

ISSN 2412-8627

Vol. 9 No. 3

12+

Noise

Theory and Practice

Scientific Journal



III
2023

Acoustic Design Institute

Редакционная коллегия

Главный редактор

Иванов Николай Игоревич



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

Члены редакционной коллегии

Шашурин Александр Евгеньевич



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

Заплетников Игорь Николаевич



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

Элеонора Карлетти



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

Серджио Луцци



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

Тюрин Александр Павлович



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

Васильев Андрей Витальевич



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

Тупов Владимир Борисович



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

Цукерников Илья Евсеевич



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

Буторина Марина Вадимовна



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

Тюрина Наталья Васильевна



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

Рассошенко Юлия Сергеевна



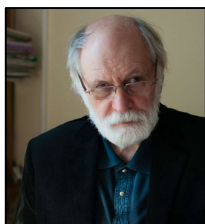
Кандидат технических наук, доцент кафедры "Экология и производственная безопасность" Балтийского государственного технического университета "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова (г. Санкт-Петербург, РФ)

Дэвид Копли



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

Емельянов Владислав Николаевич



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

Элькин Юрий Иосифович



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

Editor-in-chief

Nickolay Ivanov



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

Members of the Editorial Board

Aleksandr Shashurin



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

Igor Zapletnikov



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

Eleonora Carletti



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

Sergio Luzzi



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

Alexander Tyurin



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

Andrey Vasilyev



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

Vladimir Tupov



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

Ilya Tsukernikov



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

Marina Butorina



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

Natalya Tyurina



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

Iuliia Rassoshenko



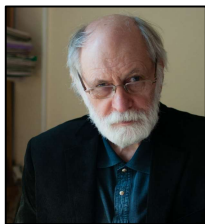
Ph.D. of Engineering Science, Senior Researcher of the Scientific Research Unit, Assistant Professor of the Department of Ecology and Industrial Safety of the Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov (St. Petersburg, Russia)

David Copley



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

Vladislav Emelyanov



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

Yuri Elkin



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

Научный журнал

Том 9 №3

Учредитель

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

Сетевой Научный Журнал 'Noise Theory and Practice'

выпускается с 2015 г.

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

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

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

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

Фактический адрес редакции

Россия, г. Санкт-Петербург,
Наб. Обводного канала, д. 138, к 7,
Литера А, пом. 11-Н, офис 2-2А
+7 (812) 495-77-97

www.noisetp.com

e-mail: secretary@noisetp.com

Ответственный секретарь

Храпко Н. Н.

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

Свидетельство

ЭЛ № ФС 77-74057

Содержание

Марфин Е.А., Абдрашитов А.А.

РУС

Численные и экспериментальные исследования
генерации звука в струйном осцилляторе
Гельмгольца с целевой камерой

стр. 7-17

Борцова С.С., Забалканская Л.Э.

РУС

Оптимизация комплекса мероприятий
для защиты от железнодорожного шума

стр. 18-32

Костив А.Е.

РУС

Шум при дыхании водолаза в оборудовании
со шланговой подачей дыхательной смеси

стр. 33-41

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., Abdrashitov A.A.

RUS

Numerical and experimental studies of sound generation in a jet-driven Helmholtz oscillator with a slit chamber

pp. 7-17

Bortsova S.S., Zabalkanskaya L.E.

RUS

Optimization of a set of measures for protection against railway noise

pp. 18-32

Kostiv A.E.

RUS

Breathing noise of a diver with surface-supplied diving equipment with umbilical cable

pp. 33-41

УДК: 541.183.5
OECD: 1.03.AA

Численные и экспериментальные исследования генерации звука в струйном осцилляторе Гельмгольца с щелевой камерой

Марфин Е.А.^{1*}, Абдрашитов А.А.²

¹ Ведущий научный сотрудник

² Младший научный сотрудник

^{1,2} Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань, Россия

Аннотация

В работе представлены результаты исследования струйного осциллятора Гельмгольца, представляющего собой осесимметричный канал переменного сечения, который состоит из цилиндрической камеры-резонатора, закрытой с боков двумя крышками. Осциллятор возбуждается струей воздуха, протекающей через камеру между входным и выходным отверстиями, выполненных по центру в боковых крышках. Основное внимание в работе уделено экспериментальному изучению влияния диаметра и длины выходного отверстия на амплитуду генерируемых колебаний давления. Определены оптимальные соотношения геометрических параметров устройства, при которых достигается максимальная амплитуда колебаний. Численное моделирование позволило лучше понять поле течения газа внутри осциллятора, подчеркнув сложную динамику струйного течения и резонанс акустической моды, а также обосновать механизм генерации колебаний. Полученные результаты и установленные зависимости позволят спроектировать проточные излучатели колебаний давления для различных приложений и, в частности, для реализации акустического воздействия на добычу нефти.

Ключевые слова: струйная генерация, тон отверстия, резонанс, акустические моды, резонатор Гельмгольца.

Numerical and experimental studies of sound generation in a jet-driven Helmholtz oscillator with a slit chamber

Marfin E.A.^{1}, Abdrashitov A.A.[2]*

¹ *Leading Researcher*

² *Junior Researcher*

^{1,2} *Institute of Power Engineering and Advanced Technologies, FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia*

Abstract

The paper reports on a study of the jet-driven Helmholtz oscillator, an axisymmetric channel with a varying cross-section that comprises a cylindrical resonator chamber closed by two covers. The oscillator is stimulated by a stream of air that flows through the chamber via inlet and outlet holes, located centrally in the side covers. The study focuses on experimentally investigating how the diameter and length of the outlet affect the amplitude of generated pressure oscillations. The optimal ratios for the device's geometrical parameters are identified for achieving maximum oscillation amplitude. Numerical simulations have facilitated a deeper comprehension of the gas flow field within the oscillator, highlighting the intricate dynamics of the

jet flow and resonance of the acoustic mode, while also substantiating the mechanism of oscillation generation. The obtained outcomes and established relationships will pave the way for the design of flow-through pressure fluctuation radiators to be utilised in various applications, particularly in the implementation of acoustic impact on oil production.

Keywords: *jet generation, hole tone, resonance, acoustic modes, Helmholtz resonator.*

Введение

Шумы и вибрации очень часто являются нежелательными явлениями и с ними необходимо бороться. Однако, в ряде практических применений воздействие интенсивными упругими колебаниями оказывает положительный эффект. Например, известно, что акустическое воздействие на нефтяной пласт интенсифицирует добычу нефти. Результатом такого воздействия, помимо повышения темпа отбора нефти, является увеличение коэффициента извлечения нефти, снижение ее обводненности и энергетических затрат [1-3]. Для осуществления продолжительного воздействия целесообразно использовать проточные излучатели, преобразующие часть энергии потока нагнетаемой в пласт жидкости в энергию колебаний давления.

Одной из наиболее перспективной конструкцией проточного излучателя является устройство со струйным осциллятором Гельмгольца (СОГ), в котором отсутствуют подвижные элементы. Сам осциллятор выполнен из цилиндрической камеры с двумя боковыми крышками, в которых по центру выполнены отверстия [4]. С акустической точки зрения такая конструкция представляет собой резонатор Гельмгольца с двумя горлами, частота собственных колебаний которого определяется его геометрическими параметрами и свойствами рабочей среды. Закачиваемая в скважину технологическая жидкость протекает через СОГ, за которым в потоке возникают регулярные колебания давления на частотах близких к собственным.

Исследованию процесса возбуждения резонатора Гельмгольца потоком посвящено много работ. Наиболее полезный экспериментальный материал для проектирования СОГ содержится в работе [4], автор которой определил, что при плавном увеличении скорости W воздушной струи режим в камере проходит через последовательность периодов колебаний – мод, разделенных периодами покоя. При этом частота колебаний давления в каждой моде близка к частоте собственных колебаний камеры f_0 . В основе механизма генерации мод колебаний лежит тон отверстия, который возникает при натекании струи на острую кромку отверстия в выходной крышке [5-6]. Частотные и фазовые характеристики такого тона описаны в работе [7]. Нашими предыдущими исследованиями показано, что эффективность генерации колебаний в первую очередь зависит от геометрической формы [8] и длины [9] сопла во входной крышке. Также показано [10], что возбуждение акустических мод производится не только тоном отверстия, но и его гармониками. Целью настоящей работы является исследование процесса зарождения тона отверстия и изучение влияния длины выходного отверстия на амплитуду генерируемых колебаний.

1. Численное моделирование газодинамики потока в проточном канале СОГ с целевой камерой

Объектом исследования в работе является СОГ (рис.1), который имеет цилиндрическую камеру диаметром D и длиной L . Во входной крышке толщиной l_1 по центру выполнено сопло в виде цилиндрического отверстия диаметром d_1 . В выходной крышке толщиной l_2 также по центру выполнено выходное отверстие диаметром d_2 .

Значения геометрических размеров осциллятора представлены в Таблице 1. Поскольку длина камеры L значительно меньше ее диаметра D , то такую камеру можно назвать щелевой. Рабочим агентом при численном моделировании и экспериментальных исследованиях являлся воздух. Численные расчеты проводились с использованием математической модели течения жидкости, включающий уравнения Навье-Стокса, неразрывности и сохранения энергии. Расчетная область, включающая проточный канал осциллятора, была построена в системе CAD моделирования.

