. Goverdovskiy, *Vibration Protection Systems: Negative and Quasi-Zero Stiffness* (Cambridge University Press, 2021).
11. M.B. Kumbhar, R.G. Desavale, T. Jagadeesha, Recent advances in magnetorheological damping systems for automotive technology. In the book *Intelligent Manufacturing Systems in Industry 4.0* // Springer. – 2023. – P. 123-133.
12. V.V. Krylov, Localized flexural waves in wedges of power-law profile and their relationship with acoustic black holes (Preprint, Loughborough University, UK, 2019).
13. Миронов М.А. Распространение изгибной волны в пластине, толщина которой плавно уменьшается до нуля на конечном интервале. // *Акустика*. – № 34. – 1988. – С. 546-547.
14. S. Hoffmann, S. Rothe, S.C. Langer, Acoustic black holes – modelling, shaping, placement and application. In the book *Calm, Smooth and Smart* // Springer. – 2023. – P. 169-188.
15. H. Ji, X. Zhao, N. Wang et al., A circular eccentric vibration absorber with circumferentially graded acoustic black hole features // *Journal of Vibration and Acoustics* – V. 144. – 2022. – P. 1-35.
16. T. Zhou, L. Cheng, Planar swirl-shaped acoustic black hole absorbers for multi-directional vibration suppression // *Journal of Sound and Vibration*. – V. 516. – 2022. P. 116500.
17. Карпов Е.В., Goverdovskiy В.Н., Бровкина Ю.И., Михайленко М.А., Горбунов Ф.К. Моделирование структурных элементов широкополосных низкочастотных шумопоглотителей для транспортной техники. // *Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки*. – 2025 (В печати).
18. Рахматов Р.И. Прогнозирование качественного изменения виброакустических характеристик автотранспортного средства. // *Noise Theory and Practice*. – № 3(38). – 2024. – С. 42-59.

## References

1. Y. Liao, H. Huang, G. Chang et al., Research on low-frequency noise control of automobiles based on acoustic metamaterial // *Materials*. – V. 15. – 2022. P. 3261.
2. A.G. Munin, *Aeronautical Acoustics* (Mechanical Engineering, Moscow, Russia, 1986). (In Russian).
3. V.Y. Ermakov, D.A. Kuznetsov, P.P. Telepnev, A.N. Sova, A proposal for vibration protection of precision optoelectronics for spacecraft “Spectrum-UV”. *Transactions on Electromechanics* 135 (2013) 17-20. (In Russian).
4. I.K. Pimenov, A.D. Kuznetsova, Identification and elimination of causes of the low-frequency vibration of the floating floor in engine-room // *Noise Theory and Practice*. – V. 8(1). – 2022. – P. 35-44.
5. V.Y. Kirpichnikov, A.I. Syatkovskiy, A.E. Shashurin, A.V. Kudaev, Experimental study of effectiveness of a vibration absorbing coating with a metal reinforcing layer of various materials // *Noise Theory and Practice*. – V. 8(1). – 2022. – P. 29-34.
6. V.Y. Kirpichnikov, V.Y. Smolnikov, A.V. Kudaev, E.V. Guseva, A.I. Syatkovskiy, Experimental study of vibration damping properties of composite materials based on paper-laminated hpl-plastics containing embedded layers of thermoplastic films vps-2,5 // *Noise Theory and Practice*. – V. 8(4). – 2022. – P. 40-48.
7. A.I. Syatkovskiy, E.A. Ryutkyanen, A.V. Kudaev, Damping in the three-layer metal-polymer-metal structures with a thermoplastic polyvinyl acetate film. *Noise Theory and Practice* 2(8) (2022) 24-34.

8. Y. Wang, H. Guo, C. Yang, Vehicle interior noise mechanism and prediction. In the book *Vehicle Interior Sound Quality. Analysis, Evaluation and Control* // Springer. – 2023. – P. 5-62.
9. R.I. Rakhmatov, V.V. Tremyasov, A.P. Likeev et al., Study of modal characteristics of a modern vehicle for the purpose of comprehensive validation of the computational model using the body as an example. *Transactions of the NAMI. Automobile Production* 3 (2023) 6-32. (In Russian).
10. M. Lee, V.N. Goverdovskiy, *Vibration Protection Systems: Negative and Quasi-Zero Stiffness* (Cambridge University Press, 2021).
11. M.B. Kumbhar, R.G. Desavale, T. Jagadeesha, Recent advances in magnetorheological damping systems for automotive technology. In the book *Intelligent Manufacturing Systems in Industry 4.0* // Springer. – 2023. – P. 123-133.
12. V.V. Krylov, Localized flexural waves in wedges of power-law profile and their relationship with acoustic black holes (Preprint, Loughborough University, UK, 2019).
13. M.A. Mironov, Propagation of a bending wave in a plate whose thickness smoothly decreases to zero at a finite interval. *Acoustics* 34 (1988) 546-547.
14. S. Hoffmann, S. Rothe, S.C. Langer, Acoustic black holes – modelling, shaping, placement and application. In the book *Calm, Smooth and Smart* (Springer, 2023) pp. 169–188.
15. H. Ji, X. Zhao, N. Wang et al., A circular eccentric vibration absorber with circumferentially graded acoustic black hole features // *Journal of Vibration and Acoustics* – V. 144. – 2022. – P. 1-35.
16. T. Zhou, L. Cheng, Planar swirl-shaped acoustic black hole absorbers for multi-directional vibration suppression // *Journal of Sound and Vibration*. – V. 516. – 2022. P. 116500.
17. E.V. Karpov, V.N. Goverdovskiy, Y.I. Brovkina, M.A. Mykhaylenko, F.K. Gorbunov, Modeling the structural elements of broadband low-frequency sound absorbers for transport equipment. *The Reports of Russian Academy of Sciences. Physics, Technics* (2025). (In press, In Russian).
18. R.I. Rakhmatov, Predicting in qualitative change of vibration and noise characteristics in a motor vehicle // *Noise Theory and Practice*. – V. 3(38). – 2024. – P. 42-59.