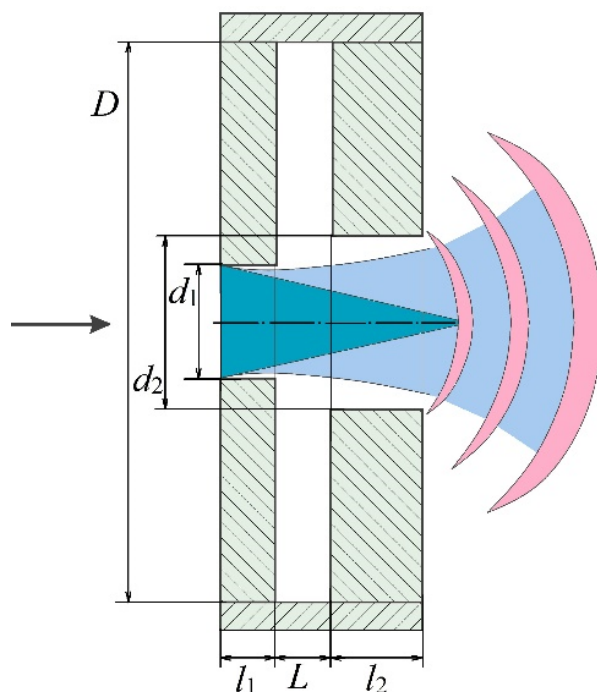


Рис. 1. Схема струйного осциллятора Гельмгольца с щелевой камерой

Таблица 1

Геометрические размеры струйного осциллятора Гельмгольца

Параметр	Значение
Диаметр резонансной камеры D , мм	78
Длины резонансной камеры L , мм	2-14
Диаметр входного сопла d_1 , мм	12
Длина входного сопла l_1 , мм	10
Диаметр выходного отверстия d_2 , мм	13-24
Длина выходного отверстия l_2 , мм	0,9-12

Численное моделирование течения газа в СОГ осуществлялось с помощью пакета FlowVision, основанном на конечно-объемном методе решения, на вычислительном сервере SuperMicro SYS-7049-TR (512 Гб оперативной памяти). Граничными условиями задачи были: на входе – постоянное давление; на стенках – условие прилипания; на выходе – нулевое давление (свободный выход). Результатами численного моделирования являлись мгновенные картины распределения модуля скорости и ее компонент в осевом сечении расчетной области, а также записанные в фиксированных точках области для каждой итерации значения давления и скорости. Общее число расчетных ячеек области более 330 тысяч.

Несмотря на то, что на входе было задано постоянное значение давления, моделируемый процесс оказался нестационарным. В резонансной камере наблюдались интенсивные колебания давления. Скорость струи была также нестационарная. При этом, значение характерной частоты процесса было близким к расчетному значению собственной частоты резонатора Гельмгольца с двумя горлами [11]. На рисунке 2 представлены картины распределения компонентов скорости в осевом сечении осциллятора при давлении на входе $P_{вх} = 5000$ Па после 250 тысяч итераций. Анализ полученных данных позволяет утверждать, что наблюдаемый автоколебательный процесс изменяет форму струи, которая сильно отличается от классической турбулентной или ламинарной затопленной струи. В частности, можно наблюдать как в струе существуют области повышенной скорости (рис.2а). Это объясняется «поджатием» струи, которое обусловлено влиянием вихревых структур вокруг струи, перемещающимися вниз по потоку со скоростью W_k меньшей примерно в 2 раза, чем скорость струи W [12].

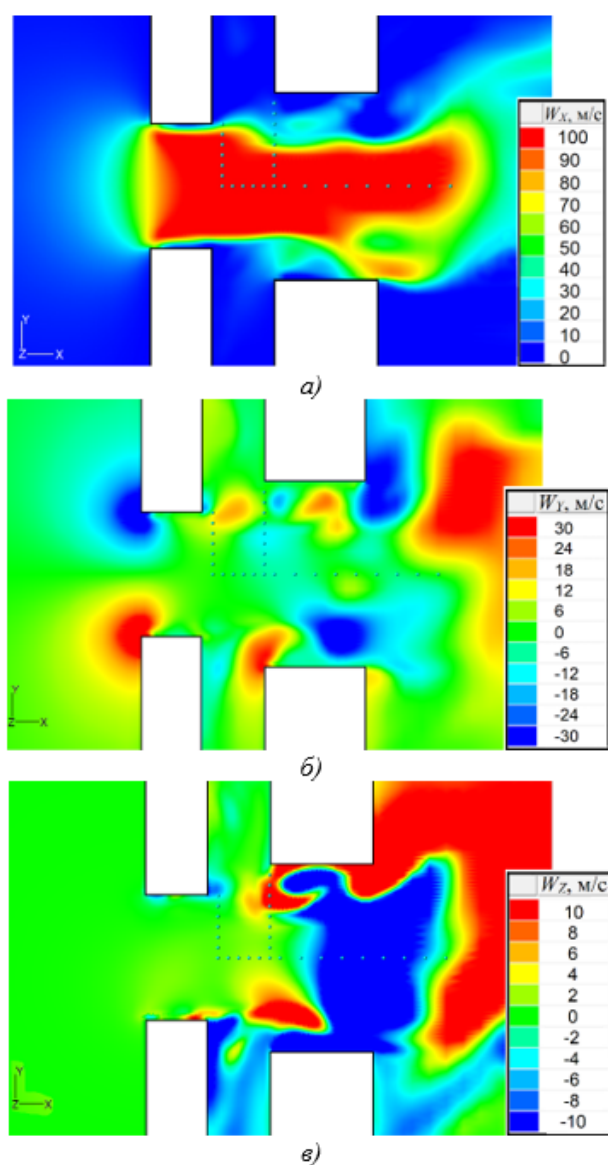


Рис. 2. Распределение X (а), Y (б) и Z (в) компонент скорости в осевом сечении осциллятора

О присутствии вихревых структур говорят смежные области положительных и отрицательных значений Y -компонент струи (рис.2б). Интересным результатом

полученных данных является то, хоть расчетная область является осесимметричной при течении жидкости формируются закрученные потоки. В данном случае закрутка потока пограничной зоны начинается внутри входного сопла и имеет направление против часовой если смотреть по направлению потока струи. Об этом говорят синие и красные области Z -компоненты скорости внутри входного сопла (рис.2в). Подобное явление описано в работе [13], посвященной исследованию механизма саморегулированию акустических колебаний в закрученном течении.

Спектральные характеристики колебаний компонент скорости вблизи среза выходного сопла представлены на рисунке 3. Видно, что максимальные колебаний имеются у X -компоненты скорости и эти колебания имеют два выраженных пика. Второй пик имеет частоту в 2 раза большую, чем первый, и эта частота близка к расчетному значению частоты собственных колебаний осциллятора. Амплитуды колебаний Y - и Z -компонент скорости примерно в 3 раза меньше колебаний X -компоненты скорости.

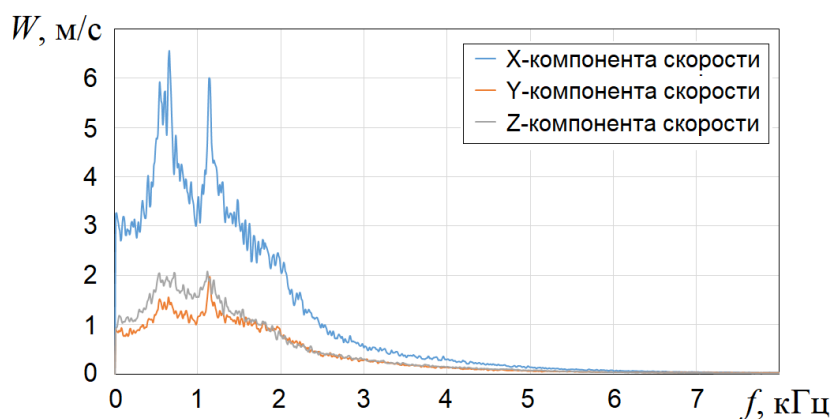


Рис. 3. Спектры колебаний скорости

На рисунке 4 представлены профили средней скорости потока в струе у среза входного сопла (голубая линия) и среднеквадратичного значения амплитуды колебаний скорости потока (красная линия). Видно, что в цилиндрическом сопле струя не полностью заполняет сечение сопла, ее профиль имеет вид близкий к прямоугольному. Колебания скорости потока в струе зависят от расстояния до оси струи. Если в центре струи среднеквадратичное значение амплитуды колебаний скорости примерно постоянно и составляет около 4,5% от скорости струи, то на расстоянии $0,42d_1$ амплитуда колебаний скорости сильно увеличивается и составляет 38% от средней скорости в данной точке. Полученные данные свидетельствуют о том, что в этой области начинаются процессы формирования и срыва вихревых структур.

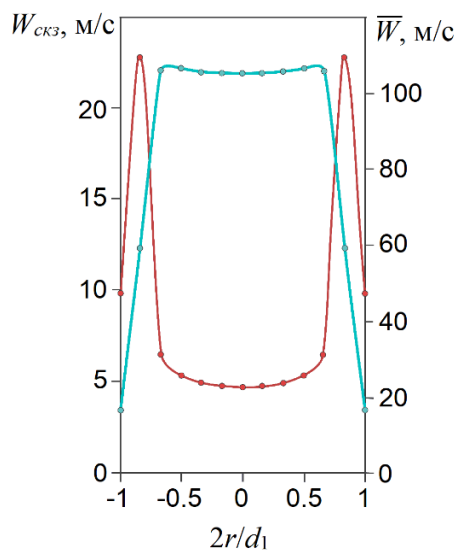


Рис. 4. Профили среднеквадратичной амплитуды колебаний скорости (голубая линия) и средней скорости (красная линия) у среза входного сопла

Сопоставление спектров колебаний давления в середине камеры и колебаний скорости струи, а именно то, что спектры колебаний давления в камере и колебаний скорости в центре струи практически совпадают (рис.5), предполагает следующую последовательность событий. Вихревые структуры вокруг струи при натекании на кромку выходного отверстия генерируют колебания давления (тон отверстия), которые усиливаются резонатором Гельмгольца на частотах, близких к собственным. При этом часть колебаний с частотами выше и ниже резонансной поглощаются. Далее, колебания давления в камере воздействуют на тело струи, что приводит к регулярным колебаниям скорости на частоте собственных колебаний (рис.5 серая кривая). Таким образом, по результатам численных исследований предложен механизм генерации колебаний в струйном осцилляторе Гельмгольца.