УДК: 534.6

OECD: 01.03.AA

## Сравнение нормативов и методов снижения шума в Китае и России

Буторина М.В.<sup>1\*</sup>, Те Цзявей<sup>2</sup>, Элькин Ю.И.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Д.т.н., профессор кафедры «Экология и производственная безопасность»,

<sup>2</sup>Аспирант кафедры «Экология и производственная безопасность»,

<sup>1,2</sup>Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»

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

<sup>3</sup> Д.т.н., профессор кафедры «Инженерно-экологические инновации и комплексная безопасность» Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), г. Москва, РФ

### Аннотация

В России проблема снижения шума рассматривается уже давно, в Китае данному вопросу уделяется не менее пристальное внимание. Закон о контроле шума в КНР был принят еще в 1997 г., а в последние годы его требования были значительно пересмотрены и ужесточены. Между Китаем и Россией существует определенная разница в стандартах по снижению и контролю шума, однако, основные их положения схожи, т.к. базируются на международных рекомендациях по оценке шума. В Китае, как и в России, ведется масштабный мониторинг уровней шума, но в отличие от нашей страны проводится зонирование территории по функциональному назначению и классу акустического комфорта. В 2022 г. в Китае были ужесточены требования к шумным механизмам и производствам, предусмотрены штрафы за сверхнормативное акустическое воздействие. В обеих странах применяются аналогичные шумозащитные мероприятия, так, наиболее распространенным мероприятием по снижению шума транспорта являются акустические экраны и шумозащитное остекление. В Китае большее внимание уделяется установке экранов галерейного типа, применению вибродемпфирующего дорожного полотна и звукоизоляции внешних стен зданий.

**Ключевые слова:** нормы шума, законодательное регулирование, критерии оценки шума, акустический комфорт, шумозащитные мероприятия

### *Comparison of noise limits and noise reduction measures in China and Russia*

*Butorina M.V.<sup>1\*</sup>, Te Jiawei<sup>2</sup>, Elkin Yu.I.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*D.Sc., Professor of the Department of Ecology and Industrial Safety,*

---

\*E-mail: butorina\_mv@voenmeh.ru (Буторина М.В.)

<sup>2</sup>Post-graduate student of the Department of Ecology and Industrial Safety,

<sup>1,2</sup>Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup>DSc, Professor of the Department of Engineering and Environmental Innovations and Integrated Safety,  
Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Russia

### **Abstract**

*In Russia, the problem of noise reduction has been considered for a long time; in China, this issue is given no less attention. The Noise Control Law in China was adopted as early as 1997, and in recent years its requirements have been significantly revised and tightened. There are some differences in noise abatement and control standards between China and Russia, but the basic provisions are similar, as they are based on international noise assessment guidelines. In China, as in Russia, noise levels are monitored on a large scale, but unlike in Russia, the territory is zoned according to functional purpose and acoustic comfort class. In 2022, China tightened requirements for noisy machinery and production facilities, and fines for excessive acoustic impact were introduced. Both countries apply similar noise protection measures, for example, the most common measures to reduce transportation noise are acoustic screens and noise-protective glazing. In China, more attention is paid to the installation of gallery-type screens, the use of vibration-damping roadbeds and soundproofing of external walls of buildings.*

**Keywords:** *noise limits, legislative basis, noise evaluation criteria, acoustic comfort, noise protection measures*

### **Введение**

Допустимый уровень шума – это предел, установленный для обеспечения тишины в определенной зоне. Среда с уровнем шума от 30 до 40 дБА является относительно тихой; уровень шума, превышающий 50 дБА негативно влияет на сон и отдых, приводит к неустранимой усталости и нарушению физиологических функций; если уровень шума превышает 70 дБА, он будет мешать разговору, вызывать расстройство, потерю концентрации и снижать эффективность работы; длительное воздействие шумовой среды выше 90 дБА может серьезно повредить слух и вызвать другие заболевания [1].

В Китае оценка шума обычно проводится по четырем аспектам: физическому, психологическому, физиологическому и социальному. Физическая оценка основана на интенсивности шума, измеренной в точке наблюдения, психологическая оценка - на субъективных ощущениях людей и эмоциональном воздействии шума, физиологическая оценка - на степени вреда, причиняемого шумом организму человека; а социальная оценка основана на реакции общества на шум.

Согласно «Отчету о предотвращении и контроле шумового загрязнения в Китае» [2] по стране в год поступает более 4 млн жалоб на шум. При этом на социальный шум приходится 57,9% жалоб, на строительный шум – 33,4%, 4,5% на промышленный

и 4,2% на транспортный шум.

В Китае 4 раза в год производится мониторинг шума в окружающей среде при помощи ручных и автоматизированных методов контроля. В 2021 г. при помощи ручных измерений было проведено 3521 замеров в функциональных зонах, 51046 замеров в регионах и 5046 замеров шума дорожного движения. Используются также автоматические станции мониторинга, 1692 пункта расположено на территории застройки и 735 пункта предназначены для шума транспорта. Все результаты замеров передаются в режиме реального времени в Министерство экологии и окружающей среды. В планах увеличение количества точек наблюдений до 1 млн. по стране. В 2021 г. 284 города произвели зонирование территории по фактору шума, к 2022 г. это количество возросло до 1461 города (или 80,2% из всех 1822 городов страны). В крупнейших городах, таких как Пекин, Шанхай, Гуанчжоу, Чэнду и др. построены карты шума [2].

По результатам измерений и расчетов все города разделены на 5 классов по уровню акустического комфорта (таблица 1). Распределение городов по уровню акустического комфорта приведено на рисунке 1 [2]. Предпринимаются мероприятия с тем, чтобы больше городов переходило в класс 1, следует отметить, что ни одного города не попадает в 4 и 5 класс с наихудшими условиями.