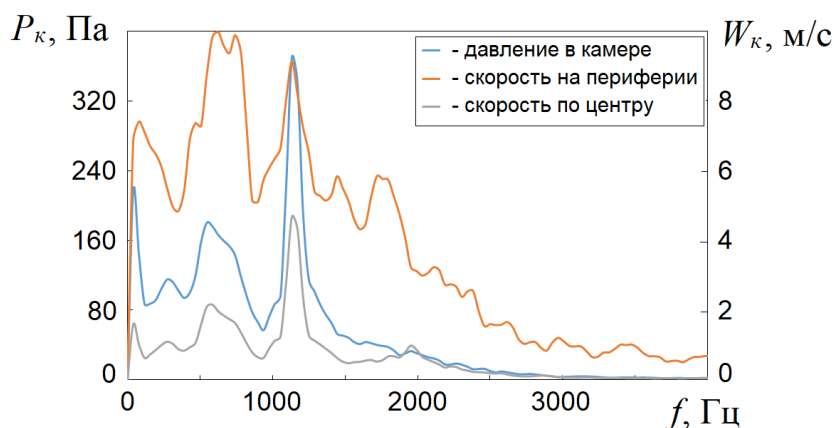


Рис. 5. Сопоставление спектров колебаний давления и скорости

2. Экспериментальное исследование процесса генерации звука в СОГ с щелевой камерой

Физическая модель струйного осциллятора Гельмгольца была выполнена из отрезка пластиковой трубы. С торцов он был закрыт вставленными в него неподвижными крышками из плексигласа, в которых выполнены цилиндрические отверстия. Расстояние между крышками жестко фиксировалось. Геометрические размеры осциллятора представлены в Таблице 1. Частота собственных колебаний такого резонатора может быть рассчитана по формуле (1), в которой эффективные длины отверстий зависят от их диаметра [11]:

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi D} \sqrt{\frac{1}{L} \left(\frac{d_1^2}{l_1} + \frac{d_2^2}{l_2} \right)}, \quad (1)$$

где c_0 – скорость звука в рабочей среде, м/с; D – внутренний диаметр камеры резонатора, м; L – длина камеры резонатора, м; d_1, d_2 – диаметры входного сопла и выходного отверстия, м; l_1, l_2 – эффективные длины входного сопла и выходного отверстия.

Варьируемыми параметрами в эксперименте были диаметр и длина выходного отверстия, и длина камеры (расстояние между крышками). Серия экспериментов для каждого варианта излучателя была проведена на стенде, описанном в работах [8-10], в диапазоне скорости струи от 0 до 100 м/с.

Увеличение перепада давления на излучателе при помощи вакуумного насоса приводит к формированию струи, скорость которой определяется свойствами рабочего агента (в нашем случае воздуха) и значением перепада давления, которое измеряется тензометрическим датчиком разности давления. При определенном значении скорости струи начинается генерация тона отверстия, усиленная резонансом. Частота генерируемых колебаний давления близка к частоте собственных колебаний осциллятора. При увеличении скорости амплитуда колебаний повышается и, достигнув максимального значения, определяемого различными факторами, начинает снижаться. Процесс сопровождается незначительным увеличением частоты генерируемых колебаний. Такая закономерность в работе [14] названа модой колебаний.

На рисунке 6 представлены зависимости среднеквадратичной амплитуды генерируемых колебаний от скорости струи для различных геометрических соотношений диаметра выходного отверстия при постоянной длине выходного отверстия, равного 10 мм, и длине камеры 6 мм. Видно, что с увеличением скорости струи амплитуда колебаний вначале растет, а затем снижается. Максимальная амплитуда колебаний проявляется у осциллятора с диаметром выходного отверстия равного $d_2 = 1.5d_1$. Вместе с тем, максимальные значения амплитуды колебаний достигаются при разных скоростях струи. Это обусловлено тем, что изменение диаметра выходного отверстия приводит к изменению частоты собственных колебаний, а это означает, резонанс возможен на других скоростях струи, поскольку от скорости струи зависит частота тона отверстия и его гармоник.

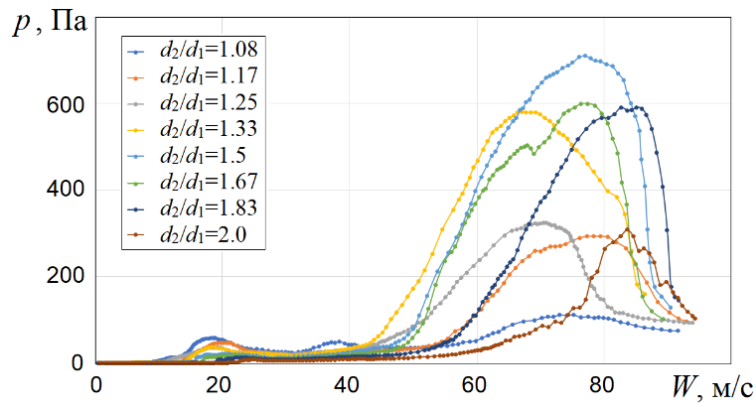


Рис. 6. Зависимости амплитуды колебаний давления в камере от скорости струи при различных диаметрах d_2 выходного отверстия

На рисунке 7 представлены графики зависимости среднеквадратичной амплитуды колебаний от скорости струи и длины резонансной камеры при диаметре выходного отверстия $d_2/d_1 = 1.4$. Видно, что существует оптимальная длина камеры равная $L/d_1 = 0.33$. При этом для данного излучателя с щелевой камерой диапазон скорости струи, при которой генерируются сильные колебания, больше, чем для «классического» осциллятора Гельмгольца [8, 14].

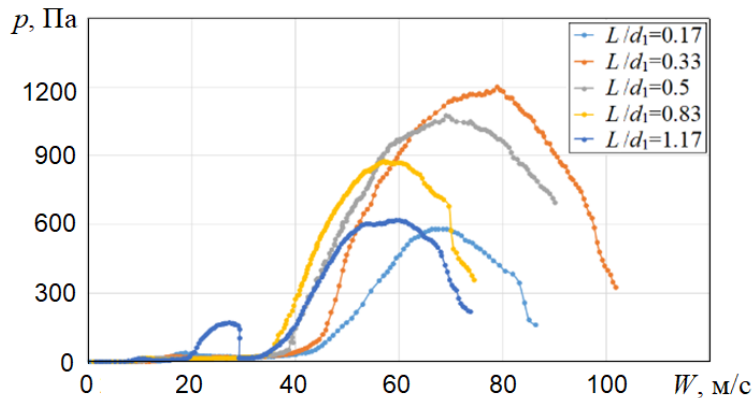


Рис. 7. Зависимости амплитуды колебаний давления в камере от скорости струи при различных длинах L резонансной камеры

Исследование влияния длины выходного отверстия на амплитуду колебаний было выполнено для модели с длиной камеры $L = 6$ мм и диаметром выходного отверстия $d_2 = 16$ мм. На рисунке 8 представлена зависимость максимальной среднеквадратичной амплитуды колебаний, которая практически линейно зависит от толщины выходной крышки (длины выходного отверстия). С увеличением длины выходного отверстия максимально достижимая амплитуда колебаний снижается.

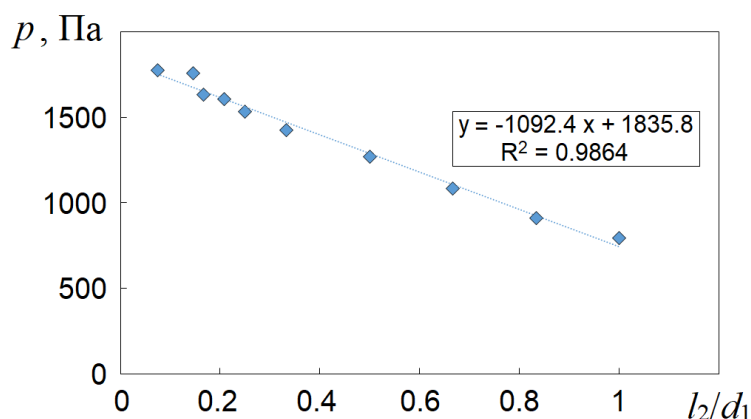


Рис. 8. Зависимость максимальной амплитуды колебаний от длины выходного отверстия

В результате проведенных экспериментальных исследований, установлено, что достижение максимального значения амплитуды генерируемых колебаний зависит от согласованности режимных параметров и геометрических размеров канала осциллятора.

Заклучение

Струйный осциллятор Гельмгольца является проточным излучателем звука, способный генерировать интенсивные колебания давления на собственных частотах. Экспериментально установлено, что особенность осциллятора с щелевой камерой состоит в том, что возможно достижение большей амплитуды колебаний, чем для камеры большей длины. Получены зависимости амплитуды колебаний давления от скорости струи, которые показывают, что диапазон скорости струи, при котором существуют акустические моде, больше для осциллятора с щелевой камерой чем для осциллятора с камерой большей длины. Проведенное численное моделирование процесса генерации колебаний на модели струйного осциллятора Гельмгольца позволило выявить особенности динамики струйного течения и предложить механизм возбуждения автоколебаний. В частности, выявлен факт закрутки потока вокруг струи в цилиндрическом сопле. Полученные результаты могут быть использованы при разработке проточных излучателей как для интенсификации добычи нефти, так и для других промышленных приложений, где имеется поток рабочего агента и необходима интенсификации процесса акустическими колебаниями.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01174, <https://rscf.ru/project/22-29-01174/>.

Список литературы

1. Marfin E.A., Kravtsov Y.I., Abdrashitov A.A., Gataullin R.N., Galiimzyanova A.R. Elastic-Wave Effect on Oil Production by In Situ Combustion: Field Results // Petroleum Science and Technology. – 2015. – Vol. 33, No. 15-16. – P. 1526-1532. – DOI 10.1080/10916466.2015.1037923.

2. Кравцов Я.И., Марфин Е.А., Абдрашитов А.А. Повышение эффективности метода парогравитационного дренажа за счет волнового воздействия на пласт // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 5. – С. 35-39.

3. Marfin E.A., Abdrashitov A.A., Kravtsov Y. I. On the selection of the optimal mode of the wave stimulation in oil production // 7th EAGE Saint Petersburg International

Conference and Exhibition: Understanding the Harmony of the Earth's Resources Through Integration of Geosciences. – Saint Petersburg, 2016. – P. 334-338. – DOI 10.3997/2214-4609.201600094.