Таблица 1

Классы акустического комфорта китайских городов [2]

	Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4	Класс 5
Средние УЗ в дневное время, дБА	$\leq 68$	68,1-70,0	70,1-72,0	72,1-74,0	$>74$
Средние УЗ в ночное время, дБА	$\leq 58$	58,1-60,0	60,1-62,0	62,1-64,0	$>64$

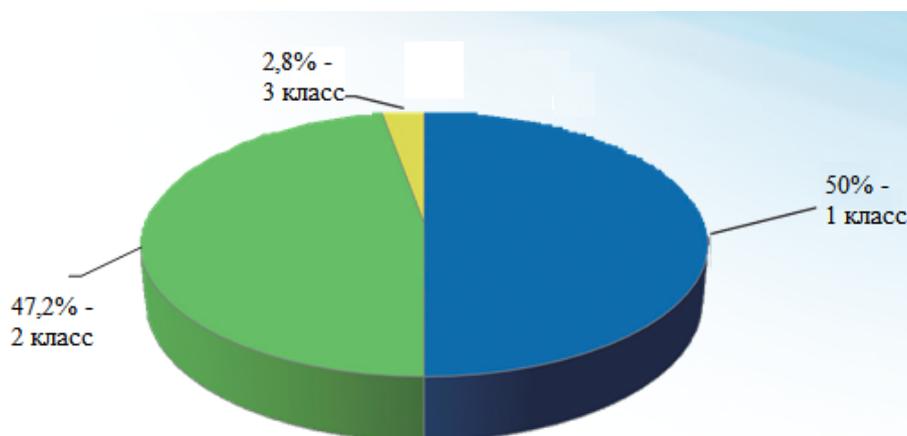


Рис. 1. Распределение городов Китая по уровню акустического комфорта

Председатель Си Цзиньпин неоднократно подчеркивает необходимость придерживаться подхода, ориентированного на человека, настаивая на том, что

благоприятная экологическая обстановка является универсальным показателем благосостояния населения, которое должно гармонично сосуществовать с природой, возвращая ей спокойствие, гармонию и красоту. В целях реализации решений ЦК КПК государственные органы принимают постоянные меры по борьбе с шумом. В целях нормирования и снижения акустического загрязнения окружающей среды только с 2020 года было принято 293 общенациональных и локальных нормативных акта [2,3,6]. В «Проекте четырнадцатого пятилетнего плана развития национальной экономики и общества Китайской Народной Республики и перспективных целях на 2035 год» выдвигается четкое требование усилить контроль за шумовым загрязнением, а также осуществлять мероприятия по предотвращению и снижению акустического загрязнения и ускорению решения важных проблем, связанных с шумом и вызывающих обеспокоенность общества.

В соответствии с Государственным докладом «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2023 году» [4] комплексной нагрузке, связанной с шумом, подвержено 59,9 млн человек в 28 субъектах Российской Федерации (41,0% населения). В 2023 году Роспотребнадзор рассмотрел 22 805 жалоб на повышенные уровни шума.

Следует отметить, что автоматизированный контроль уровней шума в России не ведется, замеры уровней воздействия производятся по результатам рассмотрения жалоб населения. На контроле территориальных органов Роспотребнадзора находится более 1,2 миллиона потенциально опасных для здоровья человека промышленных объектов, уровни воздействия которых превышают ПДУ по шуму на 10,6% объектов и по вибрации на 6,4%. За 2023 год на территории жилой застройки проведено 91557 замеров, по результатам которых 17,9% территории не соответствуют гигиеническим нормативам. В 2023 году произошло увеличение на 2% численности населения, подверженного негативному влиянию шума автомобильного транспорта, рост интенсивности которого опережает реализацию шумозащитных мероприятий.

Следует отметить, что в Указе Президента РФ от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» значительное внимание уделено созданию безопасных и качественных автомобильных дорог. Для достижения этой цели требуется обеспечить увеличение доли автомобильных дорог, соответствующих нормативным требованиям, однако, вопросы негативного воздействия автомобильных дорог на состояние окружающей среды и здоровье населения в Указе не отобразены.

## 1. Законодательство в области контроля шума

«Закон Китайской Народной Республики о предотвращении и контроле шумового загрязнения окружающей среды» [5] вступил в силу 1 марта 1997 года, в период с 2018

по 2022 год в его положения внесены значительные изменения, и 5 июня 2022 года вступила в силу модифицированная редакция закона [6]. Этот закон устанавливает требования к мониторингу, оценке и контролю шума в окружающей среде, а также требует от правительств всех уровней защищать окружающую среду, предотвращать и контролировать шумовое загрязнение.

В новой версии приведена подробная классификация источников шума, перечислены чувствительные зоны и временные ограничения для общественной жизни, сфера контроля расширяется, в нее включены сельские районы, шум автомобильного и железнодорожного транспорта. К чувствительным к шуму зданиям относятся жилые здания, НИИ, государственные, социальные, лечебные и образовательные учреждения. К мероприятиям по контролю и снижению шума в чувствительных зонах применяются жесткие требования: запрещено строительство шумных промышленных объектов, при проведении строительных работ необходимо устанавливать системы автоматического контроля, запрещена установка громкоговорителей. Закон требует улучшить механизм контроля шумовых характеристик оборудования и средств транспорта, технические нормативы на них должны быть указаны в техническом паспорте. При этом предприятиям запрещено производить, импортировать или продавать некачественную продукцию, которая не соответствует установленным техническим нормативам по шуму. Предприятия, производящие шум, по аналогии с предприятиями, являющимися источниками выбросов, должны получать разрешение на шумовую эмиссию. В таком разрешении указывается срок и квота на эмиссию шума. Закон также уделяет пристальное внимание контролю дорожного шума. В дополнение к необходимости контроля шума при городском планировании, строительству инфраструктурных и транспортных объектов, он также требует от операторов городских железных дорог обеспечивать устойчивое функционирование вибро- и шумозащитных мероприятий. Должен быть налажен мониторинг шума вблизи автомобильных и железных дорог, аэропортов.

Самая обширная статья [6] посвящена юридической ответственности. Закон предусматривает штрафы в размере от 100 до 500 тыс. юаней, налагаемые на существующие и реконструируемые предприятия, за превышение норм и беспокойство населения в чувствительных зонах, в том числе при непринятии превентивных и контрольных мероприятий. При отказе исправить ситуацию выносится решение о закрытии предприятия. Штрафы в размере от 20 до 200 тыс. юаней предусмотрены за препятствование инспекционным проверкам, отсутствие контроля шума со стороны предприятия и не раскрытие информации о шуме. За строительство чувствительных к шуму зданий в зонах, где такое строительство запрещено, налагается штраф в размере от 2 до 10% стоимости СМР и выносится решение о демонтаже объекта. Строительные компании могут подвергнуться штрафу за отсутствие публичной информации о воздействии шума на строящееся здание и отсутствие в договоре купли-продажи

информации о звукоизоляции и расположении помещений.

Предусмотрены штрафы для транспортных объектов за нарушение ПДУ, ненадлежащее содержание и ремонт магистралей, а также шумо- и виброзащитных сооружений, отсутствие мониторинга шума. На сами автотранспортные средства и железнодорожный подвижной состав налагаются штрафы за отсутствие или повреждение штатных средств защиты от шума, несанкционированное использование сигнальных устройств, превышение скорости. Несоответствующие нормативам механизмы выводятся из эксплуатации до устранения несоответствий. На физические лица за несоблюдение нормативов в жилых зданиях накладывается штраф от 200 до 1000 юаней. Кроме того, любое нарушение положений Закона может повлечь за собой уголовную ответственность.

Контроль шума в России, в основном, регулируется Федеральным Законом «Об охране окружающей среды Российской Федерации» [7] и подзаконными актами. В соответствии с ФЗ в целях предотвращения негативного воздействия на окружающую среду хозяйственной и иной деятельности устанавливаются нормативы допустимых физических воздействий, в том числе шума. Закон говорит, что юридические и физические лица, осуществляющие эксплуатацию автомобильных и иных оказывающих негативное воздействие на окружающую среду транспортных средств, обязаны принимать меры по снижению уровня шума, а органы государственной власти и местного самоуправления, юридические и физические лица обязаны принимать необходимые меры по предупреждению и устранению негативного воздействия шума на окружающую среду в населенных пунктах, зонах отдыха, местах обитания диких зверей и птиц, на естественные экологические системы и природные ландшафты.

Чувствительные к шуму нормируемые объекты и допустимые уровни шума в них определены в СанПиН 1.2.3685-21 [8] и СП 51.13330.2011 [9], к ним относятся жилые здания, больницы, учебные заведения, гостиницы, их территории, а также помещения зданий различного назначения. СП 51.13330.2011 предъявляет требование по указанию шумовых характеристик оборудования в его паспорте, но не накладывает ограничений на их уровень. Федеральный закон 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» говорит о том, что юридические лица, осуществляющие хозяйственную деятельность на объектах I категории, обязаны получить комплексное экологическое разрешение, которое содержит нормативы допустимых физических воздействий (шума). Кроме того, вредное физическое воздействие на атмосферный воздух допускается на основании разрешения, выданного уполномоченным Правительством Российской Федерации федеральным органом исполнительной власти.

Для ограничения вредного воздействия согласно Постановлению Правительства от 3 марта 2018 г. № 222 «Об утверждении правил установления санитарно-защитных зон и использования земельных участков, расположенных в границах санитарно-

защитных зон» правообладатели объектов капитального строительства, обязаны провести исследования уровней шумового воздействия и установить санитарно-защитные зоны. Согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов» критерием для определения размера санитарно-защитной зоны является не превышение на ее внешней границе и за ее пределами ПДУ физического воздействия на атмосферный воздух.

Штраф за нарушение санитарно-эпидемиологических требований к эксплуатации жилых помещений и общественных помещений, зданий, сооружений и транспорта определен «Кодексом об административных правонарушениях (КоАП РФ)», размер штрафа для юридических лиц составляет от 10 до 20 тыс. рублей или административное приостановление деятельности на срок до девяноста суток.

## 2. Нормативные параметры шума

В настоящее время широко используемые критерии оценки шума включают: уровень звука, стандарт оценки шума NC, стандарт приоритетной оценки шума PNC и уровень оценки шума NR. Стандарт NC (Noise Criterion) – был установлен в США для оценки шума внутри помещений, создаваемого вентиляционным и другим оборудованием. Стандарт PNC (Preferred Noise Criterion) был разработан как модификация стандартов NC в связи с неприятным низкочастотным шумом систем кондиционирования воздуха. В этой модификации допустимые уровни шума на низких частотах ниже, чем для критерия NC. В Европе в качестве критерия используется альтернативный стандарт NR (Noise Rating) [10].

В таблице 2 приводятся вышеуказанные критерии, установленные для жилых помещений, в сравнении с предельно допустимыми уровнями (ПДУ), установленными российским СанПиН 1.2.3685-21 в дневное и ночное время [8]. Указанные в таблице спектры для критериев NC-30 и NR-30 соответствуют 30-35 дБА по уровню звука.

Следует отметить, что в зарубежной практике спальни и гостиные нормируются отдельно, разница в ПДУ для них составляет 5 дБА. Российские нормативы устанавливаются для всех жилых помещений, при этом для дневного времени они выше, а в ночное время ниже установленных за рубежом.

Нормы шума в России [8,9] устанавливают предельно допустимые уровни звука и его спектральные характеристики для различных типов застройки и помещений. Китайские нормы шума для городской среды обычно подразделяются в зависимости от назначения объекта, для которого устанавливаются конкретные требования к предельным уровням шума в разное время суток. В соответствии со «Стандартами экологического качества по шуму» [11], а также [5] в Китае выделяются пять категорий зон, для которых установлены ПДУ для территорий (таблица 3). Основным параметром для определения допустимых уровней шума являются уровни звука, скорректированные по шкале А (дБА).