4. Marfin E.A., Gataullin R.N., Abdrashitov A.A. Acoustic stimulation of oil production by a downhole emitter based on a jet-driven Helmholtz oscillator // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Vol. 215. – P. 110705. – DOI 10.1016/j.petrol.2022.110705.

5. Bennett G.J., Stephens D.B., Rodrigues Verdugo F. Resonant mode characterisation of a cylindrical Helmholtz cavity excited by a shear layer // Journal of the Acoustical Society of America – 2017. – V. 141. – № 1. P. 7–18.

6. Ziada S., Bolduc M., Lafon P. Flow-excited resonance of diametral acoustic modes in ducted rectangular cavities // AIAA Journal – 2017. – V. 55. – № 11. – P. 3817–3830. – DOI: 10.2514/1.J056010.

7. Vaik I., Varga R., Paal G. Frequency and phase characteristics of the edge-tone // Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. – 2014. – V. 58. – № 1. – P. 55–67. – DOI: 10.3311/PPme.7031.

8. Abdrashitov A.A., Marfin E.A., Chachkov D.V., Chefanov V.M. Effect of nozzle shape on amplitude of well acoustic emitter generation // Acoustical Physics. – 2018. – Vol. 64, No. 4. – P. 492-502. – DOI 10.1134/S1063771018030016.

9. Abdrashitov A.A., Marfin E.A. Nozzle length effect on the performance of the jet-driven Helmholtz oscillator // Fluid Dynamics. – 2021. – Vol. 56, No. 1. – P. 142-151. – DOI: 10.1134/S0015462821010018.

10. Абдрашитов А.А., Марфин Е.А. Возбуждение акустических мод гармониками тона отверстия в струйном осцилляторе Гельмгольца // Акустический журнал. – 2023. – Т. 69, № 4. – С. 430-437. – DOI 10.31857/S0320791922600329.

11. Ветошко Р.А., Марфин Е.А., Гаврилов А.Г. Исследование влияния геометрии резонатора Гельмгольца на присоединенную длину горла // Инженерная физика. – 2018. – № 4. – С. 12-19.

12. Sami S., Anderson C. Helmholtz oscillator for the self-modulation of a jet // Proc. 7th Int. Symp. on jet cutting technology. BHRA. Cranfield. Bedford. England. – 1984. – P. 91-98.

13. Mitrofanova O.V., Pozdeeva I.G. Investigation of the acoustic oscillation self-adjustment mechanism in impinging swirling flows // Fluid Dynamics. – 2015. – Vol. 50, No. 5. – P. 646-654. – DOI 10.1134/S0015462815050063.

14. Morel Th. Experimental study of a jet-driven Helmholtz oscillator // Journal of Fluids Engineering – 1979. – V. 101. – № 3. – P. 383–390. – DOI: 10.1115/1.3448983

15. Marfin E.A., Abdrashitov A.A. Numerical simulation of gas-dynamics in a jet emitter with a slit chamber // XXI International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2022): Abstracts, Novosibirsk, 08–14 августа 2022 года. Vol. Part I. – Novosibirsk: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Сибирское отделение Российской академии наук», 2022. – P. 130-131. – DOI 10.53954/9785604788967_130.

References

1. Marfin E.A., Kravtsov Y.I., Abdrashitov A.A., Gataullin R.N., Galiimzyanova A.R. Elastic-Wave Effect on Oil Production by In Situ Combustion: Field Results // Petroleum Science and Technology. – 2015. – Vol. 33, No. 15-16. – P. 1526-1532. – DOI 10.1080/10916466.2015.1037923.

2. Kravtsov YA.I., Marfin E.A., Abdrashitov A.A. Povyshenie effektivnosti metoda parogravitacionnogo drenazha za schet volnovogo vozdejstviya na plast // Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanyh i gazovyh mestorozhdenij. – 2016. – № 5. – P. 35-39.
3. Marfin E.A., Abdrashitov A.A., Kravtsov Y. I. On the selection of the optimal mode of the wave stimulation in oil production // 7th EAGE Saint Petersburg International Conference and Exhibition: Understanding the Harmony of the Earth's Resources Through Integration of Geosciences. – Saint Petersburg, 2016. – P. 334-338. – DOI 10.3997/2214-4609.201600094.
4. Marfin E.A., Gataullin R.N., Abdrashitov A.A. Acoustic stimulation of oil production by a downhole emitter based on a jet-driven Helmholtz oscillator // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Vol. 215. – P. 110705. – DOI 10.1016/j.petrol.2022.110705.
5. Bennett G.J., Stephens D.B., Rodrigues Verdugo F. Resonant mode characterisation of a cylindrical Helmholtz cavity excited by a shear layer // Journal of the Acoustical Society of America – 2017. – V. 141. – № 1. P. 7–18.
6. Ziada S., Bolduc M., Lafon P. Flow-excited resonance of diametral acoustic modes in ducted rectangular cavities // AIAA Journal – 2017. – V. 55. – № 11. – P. 3817–3830. – DOI: 10.2514/1.J056010.
7. Vaik I., Varga R., Paal G. Frequency and phase characteristics of the edge-tone // Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. – 2014. – V. 58. – № 1. – P. 55–67. – DOI: 10.3311/PPme.7031.
8. Abdrashitov A.A., Marfin E.A., Chachkov D.V., Chefanov V.M. Effect of nozzle shape on amplitude of well acoustic emitter generation // Acoustical Physics. – 2018. – Vol. 64, No. 4. – P. 492-502. – DOI 10.1134/S1063771018030016.
9. Abdrashitov A.A., Marfin E.A. Nozzle length effect on the performance of the jet-driven Helmholtz oscillator // Fluid Dynamics. – 2021. – Vol. 56, No. 1. – P. 142-151. – DOI: 10.1134/S0015462821010018.
10. Abdrashitov A.A., Marfin E.A. Vozbuzhdenie akusticheskikh mod garmonikami tona otverstiya v strujnom oscillyatore Gel'mgol'ca // Akusticheskij zhurnal. – 2023. – T. 69, № 4. – P. 430-437. – DOI 10.31857/S0320791922600329.
11. Vetoshko R.A., Marfin E.A., Gavrilov A.G. Issledovanie vliyaniya geometrii rezonatora Gel'mgol'ca na prisoedinennuyu dlinu gorla // Inzhenernaya fizika. – 2018. – № 4. – P. 12-19.
12. Sami S., Anderson C. Helmholtz oscillator for the self-modulation of a jet // Proc. 7th Int. Symp. on jet cutting technology. BHRA. Cranfield. Bedford. England. – 1984. – P. 91-98.
13. Mitrofanova O.V., Pozdeeva I.G. Investigation of the acoustic oscillation self-adjustment mechanism in impinging swirling flows // Fluid Dynamics. – 2015. – Vol. 50, No. 5. – P. 646-654. – DOI 10.1134/S0015462815050063.
14. Morel Th. Experimental study of a jet-driven Helmholtz oscillator // Journal of Fluids Engineering – 1979. – V. 101. – № 3. – P. 383–390. – DOI: 10.1115/1.3448983
15. Marfin E.A., Abdrashitov A.A. Numerical simulation of gas-dynamics in a jet emitter with a slit chamber // HKHI International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2022): Abstracts, Novosibirsk, 08–14 avgusta 2022 goda. Vol. Part I. – Novosibirsk: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie «Sibirskoe otdelenie Rossijskoj akademii nauk», 2022. – P. 130-131. – DOI 10.53954/9785604788967_130.

УДК: 628.517.2
OECD: 01.03.AA

Оптимизация комплекса мероприятий для защиты от железнодорожного шума

Борцова С.С.^{1*}, Забалканская Л.Э.²

¹ Старший преподаватель

² Доцент, к.физ.-мат.н.

^{1,2} БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

Значимость решения задачи снижения шумового воздействия железнодорожного транспорта повышается с развитием транспортного комплекса Российской Федерации, которое влечёт за собой расширение зоны сверхнормативной акустической нагрузки на селитебные территории. Учитывая тот факт, что снижение транспортного шума – дорогостоящая задача, необходимо не только применять комплекс шумозащитных мероприятий, но оптимизировать его по экономическому критерию с учетом технологических и эксплуатационных показателей.

Рассматривается задача оптимизации по критерию стоимости комплекса мероприятий по защите от железнодорожного шума, включающего шумозащитные конструкции на пути распространения шума: шумозащитный экран, шумозащитные насыпи и выемки, зелёные насаждения; конструктивные улучшения железнодорожных путей; шумозащитное остекление. Обязательным условием является обеспечение акустической безопасности территорий, находящихся в зоне негативного влияния транспортной деятельности. Минимизируется функция чистой приведённой стоимости, учитывающая экономический эффект от внедрения шумозащиты, затраты в течение жизненного цикла дороги, долговечность конструкций и временную стоимость денежных средств. Предложенный подход может быть положен в основу методики выбора и оптимизации шумозащитного комплекса для автомобильных и железных дорог, а также промышленных объектов и аэропортов.

Ключевые слова: шумозащитная конструкция, шумозащитный комплекс, снижение шума железнодорожного транспорта, оптимизация шумозащитного комплекса, экономический эффект.

Optimization of a set of measures for protection against railway noise

Bortsova S.S.^{1}, Zabalkanskaya L.E.²*

¹ *Senior Lecturer*

² *Assistant professor, PhD*

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

Abstract

The importance of solving the problem of reducing the noise impact of railway transport increases with the development of the transport complex of the Russian Federation, which entails an expansion of the zone of excess acoustic load in residential areas. Considering the fact that reducing traffic noise is an expensive task, it is necessary not only to apply a set of noise protection measures, but to optimize it according to economic criteria, taking into account technological and operational indicators.

We consider the optimization problem based on the cost criterion of a set of measures to protect against railway noise, including noise protection structures along the path of noise propagation: noise protection screen, noise protection embankments and excavations, green spaces; structural improvements to railroad tracks; noise-proof glazing. A prerequisite is to ensure the acoustic safety of territories located in the zone of negative influence of transport activities. The net present value function is minimized, taking into account the economic

*E-mail: bortsova_ss@voenmeh.ru (Борцова С.С.)

effect of introducing noise protection, costs during the life cycle of the road, durability of structures and the time value of money. The proposed approach can be used the basis of the methodology for selecting and optimizing a noise protection system for roads and railways, as well as industrial facilities and airports.