Таблица 2

Сравнение различных критериев оценки шума

Критерий	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот, Гц								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
NR 30	76	59	48	40	34	30	27	25	23
NC-30	-	57	48	41	35	31	29	28	27
PNC-30	61	52	46	41	35	30	25	23	23
СанПиН 1.2.3685-21 (дневное время)	79	63	52	45	39	35	32	30	28
СанПиН 1.2.3685-21 (ночное время)	72	55	44	35	29	25	22	20	18

Таблица 3

Предельно допустимые уровни шума в разных зонах Китая

Категория	Описание	Уровень звука, дБА	
		Дневное время	Ночное время
0	Зоны санатория, вилл и отелей высокого класса, и другие особо чувствительные зоны. Если они расположены в сельской местности, применяется поправка -5дБА	50	40
1	Жилые дома, культурные, лечебные, образовательные учреждения, НИИ, администрации	55	45
2	Смешанная жилая застройка, коммерческие, промышленные зоны	60	50
3	Промышленные зоны, склады	65	55
4а	Территория по обеим сторонам магистральных дорог, вспомогательных железнодорожных линий, наземного метро, водных путей	70	55
4б	Территория вблизи основных грузонапряженных железнодорожных путей	70	60

Стандарт говорит, что в ночное время максимальные уровни шума не должны превышать указанные в таблице больше, чем на 15 дБА.

В [5] также установлено, что уровни на границе территории промышленного предприятия должны соответствовать ПДУ, установленным для зон 1-4, в зоне класса 0 промышленные предприятия не размещаются.

Следует отметить, что согласно отчету [2] 95,4% зон соответствуют установленным нормативам в дневное время и 82,9% в ночное время.

Отличие российских нормативов от китайских заключается в том, что ПДУ для жилой застройки, в какой бы зоне она ни находилась, не должны превышать величины 55 дБА в дневное и 45 дБА в ночное время, в российских нормах также установлены предельно допустимые уровни звукового давления по спектру и максимальные уровни звука. Промышленным предприятиям не обязательно соблюдать норматив на границе территории, т.к. для них могут быть установлены санитарно-защитные зоны, на границе которых уровни должны соответствовать ПДУ для жилой застройки.

В настоящее время основные нормативные документы Китая по оценке и снижению шума в жилых помещениях включают:

1. GB 50118-2010 Правила проектирования звукоизоляции гражданских зданий [12]
2. GB 50096-2011 Правила проектирования жилых помещений [13]

Допустимый уровень шума в зданиях различных типов – это уровень звука в дневное время при условии открытого окна. Оценка уровня шума в зданиях проводится в условиях наиболее интенсивной акустической нагрузки (в часы пик или при наиболее интенсивном режиме работы источника шума).

В Китае отдельно нормируются гостиные и спальни, в отдельную категорию выделяют помещения, пользующиеся повышенным спросом, для которых установлены более жесткие требования к уровням шума. ПДУ для жилых квартир, установленные согласно [12], приводятся в таблице 4.

Таблица 4

Допустимые уровни в жилых помещениях Китая

Вид помещения	Допустимый уровень шума (уровень звука, дБА)	
	днем	вечер или ночь
Спальни	$\leq 45$	$\leq 37$
Спальни (повышенного спроса)	$\leq 40$	$\leq 30$
Гостиная (зал)	$\leq 45$	
Гостиная (зал) (повышенного спроса)	$\leq 40$	

Следует отметить, что в России нормируются жилые помещения вне зависимости от того, спальня это или гостиная, ПДУ для них соответствуют нормативам для спален повышенного спроса в Китае. Однако в России при нормировании шума не выделяется вечернее время.

### 3. Мероприятия по снижению шума

В Китае активно развиваются технологии борьбы с шумом и вибрацией. Министерство экологии и окружающей среды выпустило «Каталог передовых национальных технологий предотвращения и борьбы с шумом и вибрацией», где в качестве основных мероприятий определены направленные глушители, вентилируемые окна с активными клапанами, акустические барьеры, плавающая система виброизоляции дорожного полотна, сборное геотекстильное плавающее виброизолирующее дорожное полотно. Используется вынос промышленных предприятий из чувствительных зон, с промышленных предприятий взимается экологический налог на шум. В 2021 году сумма штрафов за промышленный шум составила около 15 млн. юаней. Строительные организации должны производить автоматический контроль уровней шума во время строительства и при наличии превышений осуществлять компенсацию каждому домохозяйству за шум в ночное время в размере 70-277 юаней в месяц [6].

Особое внимание уделяется шуму источников автомобильного и железнодорожного транспорта, для вновь выпускаемых транспортных средств производится проверка уровней шума на соответствие техническим стандартам, устаревшие автомобили изымаются из обращения, запрещена подача звуковых сигналов. Вдоль автомагистралей устанавливаются акустические экраны, защитные зоны, в домах используются шумозащитные окна. Например, в Пекине установлено 14000 погонных метров вертикальных акустических экранов и 0,2 млн. погонных метров экранов галерейного типа.

В 2021 г. стоимость мероприятий по борьбе с шумом и вибрацией составила 11,5 млрд юаней [2].

Особое внимание уделяется информированию населения об уровнях акустического воздействия и снижение шума во время вступительных экзаменов. Так, в провинции Гуандун запущен проект «Тишина во время экзамена», для чего установлено 775 пунктов контроля тишины, выпущены информационные материалы.

Типичная программа борьбы с шумом на этапе проектирования объекта включает следующее:

1. Городское планирование. Городскую застройку следует рационально планировать, чтобы избежать шумового воздействия, уделяя особое внимание чувствительным к шуму территориям (школам, больницам и жилым домам). Рациональное зонирование является эффективным способом снижения дорожного шума. При выборе строительных площадок

следует учитывать категорию зоны. Одиночные здания с высокими требованиями к тишине следует устанавливать с наветренной стороны от основного источника звука с учетом преобладающего направления ветра в данном районе. При планировании застройки вдоль транспортных магистралей источники шума должны располагаться как можно дальше от чувствительных к шуму зон, а жилые дома должны отделяться от дорог защитными зонами. Для существующих магистралей следует принимать во внимание ожидаемые уровни шума с учетом развития дорожного движения, снижению которых следует уделять приоритетное внимание.