Keywords: *noise protection structure, noise protection complex, railway transport noise reduction, optimization of the noise protection complex, economic effect.*

Введение

Развитие железнодорожного транспорта, предусматривающее увеличение скорости и объемов железнодорожных перевозок – стратегическое направление развития транспортной системы РФ. При этом следует обеспечить снижение негативной нагрузки на здоровье населения, в том числе и от повышенного шума. Обеспечение требований санитарного законодательства зачастую возможно лишь совместным применением нескольких шумозащитных мер.

Наиболее эффективным (до 15-20 дБА) считается его экранирование шумозащитными конструкциями (ШЗК): устройство на пути распространения звука шумозащитных экранов (ШЭ), возведение земляных шумозащитных насыпей (ШН) и выемок (ШВ). Акустическая эффективность ШЗК несколько варьируется в зависимости от расположения относительно источника шума и защищаемого объекта, высокие значения эффективности достижимы для низкоэтажной застройки и при протяжённой длине [1-3]. Располагают ШЗК, как правило, в полосе отвода дороги. Для защиты высокоэтажной застройки возможно применение комбинаций ШН+ШЭ или ШВ+ШЭ. Ключевым параметром, влияющим на акустическую эффективность ШЗК, является его высота. Эффективность разных ШЗК зависит от поглощающих свойств материалов и формы конструкций. Эффективность разных ШЗК будут отличаться поправкой на материал (поглощающие свойства) и форму. Уточнённые параметрические функции акустической эффективности ШЗК приводятся в работе [4].

Помимо ШЗК на пути распространения шума применяют зелёные насаждения (ШЗН). Эффективность ШЗН в зависимости от вида посадки даст снижение порядка 3-8 дБА. В статье [4] описаны два вида посадок, при этом необходимо учитывать, что эффективность лесополосы (ЛП) зависит от её ширины, кроме того, для шумозащитного озеленения (ШЗ) введён дополнительный коэффициент 5 дБА (это более сложная «шахматная» посадка на ширину от 25 м с добавлением высокой древесной породы).

Следующее направление - снижение шума источника: устройство вибродемпфирующих накладок на шейку рельса (ВДН), бесстыковый путь (БП), шлифование рельса (ШР) и др. Каждое из перечисленных мероприятий по экспериментальным данным даёт в среднем снижение порядка 2дБА [1, 2], однако, как правило, не применяется совместно. При проектировании дорог эти меры первостепенны.

Последнее из рассматриваемых в статье мероприятие - шумозащитное остекление (ШО). Его эффективность принято оценивать в 10 дБА для территории (до 30 дБА в помещениях).

Допустим, эффективность совместного применения некоторых мероприятий разных направлений является аддитивной функцией. Условно будем полагать применение ШЗК основными мероприятиями, остальные перечисленные выше - дополнительными. Представляется возможным подобрать некое множество возможных решений задачи обеспечения требуемого уровня акустической безопасности (вариантов шумозащитных комплексов). Учитывая, что стоимость обеспечения шумозащиты может соизмеряться со стоимостью самой дороги, задача оптимизации состоит в выборе среди множества

допустимых вариантов лучшего (оптимального) с экономической точки зрения. Подобного рода работа была проведена Н.И. Ивановым [5], который предложил алгоритм выбора и оптимизации шумозащиты при проектировании путевых и строительных машин.

В работе [6] приводятся функции стоимости ШЗК в зависимости от её основных конструктивных параметров, составленные на основании анализа строительных смет. Это капитальные вложения (К), позволяющие в реальном времени оценить как замена одного мероприятия другим отразится на полной стоимости шумозащиты.

Однако, получить представление о полной стоимости и экономической эффективности шумозащитного комплекса возможно после его всесторонней оценки на каждом этапе жизненного цикла дороги (20-30 лет). В работе [7] в качестве такого показателя предложена чистая приведённая стоимость (ЧПС). Помимо экономической оценки, ЧПС отражает и ряд эксплуатационных параметров шумозащиты, основным из которых является его долговечность (срок службы), а также учитывает затраты на проектирование, эксплуатацию, замену, ликвидацию и временную стоимость денег. С помощью ЧПС также возможен учёт дополнительных (помимо предотвращаемого ущерба) эффектов от применения конкретного мероприятия в случае его многоцелевой направленности (зелёные кредиты, вторичное использование ресурсов, предотвращение экологического ущерба и др.)

Помимо акустической и экономической эффективности при выборе шумозащитного комплекса следует учитывать его технологические и эксплуатационные характеристики. В частности, панели ШЭ изготавливаются с шагом 0,5 или 1 м (реже 0,25 м), ШН(В) и ШЗН также имеют шаг по высоте и ширине, поэтому функции эффективности и стоимости ШЗК дискретны. В зависимости от грунта устанавливается уклон ШН и ШВ, а также выбираются виды деревьев и кустарников для посадки. Ветровые и весовые нагрузки могут ограничить высоту ШЭ, а землеотвод высоту ШН. Выбор материала ШЭ должен производиться с учётом стойкости к окружающей среде. Удобство обслуживания оцениваться, принимая во внимание в т.ч. обеспечение снегопереноса и др. При этом долговечность конструкции отражена в формуле ЧПС. Таким образом, указанные характеристики налагают ограничения на вид модели оптимизации (выбор видов ШЗК, значения переменных – ключевых параметров ШЗК).

1. Математическая модель оптимизации

Шумозащитный комплекс может содержать шумозащитные мероприятия следующих 6 групп:

1. шумозащитный экран (ШЭ);
2. насыпь (ШН);
3. выемка (ШВ);
4. лесополоса (ЛП) или шумозащитное озеленение (ШЗ);
5. шлифование рельса (ШР) или вибродемпфирующие накладки (ВДН);
6. шумозащитное остекление (ШО).

Мероприятия 1-3 включают подвиды в зависимости от формы и материала, функция их акустической эффективности и стоимости зависит от высоты конструкции. Мероприятия 4-5 групп осуществляются на выбор. Стоимость и эффективность ЛП зависит от её ширины, шумозащитного озеленения дополняется стоимостью главной древесной породы (ГДП) и 5 дБА. Акустическая эффективность 5 и 6 постоянна: 2 и 10 дБА. Стоимость возрастает с увеличением числа путей (5) и этажности застройки (6).

Требуется подобрать шумозащитный комплекс, обеспечивающий требуемое снижение шума, и имеющий наименьшую стоимость. В качестве стоимости (С)

рассмотрим сразу два показателя – капитальные вложения в строительство и чистую приведённую стоимость.

Таким образом, в наиболее общем виде математическая модель выглядит следующим образом:

$$\left[\sum_{k=1}^6 [C_k(x_k)] \rightarrow \right] \min$$

При условии:

$$\Delta L_{1-3}(x_1, x_2, x_3) + \Delta L_4(x_4) + \Delta L_{5,6}(x_1, x_2, x_3) \geq \Delta L_{\text{тр}}$$

$\Delta L_{1-3}(x_1, x_2, x_3)$ может быть как функцией только одной переменной – $\Delta L_{1-3}(x_k)$, где $k = 1, 2, 3$, так и функцией 2-х (реже 3-х) переменных, x – ключевой параметр ШЗК.

Множества значений переменных:

x_1 - принимает значения от минимального значения (mm_1) до максимального (mx_1) с некоторым шагом h (т.е., например, $x_1^1 = 3$; $x_1^i = x_1^{i-1} + h$) т.е. являются дискретными;

x_2 принимают значения из отрезка $[mm_2, mx_2]$, x_3 из $[mm_3, mx_3]$;

x_4 и x_5 могут принимать значения 0 или 1 или 2 (0 - в случае, когда эта мера не используется, 1 и 2 соответствуют 2-м различным вариантам);

x_6 принимает значения 0 и 1 (0 - в случае, когда эта мера не используется, 1- когда используется).

Функции эффективности имеют следующий вид:

$$\Delta L_{1-3}(x_1, x_2, x_3) = \min(\Delta L_{1-3}^p(x_1, x_2, x_3); \Delta L_{\max})$$

$$\Delta L_4(x_4) = \min(\Delta L_4^p(x_4); \Delta L_{\max})$$

$$\Delta L_5 = 2 \text{ дБА}, \quad \Delta L_6 = 10 \text{ дБА}$$

где $\Delta L_{1-3}^p(x_1, x_2, x_3)$ рассчитывается по формулам, включающим высоту соответствующих шумозащитных сооружений, $\Delta L_{\max} = 20 + K_{\text{ф}} + K_{\text{скл}}$, $K_{\text{ф}}$ и $K_{\text{скл}}$ - поправки на форму и склон, дБА, $\Delta L_4^p(x_4)$ определяется шириной посадки, максимальная (и ширина, и эффективность) рассчитывается или задаётся проектировщиком, ΔL_{5-6} постоянны.

Предположим, что очерёдность выбора соответствующих шумозащитных мер не устанавливается.

В этом случае, т.к. в реальных расчётах высота насыпи и выемки принимают дискретные значения с некоторым шагом, задачу можно свести к задаче целочисленного программирования, приписав каждому значению высоты шумозащитного сооружения порядковый номер.

Минимальное значение высоты ШЗК принимается за 1, минимальное + шаг - за 2 и т.д. В результате получаем набор целых чисел, каждому из которых соответствует определённая высота ШЗК, при этом, если данная ШЗК не применяется, то соответствующая переменная равна 0.

Задача целочисленного программирования в этом случае записывается следующим образом:

$$\left[\sum_{k=1}^6 [C_k(x_k)] \rightarrow \right] \min$$

$$\Delta L_{1-3}(x_1, x_2, x_3) + \Delta L_4(x_4) + \Delta L_5(x_5) + \Delta L_6(x_6) \geq \Delta L_{\text{тр}}$$

$0 \leq x_k \leq b_k$, k - целое и меняется от 1 до 6,

$$b_k = \frac{h_k^{max} - h_k^{min}}{t_k} + 1$$

для $k = 1, 2$ и 3 , где t_k - шаг изменения высоты соответствующей ШЗК,

$$b_4 = 2, b_5 = 2, b_6 = 1$$

То есть при этом каждому натуральному значению первых 3-х переменных соответствует своя высота ШЗК. Например, для ШЭ:

h_1^1 - минимальная возможная высота экрана соответствует $x_1^1 = 1$;

для целых i от 2 до $b_k h_1^i = h_1^{i-1} + t_1$ соответствует $x_1^i = i$,

$$x_2^1 = 3; x_1^j = x_1^{j-1} + h_2$$

$$x_1^1 = 3; x_1^i = x_1^{i-1} + h_1$$

для насыпи и выемки аналогично.

При этом при вычислении функции эффективности в соответствующие формулы подставляем высоту ШЗК, соответствующую выбранному значению переменной x_k .

Данная задача является NP-трудной, т.е. решается полным перебором вариантов. Однако учитывая, что оптимизируемая функция является аддитивной, для решения этой задачи может быть применено динамическое программирование, которое разбивает задачу на ряд подзадач, причём найденное решение является оптимальным на данном шаге. Задача является обратной к стандартной задаче о рюкзаке, т.е. задачи поиска максимума функции стоимости, при условии, что вес не превосходит заранее заданного уровня.

Модифицируем алгоритм для рассматриваемой задачи. В качестве начальной точки возьмём максимально возможное расчётное значение эффективности (аналог веса в стандартной задаче). По условию это состояние обеспечивает заданную эффективность, значит множество решений не пусто. (Если данный полный набор не обеспечивает необходимую эффективность, задача решений не имеет). В качестве дальнейших шагов заменяем максимальное значение соответствующей переменной на меньшее, последовательно снижая эффективность до заданного уровня.

Таким образом, состояниями системы будут значения эффективности ξ : $\Delta L_{max}, \Delta L_{max} - t_1, \Delta L_{max} - t_2, \dots, \Delta L_{тр}$ где t_j - изменения эффективности. Тогда целевая функция $F_i(\xi)$ - минимальная стоимость мер, обеспечивающих эффективность ξ , при условии, что для рассматриваемых i переменных выбраны значения, обеспечивающие эту минимальную эффективность.

Однако, учитывая тот факт, что при решении задач для переменных с четвёртой по шестую не только функция стоимости, но и функция эффективности является аддитивной, алгоритм может быть модернизирован. Начинаем решение задачи именно с этих переменных.

2. Алгоритм решения задачи

Решение задачи можно разбить на несколько этапов.

1) Рассмотрим переменные с 4 по 6 и решим методом динамического программирования серию задач вида:

$$\left(\sum_{i=0}^2 C_{6-i} \right) \rightarrow \min$$

При $\Delta L(x_{6-i}, \dots, x_6) \geq \xi$ для всех возможных значений ξ . При этом в качестве максимальной эффективности рассмотрим наибольшую возможную суммарную эффективность мер 4-6 и далее будем снижать эффективность в соответствии с тем, какую меру мы исключаем из использования или заменяем на другую (шумозащитное озеленение заменяем на лесополосу).

$F_i(\xi)$ – минимум стоимости по всем значениям i переменных, при которых уровень эффективности остаётся выше ξ .

Если таких значений нет, то $F_i(\xi) = F_{i-1}(\xi)$. При $\xi = \Delta L_{max}$, т.е. в начальной точке имеем сумму стоимостей, соответствующих выбору всех мер. $F_0(\xi) = F_i(\Delta L_{max})$. Если мы не заменяем никакое значение переменной, т.е. $i = 0$, то стоимость тоже остаётся наивысшей.

Таким образом, уравнение Бэлмана в данном случае выглядит следующим образом:

$$F_i(\xi) = \min\{F_{i-1}(\xi - \Delta L_{max}(x_{6-i}, \dots, x_6) + \Delta L(x_{6-i}, \dots, x_6) - c_{6-i}^{max}(x_{6-i}) + c_i(x_{6-i}))\}$$

при $\xi \geq \Delta L_{max}(x_{6-i}, \dots, x_6) - \Delta L(x_{6-i}, \dots, x_6)$

$$F_i(\xi) = F_{i-1}(\xi) \text{ при } \xi < \Delta L_{max}(x_{6-i}, \dots, x_6) - \Delta L(x_{6-i}, \dots, x_6)$$

В результате мы получаем таблицу, элементами которой являются значения $F_i(\xi)$, где i соответствует номеру строки, а номер столбца определяется по $\xi = \Delta L_{max} - t_j$. Таблица заполняется по строкам с учётом соответствующего значения в предыдущей строке. Необходимо также запоминать какой именно набор значений i переменных обеспечивает стоимость, стоящую в соответствующей ячейке. Решение задачи – это множество наборов значений переменных, соответствующих элементам матрицы $F_4(\xi)$, где ξ -возможное значение эффективности.

2) Рассматриваем оптимальное сочетание мер 4-6 с ШЭ, учитывая его возможные значения (варианты).

В данном случае задача сводится к отысканию такой минимальной высоты шумозащитного сооружения, которая соответствует неравенствам $\Delta L_{тр} - \Delta L_{1-3}(x_1) - \Delta L_{4-6} > 0$, где в качестве обеспечивающих эффективность ΔL_{4-6} рассматриваются возможные оптимальные сочетания мер с 4 по 6.

Таким образом, мы получаем таблицу возможных сочетаний мер 4-6 с ШЭ, где высота экрана подбирается к каждому эффективному сочетанию мер. Пример таблицы динамического программирования для мер с 4 по 6 приведён в разделе 3.

В качестве высоты экрана соответствующего вида берём минимальное значение, эффективность которого удовлетворяет неравенству. Если значение меньше минимального или больше максимально допустимого, то такой вариант не рассматривается. Все получившиеся варианты сочетаний сравниваем по стоимости, выбирая оптимальный по ЧПС.

Аналогично решаем задачу для насыпи и выемки.

3) Далее при необходимости рассматриваем комбинации ШЗК: ШН+ШЭ, ШВ+ШЭ в сочетании с дополнительными мерами 4-6.

Для поиска оптимального сочетания мер решаем серию задач, перебирая возможные значения высоты экрана определённого вида, подбираем высоту насыпи определённого вида, которые вместе с рассматриваемым сочетанием дополнительных мер обеспечивают заданную эффективность. Т.е. для каждой высоты экрана ищем минимальную высоту насыпи так, чтобы эффективность шумозащитного комплекса удовлетворяла неравенству: $\Delta L_{тр} - \Delta L_{1-3}(x_1, x_2) - \Delta L_{4-6} < 0$ (ищем первое значение, где разность становится отрицательной) для сочетания насыпь-экран и $\Delta L_{тр} - \Delta L_{1-3}(x_1, x_3) - \Delta L_{4-6} < 0$ для сочетания выемка-экран.

Таким образом, получаем сводную таблицу 1.

Таблица 1

Матрица вариантов шумозащиты

	Вариант 1	Вариант 2	...
Высота ШЭ	0/высота ШЭ	...	
Высота ШН	0/высота ШН	...	
Глубина ШВ	0/глубина ШВ		
ЛП или ШЗ	0/1/2		
ВДН или ШР	0/1/2		
ШО	0/1		

Заметим, что в данном случае имеет место задача отыскания корней функции одной переменной, т.е. высота насыпи и глубина выемки могут принимать любое, а не только дискретное значение из заданного диапазона.

Таким образом, данная модификация алгоритма позволяет сначала решить задачу целочисленного программирования, а потом применить результаты её решения к отысканию оптимальных сочетаний ШЗК, учитывая, что высота насыпи и глубина выемки принимает непрерывные значения.

3. Пример решения задачи

На примере защиты здания высотой 15 м на удалении 60 м от железнодорожных путей подберем оптимальный с экономической точки зрения шумозащитный комплекс, включающий перечисленные в разделе 1 мероприятия (1-6).

Требуемое снижение шума: $\Delta L_{\text{тр}}=24$ дБА

Решаем задачу, начиная с дополнительных мер защиты (4-6). Они должны обеспечить снижение выше значения $\Delta L_{\text{тр}} - \Delta L_{(1-3)\text{max}}=2,5$ дБ

Эффективность ШЗН рассчитана согласно [4]. Ширина посадки – 30 м.

Функция стоимости дополнительных мер получена из смет на строительство аналогично [5]. Чистая приведённая стоимость рассчитана по формулам [6].

Решая задачу динамического программирования для дополнительных мер в табл. 2 получены сочетания их акустической эффективности (ΔL), величины капитальных вложений (К) и чистой приведённой стоимости (ЧПС).

Таблица 2

Экономическая и акустическая эффективность дополнительных мер защиты

	Мероприятие ($x_4 - x_5 - x_6$)	ΔL , дБА	К, у.е.	ЧПС, у.е.
1	ШЗ+ШО+ВДН (2-1-1)	18,8	16391,2	38404,2
2	ШЗ+ШО (2-0-1)	16,8	13891,2	28904,2
3	ЛП+ШО+ВДН (1-1-1)	13,8	12774,0	26077,7
4	ШО+ВДН (0-1-1)	12,0	10500,0	21087,4
5	ШО+ЛП (1-0-1)	11,8	10274,0	16577,7
6	ШЗ+ВДН (2-1-0)	8,8	8391,2	26816,8
7	ШО (0-0-1)	10,0	8000,0	11587,4
8	ШЗ (2-0-0)	6,8	5891,2	17316,8
9	ЛП+ВДН (1-1-0)	3,8	4774,0	14990,3
10	ВДН (0-1-0)	2,0	2500,0	9500,0
11	ЛП (1-0-0)	1,8	2274,0	4990,3

Варианты 10 и 11 исключаются из рассмотрения как не обеспечивающие требуемое снижение шума всем комплексом мер. Мероприятия 6, 8 и 9 не являются оптимальными по ЧПС, т.к. для достигаемого уровня эффективности существуют более дешёвые. В случаях, когда наличие зелёных насаждений является обязательным требованием, необходимо исключить из рассмотрения варианты мероприятий их не содержащие и найти оптимальные сочетания оставшихся мер. По результатам динамического программирования с оптимизацией по ЧПС случаев с обязательным и не обязательным наличием зелёных насаждений имеем: при обязательных насаждениях вместо ШЗ+ВДН (6) и ШЗ (8) используем ШО+ЛП (5), т.к. при большей эффективности этот вариант имеет меньшую ЧПС. При отсутствии требований по насаждениям варианты ШЗ+ВДН (6), ШЗ (8) и ЛП+ВДН (9) не рассматриваются, т.к. ШО (7) при большей эффективности имеет меньшее значение ЧПС.