2. Экологизация территории. Широко используемым методом борьбы с шумом является озеленение территории: улиц, дворов, самих зданий. Газоны или густая полоса зеленых насаждений, расположенные между источником шума и зданием могут снизить шумовое воздействие. В озеленении зданий используется сочетание травянистых и кустарниковых зеленых поясов. Звукопоглощающая способность растений зависит от шероховатости поверхности листьев, площади и плотности кроны. Считается, что правильное проектирование расположения, высоты и длины шумозащитных зеленых насаждений позволяет снизить шум на 7–24 дБ на различных частотах [2].

3. Другие меры. Для снижения транспортного шума применяются акустические экраны и шумозащитные окна. Акустические экраны обычно изготавливаются из слоя плотного материала, чтобы передаваемый сквозь него звук был намного ниже, чем дифрагированный звук, таким образом, за экраном образуется звуковая тень.

4. Применение строительных материалов. В настоящее время для возведения наружных стен зданий рекомендуется использовать газобетонные блоки, однако их звукоизоляционные характеристики уступают кирпичным стенам. Звукоизоляцию можно повысить за счет утолщения слоя штукатурки. В зависимости от вида фасада здания и его функционального предназначения площадь окон может увеличиваться, а звукоизоляционные характеристики окон намного ниже, чем у несущей стены. Звукоизоляционные характеристики окон зависят от толщины, количества слоев, расстояния между стеклами, конструкции и степени герметизации. Фактические измерения показывают, что показатели звукоизоляции оконных рам из алюминиевого сплава лучше, чем у окон из пластика на средних и высоких частотах. При использовании стеклопакетов слой стекло + воздушный слой + стекло обеспечивает как энергосберегающий, так и звукоизоляционный эффект.

Согласно [12] для внешних ограждающих конструкций зданий установлены требования к индексу звукоизоляции. Индекс звукоизоляции окон спален и гостиных, выходящих на транспортную магистраль, должен быть не менее  $R_w + C_{tr} \geq 30$  дБ. Для других окон допускается  $R_w + C_{tr} \geq 25$  дБ. Звукоизоляция стены должна составлять  $R_w + C_{tr} \geq 45$  дБ.

Также рекомендуется, чтобы при определении формы здания, ориентации и

планировке жилых помещений учитывалось воздействие шума. Окна спален и гостиных желательно ориентировать на фасад, обратный источнику шума. Если же спальня или гостиная расположены со стороны источника шума, наружные окна должны иметь повышенную звукоизоляцию [13].

В России, в целом, применяются аналогичные шумозащитные мероприятия, наиболее распространенным мероприятием по снижению шума транспорта являются акустические экраны и шумозащитное остекление [14]. При этом индекс звукоизоляции для внешних ограждающих конструкций (стен зданий) в нормативах не установлен, а определяется расчетом.

### **Заключение**

Россия и Китай уделяют самое пристальное внимание борьбе с шумом, проводится мониторинг уровней шума вблизи источников и на территории застройки. В обеих странах введены в силу законодательные мероприятия по обеспечению нормативных уровней шума в окружающей среде и на нормируемых объектах. За превышение предельно допустимых уровней установлены штрафы, размер которых в Китае в 20-30 раз выше, чем в России.

Нормативные уровни, установленные для территории жилой застройки и для жилых помещений аналогичны, однако, в Китае существует зонирование по функциональному назначению территории, в зависимости от которого ПДУ могут быть увеличены. Для помещений вводится концепция повышенного спроса, для данной категории установлены самые жесткие нормативы, для стандартных помещений ПДУ повышаются на 5-7 дБА, отдельно рассматриваются спальни и гостиные по аналогии с западными стандартами. При этом в законе отдельно оговаривается ответственность застройщика о раскрытии информации об уровнях шума, воздействующих на жилые помещения.

В России для предприятий устанавливаются санитарно-защитные зоны, на границе которых должен обеспечиваться ПДУ для жилой застройки, в Китае же ПДУ должны соблюдаться уже на границе предприятий.

В России и Китае, в целом, применяются аналогичные шумозащитные мероприятия. В Китае большее внимание уделяется снижению шума в источнике, но для снижения шума транспорта также используются акустические экраны и шумозащитное остекление, при этом в Китае более распространены экраны галерейного типа и остекление с активными проветривателями, используется шумозащитное озеленение территории и самих зданий.

### **Список литературы**

1. Zhou J, Shi Z, Zhou L, et al. Профессиональная тугоухость, вызванная шумом, в Китае: систематический обзор и мета-анализ. *BMJ Open* 2020; 10:e039576. doi:10.1136/bmjopen-2020-039576.