В качестве ШЗК применяем меры (1, 2) и комбинации (1-2, 1-3) протяжённой длины. Рассматриваемые ШЗК и функция их акустической эффективности:

Эффективность шумозащитных экранов (ШЭ), ΔL_1 , дБА

1) Экран прямой поглощающий (нержав. сталь, оцинкован. сталь, дерево), ШЭпп

$$\Delta L_{\text{пп}}^{\text{э}} = 10 \cdot \lg \left(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{64 + (H - 0,5)^2} + \sqrt{3136 + (15 - H)^2} - 65,6) \right)$$

Возможный диапазон высот 3..8 м, шаг 0,5 м, $\Delta L_{\text{max}}=20$ дБА

2) Экран прямой отражающий (бетон, прозрачный пластик), ШЭпо

$$\Delta L_{\text{по}}^{\text{э}} = 10 \cdot \lg \left(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{64 + (H - 0,5)^2} + \sqrt{3136 + (15 - H)^2} - 65,6) \right) - 3$$

Возможный диапазон высот 3,5..9 м, шаг 0,5 м, $\Delta L_{\text{max}}=20$ дБА

3) Экран Г-образный поглощающий, ШЭфп

$$\Delta L_{\text{фп}}^{\text{э}} = 10 \cdot \lg \left(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{64 + (H - 0,5)^2} + \sqrt{3136 + (15 - H)^2} - 65,6) \right) + 1,5$$

Возможный диапазон высот 3..8 м, шаг 0,5 м, $\Delta L_{\text{max}}=21,5$ дБА

4) Экран Г-образный отражающий, ШЭфо

$$\Delta L_{\text{фо}}^{\text{э}} = 10 \cdot \lg \left(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{64 + (H - 0,5)^2} + \sqrt{3136 + (15 - H)^2} - 65,6) \right) - 1,5$$

Возможный диапазон высот 3..9 м, шаг 0,5 м, $\Delta L_{max}=21,5$ дБА

Эффективность шумозащитных насыпей (ШН), ΔL_2 , дБА:

5) Грунтовая насыпь уклоном 0,5 с площадкой 2 м, ШН (0,5; 2)

$$\Delta L_{0,5}^{шн} = 10 \cdot \lg \left(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(8 + 0,5 \cdot H)^2 + (H - 0,5)^2} + \sqrt{(56 - 0,5 \cdot H)^2 + (15 - H)^2} - 65,6) \right)$$

6) Грунтовая насыпь уклоном 1 с площадкой 2 м, ШН (1; 2)

$$\Delta L_1^{шн} = 10 \cdot \lg \left(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(8 + H)^2 + (H - 0,5)^2} + \sqrt{(56 - H)^2 + (15 - H)^2} - 65,6) \right)$$

Возможный диапазон высот 3..9 м, шаг 0,1 м, $\Delta L_{max}=20$ дБА

Эффективность комбинированных ШЗК, ΔL_{1-3} , дБА:

7) Грунтовая насыпь (1; 2) + экран прямой поглощающий, ШН (1; 2) + ШЭпп

$$\Delta L^{H+Э} = 10 \cdot \lg \left(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(9 + H^H)^2 + (H^H + H^Э - 0,5)^2} + \sqrt{(55 - H^H)^2 + (15 - (H^H + H^Э))^2} - 65,6) \right)$$

8) Грунтовая насыпь (0,5; 2) + экран прямой поглощающий ШН (0,5; 2) + ШЭпп

$$\Delta L^{H+Э} = 10 \cdot \lg \left(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(9 + 0,5 \cdot H^H)^2 + (H^H + H^Э - 0,5)^2} + \sqrt{(55 - 0,5 \cdot H^H)^2 + (15 - (H^H + H^Э))^2} - 65,6) \right)$$

Высота насыпи 1,8..6 м, шаг 0,1 м, экрана 2..5 м, шаг 0,5 м, $\Delta L_{max}=20$ дБА

9) Грунтовая насыпь (1; 2) + экран Г-образный поглощающий, ШН (1; 2) + ШЭфп

$$\Delta L^{H+Э''} = 10 \cdot \lg \left(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(9 + H^H)^2 + (H^H + H^Э - 0,5)^2} + \sqrt{(55 - H^H)^2 + (15 - (H^H + H^Э))^2} - 65,6) \right) + 1,5$$

10) Грунтовая насыпь (0,5; 2) + экран Г-образный поглощающий, ШН (0,5; 2) + ШЭфп

$$\Delta L^{H+Э''} = 10 \cdot \lg \left(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(9 + 0,5 \cdot H^H)^2 + (H^H + H^Э - 0,5)^2} + \sqrt{(55 - 0,5 \cdot H^H)^2 + (15 - (H^H + H^Э))^2} - 65,6) \right) + 1,5$$

Высота насыпи 1,8..6 м, шаг 0,1 м, экрана 2..5 м, шаг 0,5 м, $\Delta L_{max}=21,5$ дБА

11) Грунтовая выемка уклоном 1,5 с площадкой 17 м + экран прямой поглощающий, ШВ (1,5; 17) + ШЭпп

$$\Delta L^{B+Э} = 10 \cdot \lg \left(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(9 + 1,5 \cdot H^B)^2 + (H^B + H^Э - 0,5)^2} + \sqrt{(55 - 1,5 \cdot H^B)^2 + (15 - H^Э)^2} - \sqrt{4096 + (14,5 + H^B)^2}) \right)$$

12) Грунтовая выемка уклоном 1 с площадкой 17 м + экран прямой поглощающий, ШВ (1; 17) + ШЭпп

$$\Delta L^{B+Э} = 10 \cdot \lg \left(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(9 + H^B)^2 + (H^B + H^Э - 0,5)^2} + \sqrt{(55 - H^B)^2 + (15 - H^Э)^2} - \sqrt{4096 + (14,5 + H^B)^2}) \right)$$

Высота выемки 1,7..9 м, шаг 0,1 м, экрана 2..7 м, шаг 0,5 м, $\Delta L_{max}=20$ дБА

13) Грунтовая выемка (1,5; 17) + экран Г-образный поглощающий, ШВ (1,5; 17) + ШЭфп

$$\Delta L^{B+\text{Э}^n} = 10 \cdot \lg(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(9 + 1,5 \cdot H^B)^2 + (H^B + H^{\text{Э}} - 0,5)^2} + \sqrt{(55 - 1,5 \cdot H^B)^2 + (15 - H^{\text{Э}})^2} - \sqrt{4096 + (14,5 + H^B)^2})) + 1,5$$

14) Грунтовая выемка (1; 17) + экран Г-образный поглощающий, ШВ (1; 17) + ШЭшп

$$\Delta L^{B+\text{Э}^n} = 10 \cdot \lg(3 + 58,8 \cdot (\sqrt{(9 + H^B)^2 + (H^B + H^{\text{Э}} - 0,5)^2} + \sqrt{(55 - H^B)^2 + (15 - H^{\text{Э}})^2} - \sqrt{4096 + (14,5 + H^B)^2}))$$

Высота выемки 1,7..9 м, шаг 0,1 м, экрана 2.7 м, шаг 0,5 м, $\Delta L_{max}=21,5$ дБА

Рассматривая все возможные варианты сочетаний ШЗК с оптимальными по стоимости дополнительными мерами (без обязательных ШЗН), были получены необходимые высоты как отдельных конструкций (1, 2), так и комбинаций ШЗК (1-2 и 1-3). Наглядно увидеть полученные результаты определения высот экранов и насыпей можно с помощью рисунка 1. От проекции точек пересечения на горизонтальную ось двигаемся влево к ближайшему шагу по высоте ШЗК.

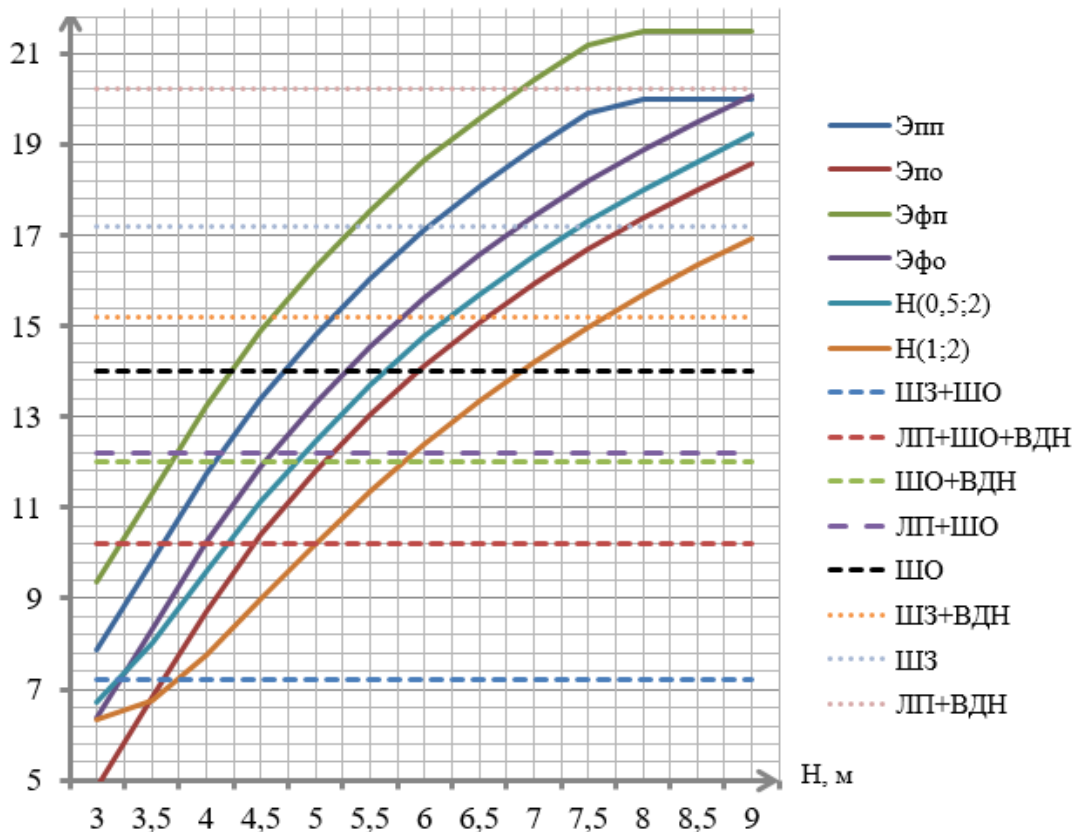


Рис. 1. Определение оптимальной высоты ШЗК

При подборе комбинаций (1-2 и 1-3) высота ШЭ бралась от минимальной до высоты на шаг ниже, полученной на предыдущем этапе.