2. Ежегодный отчет о предотвращении и контроле шумового загрязнения в Китае. Министерство экологии и окружающей среды Китайской Народной Республики, 2022. - 36 р.
3. HJ 2.4-2021 (HJ2.4-2021) Техническое руководство по оценке воздействия шума. Постановление Министерства экологии и окружающей среды № 76 от 2021 года.
4. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2023 году: Государственный доклад. Москва: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2024. – 364 с.
5. Закон Китайской Народной Республики о предотвращении и контроле шумового загрязнения окружающей среды, принят Постоянным комитетом восьмого Всекитайского собрания народных представителей на двадцатом заседании 29 октября 1996 года, вступает в силу с 1 марта 1997 года. 《中华人民共和国环境噪声污染防治法》已由中华人民共和国第八届全国人民代表大会常务委员会第二十次会议于1996年10月29日通过，现予公布，自1997年3月1日起施行 [https://www.gov.cn/bumenfuwu/2012-11/13/content\\_2601278.htm](https://www.gov.cn/bumenfuwu/2012-11/13/content_2601278.htm)
6. Закон Китайской Народной Республики о предотвращении и борьбе с шумовым загрязнением [действующий] 中华人民共和国噪声污染防治法 [现行有效] [法宝引证码] CLI.1.5112804(EN), 2022.
7. Федеральный закон от 10.01.2002 N 7-ФЗ «Об охране окружающей среды».
8. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 №2.
9. СП 51.13330.2011 Защита от шума.
10. The Engineering ToolBox (2004). PNC - предпочтительный критерий шума. [Онлайн] Доступно на: [https://www.engineeringtoolbox.com/pnc-preferred-noise-criteria-d\\_727.html](https://www.engineeringtoolbox.com/pnc-preferred-noise-criteria-d_727.html).
11. GB 3096-2008 Стандарты качества окружающей среды для шума.
12. GB 50118-2010 (GB50118-2010) Кодекс для проектирования звукоизоляции гражданских зданий, Министерство жилищного строительства и городского хозяйства №744, 2010.
13. GB 50096-2011 Правила проектирования жилых помещений GB 50096-2011 (GB50096-2011). Проектный кодекс для жилых зданий [официальная / академическая версия - отсканированный PDF, переведенный Комитетом по стандартизации / Научно-исследовательским институтом в Китае], Бюллетень Министерства жилищного строительства и городского хозяйства № 1093, 2012.
14. Буторина М.В., Иванов Н.И., Шашурин А.Е. Основы виброакустики. Теория и практика борьбы с шумом и вибрацией. Том 2: учебник, 381 с. / 978-5-00221-126-5.

## References

1. Zhou J, Shi Z, Zhou L, et al. Occupational noise-induced hearing loss in China: a systematic review and meta-analysis. *BMJ Open* 2020; 10:e039576. doi:10.1136/bmjopen-2020-039576.
2. Annual Report on Prevention and Control of Noise Pollution in China. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2022. – 36 p.
3. HJ 2.4-2021 (HJ2.4-2021) Technical guidelines for noise impact assessment. Regulation (derived from) Ministry of Ecology and Environment Announcement No. 76 of 2021.
4. On the state of sanitary and epidemiological well-being of the population in the Russian Federation in 2023: State report. Moscow: Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare, 2024. - 364 c.
5. 《中华人民共和国环境噪声污染防治法》已由中华人民共和国第八届全国人民代表大会常务委员会第二十次会议于1996年10月29日通过，现予公布，自1997年3月1日起施行 [https://www.gov.cn/bumenfuwu/2012-11/13/content\\_2601278.htm](https://www.gov.cn/bumenfuwu/2012-11/13/content_2601278.htm)
6. Law of the People's Republic of China on Noise Pollution Prevention and Control [Effective] 中华人民共和国噪声污染防治法 [现行有效] 【法宝引证码】CLI.1.5112804(EN), 2022.
7. Federal Law dated 10.01.2002 N 7-FZ “On Environmental Protection”.
8. SanPiN 1.2.3685-21 “Hygienic norms and requirements to ensure safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans”. Approved by the Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated 28.01.2021 No. 2.
9. SP 51.13330.2011 Protection against noise.
10. The Engineering ToolBox (2004). PNC - the Preferred Noise Criterion. [online] Available at: [https://www.engineeringtoolbox.com/pnc-preferred-noise-criteria-d\\_727.html](https://www.engineeringtoolbox.com/pnc-preferred-noise-criteria-d_727.html) [Accessed Day Month Year].
11. GB 3096-2008 Environmental quality standards for noise.
12. GB 50118-2010 (GB50118-2010) Code for design of sound insulation of civil buildings, Ministry of Housing and Urban Notice No. 744, 2010.
13. GB 50096-2011 Правила проектирования жилых помещений GB 50096-2011 (GB50096-2011). Design code for residential buildings [Quasi-Official / Academic version - scanned PDF, translated by Standard Committee / Research Institute in China], Bulletin of the Ministry of Housing and Urban No. 1093, 2012.
14. Butorina M.V., Ivanov N.I., Shashurin A.E. Fundamentals of Vibroacoustics. Theory and Practice of Noise and Vibration Control. Volume 2: Handbook, 381 p. / 978-5-00221-126-5.



## Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф.Устинова

Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ", далее Военмех, является ярким представителем инженерной школы России, сумевшим сохранить и приумножить достижения отечественного и мирового инженерно-технического образования.

ВУЗ был образован приказом по Народному Комиссариату тяжелой промышленности СССР от 26 февраля 1932 г. № 109 как Ленинградский военно-механический институт. Здесь осуществлялась подготовка рабочих средней квалификации с инженерным образованием, углубленным в узкую заводскую специальность (механиков и теплотехников).

Военмех сегодня — это почти 2000 преподавателей и работников учебно-вспомогательного персонала, более 5000 студентов.

Традиции Военмеха и продолжающееся тесное сотрудничество с высокотехнологичными предприятиями РФ позволяют ВУЗу успешно вести подготовку инженеров, бакалавров и магистров для ведущих предприятий РФ, в том числе, оборонно-промышленного комплекса. Военмех — участник многих региональных и городских программ по целевой подготовке, закреплению и переподготовке кадров для промышленного производства, в том числе, авиационно-космических и электронно-приборостроительных предприятий страны.

*И.о. ректора:* Шашурин Александр Евгеньевич, доктор технических наук, профессор

### Кафедра "Экология и производственная безопасность"

Кафедра "Экология и производственная безопасность" была организована в Военмехе в августе 1984 года, возглавил кафедру д.т.н., профессор Николай Игоревич Иванов, заслуженный деятель науки Российской Федерации, автор свыше 400 научных трудов, в том числе около 10 учебников, справочников и монографий. Преподавателями кафедры разработаны и читаются более 30 учебных курсов, обеспеченных учебниками и учебными пособиями, кафедра оснащена лабораторной базой, современными компьютерами и программными комплексами. На кафедре создана научная школа акустики транспортных машин, проектирования шумозащитных конструкций, картирования шума, получившая широкое, в том числе международное, признание. Основные направления исследований - разработка новых методов расчета и основ проектирования шумовиброзащиты, разработка карт шума территории жилой застройки, экспериментальные исследования излучения шума и вибрации и средств шумо-виброзащиты. Основные результаты научных исследований публикуются учеными кафедры в научных изданиях, докладываются на международных конгрессах и конференциях в Российской Федерации, Австралии, Австрии, Венгрии, Германии, Дании, Италии, Канаде, Китае, Нидерландах, Польше, Португалии, США, Финляндии, Швейцарии, Швеции и других странах. Ученые кафедры работают в направлениях экологии, производственной безопасности, виброакустики и прикладной механики.

С 2001 года кафедра является выпускающей. В настоящее время кафедра готовит специалистов по направлениям:

Бакалавриат:

- Прикладная механика («Цифровые технологии в виброакустике и прочности» 15.03.03);
- Техносферная безопасность ("Безопасность технологических процессов и производств" 20.03.01);

Магистратура:

- Прикладная механика ("Акустическое зрение" 15.04.03);
- Техносферная безопасность ("Инженерная защита окружающей среды" 20.04.01; "Производственная безопасность" 20.04.01; "Управление экоэффективностью предприятия" 20.04.01).

На базе кафедры действует диссертационный совет Д 24.2.272.02 по специальностям:

1.3.7 - Акустика (технические науки)

2.10.3 - Безопасность труда

В диссертационном совете с 1997 года защищено 31 кандидатская диссертация и 20 докторских диссертаций.



## Общество с ограниченной ответственностью "Институт акустических конструкций"

ООО "ИАК" занимается разработкой шумозащитных мероприятий более 10 лет.

Организационная структура предприятия:

- отдел акустики;
- отдел проектирования;
- испытательная лаборатория, аккредитованная на измерения физических факторов;
- отдел строительства;
- отдел научных исследований и разработок;
- отдел внедрения;
- планово-экономический отдел.

За годы работы организацией запроектировано большое количество шумозащитных конструкций в различных регионах России (на скоростных автомагистралях, мостах, железных дорогах, эстакадах), в том числе и на таких масштабных объектах, как Кольцевая автодорога и Западный Скоростной диаметр в Санкт-Петербурге, объектах олимпийского Сочи и Республики Крым, реконструкции федеральных автодорог М-8 "Холмогоры", М-4 "Дон" и др. Организацией выполняются проектно-изыскательские работы по проектированию шумозащиты на первой в России Высокоскоростной железнодорожной магистрали "Москва-Казань". Силами испытательной лаборатории осуществляются акустические исследования, отделами акустики и проектирования разрабатываются шумозащитные мероприятия на промышленных, энергетических, культурных и оздоровительных объектах нашей страны. Производство, организованное на базе предприятия, позволяет выпускать любые шумозащитные конструкции, отвечающие всем требованиям государственных стандартов, а опытный персонал в кратчайшие сроки производит сборку и монтаж.

*"Наша компания обладает мощными научным и проектным подразделениями с современными технической и интеллектуальной базой, позволяющими 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 наш окружающий мир тише"*

## **X ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ «ЗАЩИТА ОТ ШУМА И ВИБРАЦИЙ»**

[noise-conf.com](http://noise-conf.com)

**01-03 октября 2025 (очный/дистанционный формат)**

**Организатор конференции - Балтийский государственный технический  
университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, Россия**

Работа конференции будет проходить в форме пленарных и секционных заседаний, в которых будут рассмотрены проблемы виброакустики и защиты от шума, в том числе, по направлениям:

- архитектурная и строительная акустика;
- аэроакустика;
- судовая акустика;
- акустические материалы и метаматериалы;
- акустическая эмиссия и диагностика;
- виброакустические измерения и стандартизация;
- численные методы оценки звуковых и вибрационных полей;
- карты шума;
- образование и снижение шума и вибрации в источнике;
- средства и методы шумо- и виброзащиты;
- методы активного снижения шума и вибрации;
- средства индивидуальной защиты от шума и вибрации;
- применение технологии информационного моделирования (ТИМ) при разработке шумозащитных мероприятий;
- физиологическая виброакустика.

**Желающим принять участие в конференции необходимо пройти регистрацию на официальном сайте конференции - [noise-conf.com](http://noise-conf.com).**

Участникам конференции предоставляется возможность опубликовать статьи в сборнике трудов конференции в электронном формате (РИНЦ) и в реферируемом журнале «Noise Theory and Practice», далее журнале (**журнал включен в перечень ВАК, категория К2**). Прием статей для участия в качестве докладчика осуществляется до **20 июня 2025 года**. Требования по оформлению статей для опубликования в сборнике трудов конференции размещены на официальном сайте конференции.

### **КОНТАКТЫ**

**Сервис-агент конференции:**

Компания «МОНОМАКС»

**Ипатова Екатерина**

Тел.: +7 960 2793177

(в т.ч. WhatsApp, Viber, Telegram)

E-mail: [noise2025@onlinereg.ru](mailto:noise2025@onlinereg.ru)

**Оргкомитет конференции:**

Балтийский государственный технический  
университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Кафедра Е5 «Экология и производственная  
безопасность»

Санкт-Петербург, 1-ая Красноармейская ул., д.1

# 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, защита от шума и вибрации.

## Основные задачи

Основными задачами журнала являются:

- отражение последних достижений фундаментальной виброакустики, теории и практике борьбы с шумом и вибрацией, 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 планируемых конференциях, семинарах, проводимых в России и других странах;
- предоставление архивных материалов трудов научных конференций, посвященных виброакустике.

## Научное цитирование журнала

Журнал является общедоступным для чтения неограниченным числом пользователей.

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

Журнал "Noise Theory and Practice" включен в ПЕРЕЧЕНЬ рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени кандидата и доктора наук (категория К2, п. 788).

Cover designed by Freepik

ООО "ИАК"

г. Санкт-Петербург

2025