Функции капитальных вложений и чистой приведённой стоимости были получены согласно работам [5, 6]. Промежуточным этапом была проведена оптимизация ШЭ. Выбор экономически оптимального экрана произведён по величине его приведённой

стоимости: минимальная она у деревянного поглощающего и бетонного отражающего экранов. Аналогично и для г-образных экранов из тех же материалов.

Стоимость шумозащитных комплексов и найденные высоты ШЗК представлена в таблицах 3-5 (верхняя строка – высота ШЗК, м, средняя – капитальные вложения, у.е., нижняя – чистая приведённая стоимость, у.е.):

Таблица 3

Стоимость шумозащитного комплекса с отдельными ШЗК

Дополнительные мероприятия	Высота ШЗК (Н, м) и стоимость всего комплекса (К и ЧПС, у.е.)					
	ШЭпп	ШЭпо	ШЭфп	ШЭфо	ШН (0,5; 2)	ШН (1; 2)
ШО	5	6	4,5	5,5	5,8	7
	15247,4	16548,3	15189,9	26480,1	12440,4	14064,4
	25820,6	22111,0	26013,7	41097,2	18242,6	18602,5
ШО+ЛП	4,5	5,5	4	5	4,9	5,9
	16945,7	18214,2	16830,6	23931,8	13658,0	14840,3
	29680,3	26352,7	29733,3	42039,0	21649,6	21859,9
ШО+ВДН	4,5	5,5	4	5	4,8	5,8
	-	-	-	-	13775,1	14940,4
	-	-	-	-	25996,0	26223,9
ЛП+ШО+ВДН	4	4,5	3,5	4	4,2	5
	18870,0	18610,0	18697,3	23998,3	15432,1	16268,5
	38049,7	33262,3	37962,6	47002,4	30061,6	30120,1
ШЗ+ШО	3	4	-	3,5	3,2	3,8
	18835,8	19217,8	-	23898,8	15657,6	16172,1
	38614,9	35461,7	-	47560,7	31551,6	31542,7

Таблица 4

Стоимость шумозащитного комплекса с комбинированной ШЗК(ШН+ШЭ)

Доп. меро- приятия и вид ШЭ	Высота ШН и ШЭ (Н, м) и стоимость всего комплекса (К и ЧПС, у.е.)							
	ШН (1; 2)				ШН (0,5; 2)			
ШЭфп	2	2,5	3	3,5	2	2,5	3	3,5
ШО	3,7	3,0	2,2	-	3,0	2,4	1,9	-
	16875,2	16926,2	16996,6	-	16292,9	16493,8	16813,7	-
	25888,7	27119,0	28371,7	-	25765,2	27021,1	28455,4	-
ШО+ЛП	2,9	2,2	-	-	2,4	1,8	-	-
	18490,5	18637,3	-	-	18134,5	22285,6	-	-
	30117,1	31458,1	-	-	30107,5	31455,6	-	-
ШО +ВДН	2,8	2,1	-	-	2,3	-	-	-
	18641,9	18800,6	-	-	17989,6	-	-	-
	34540,4	35895,4	-	-	34518,1	-	-	-
ЛП+ШО +ВДН	2,1	-	-	-	1,8	-	-	-
	20441,4	-	-	-	24152,3	-	-	-
	38981,8	-	-	-	39051,7	-	-	-

Продолжение таблицы 4

ШЭпп	2	2,5	3	3,5	2	2,5	3	3,5
ШО	4,5	3,8	3,0	2,3	3,7	3,1	2,5	1,9
	17412,9	17310,6	17214,0	17291,2	16644,9	16716,4	16849,4	17044,0
	25986,7	26908,8	27837,4	28967,0	25847,6	26798,1	27841,1	28976,2
ШО+ЛП	3,5	2,8	2,1	-	2,9	2,3	-	-
	18744,0	18761,3	18862,5	-	18260,3	18413,8	-	-
	29886,1	31592,5	32104,1	-	29850,8	30924,4	-	-
ЛП+ШО +ВДН	2,6	2	-	-	2,2	-	-	-
	20541,5	20725,8	-	-	20273,8	-	-	-
	38573,6	39827,3	-	-	38621,5	-	-	-

Таблица 5

Стоимость шумозащитного комплекса с комбинированной ШЗК(ШВ+ШЭ)

Доп. мер-ия и вид ШЭ	Высота ШВ и ШЭ (Н, м) и стоимость всего комплекса (К и ЧПС, у.е.)										
	ШВ (1,5;17)						ШВ(1;17)				
ШЭ _{фп}	2	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	2	2,5	3,0	3,5	4,0
ШО	-	-	6,3	3,7	1,9	-	5,8	4,6	3,4	2,3	-
	-	-	18496,2	18183,1	18259,7	-	17034,6	9907,5	17451,4	17743,2	-
	-	-	30163,6	30951,4	32199,1	-	27226,2	28400,6	29634,1	30975,4	-
ШО +ЛП	-	5,4	3,3	1,7	-	-	4,4	3,3	2,2	-	-
	-	19790,3	27317,0	19843,6	-	-	18795,5	19059,9	19354,3	-	-
	-	32841,2	33883,8	35218,3	-	-	31371,2	32667,3	34013,1	-	-
ШО +ВДН	-	5,1	3,1	-	-	-	4,2	3,1	2,1	-	-
	-	19905,2	19855,3	-	-	-	18952,2	19222,0	19551,0	-	-
	-	37219,9	38318,2	-	-	-	35766,7	37071,9	38474,5	-	-
ЛП +ШО +ВДН	4,9	3,1	1,7	-	-	-	3,2	2,2	-	-	-
	21473,2	21496,0	21710,3	-	-	-	20894,5	21221,1	-	-	-
	35230,2	41404,6	42814,4	-	-	-	40210,6	41609,2	-	-	-
ШЗ +ШО	2,3	-	-	-	-	-	1,7	-	-	-	-
	21734,5	-	-	-	-	-	21561,0	-	-	-	-
	42037,8	-	-	-	-	-	42294,5	-	-	-	-

Продолжение таблицы 5

ШЭ _{пн}	2	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	2	2,5	3,0	3,5	4,0
ШО	-	-	-	7,6	4,1	2,0	7,6	6,1	4,8	3,5	2,4
	-	-	-	19262,9	18490,4	18921,8	17535,8	17496,3	17584,3	17714,2	17945,7
	-	-	-	31316,8	31433,5	34137,0	27640,7	28333,8	29236,5	30208,5	31347,8
ШО +ЛП	-	-	5,5	3,3	-	-	5,6	4,3	3,2	2,1	-
	-	-	20115,7	19923,4	-	-	19002,0	19106,1	19315,7	19555,3	-
	-	-	33603,8	34404,6	-	-	31300,4	32229,9	33332,9	34485,6	-
ШО +ВДН	-	-	5,1	3,0	-	-	5,4	4,2	3,0	2	-
	-	-	20193,1	20054,0	-	-	19152,7	19297,6	19478,3	19752,3	-
	-	-	33428,6	38801,8	-	-	35686,0	36682,7	37738,3	38947,5	-
ЛП +ШО +ВДН	7,6	4,7	2,8	-	-	-	4,0	3,0	1,9	-	-
	22309,8	21746,8	21690,0	-	-	-	20927,6	21176,6	21421,7	-	-
	40688,1	41051,8	42012,3	-	-	-	39854,0	41022,3	42184,0	-	-
ШЗ +ШО	3,5	2,0	-	-	-	-	2,4	1,5	-	-	-
	21878,3	21992,0	-	-	-	-	21534,1	-	-	-	-
	41688,5	42850,2	-	-	-	-	41839,2	-	-	-	-

Таким образом, полученные следующие результаты. Без обязательного ШЗН оптимальным является шумозащитный комплекс: ШО+ШН (0,5;2) 5,8 м (18242,6 у.е.) Возможен вариант ШО + ШН (1;2) 7 м (18602,5 у.е.). В случае предпочтения ШЭ оптимальным является вариант: ШО + ШЭпо(бетон) 6 м (22111,0 у.е.). В качестве дополнительного шумозащитного мероприятия целесообразно применение ШО. Однако следует учесть, что невозможно полностью оценить эксплуатационные затраты остекления, они переложены на собственников жилья. Его применение с комбинациями ШЗК выше. Так, вариант ШО+ШН(0,5;2) 3 м + ШЭфп 2 м обойдётся в 25765,2 у.е., ШО+ ШН(1;2) 3,7 м + ШЭфп 2 м в 25888,7 у.е., а ШО + ШВ(1;17) 5,8 м + ШЭфп 2 м составит 27226,2 у.е. Это является следствием выбора фундамента ШЭ. Также отметим, что вариант с выемкой дорожки только для защиты застройки, находящейся с одной стороны от дороги.

Заключение

Развитие транспортной инфраструктуры и увеличение интенсивности транспортной деятельности создаст ещё большую акустическую нагрузку на жилые территории. Снижение этой нагрузки обеспечивается только комплексом шумозащитных мероприятий, стоимость которых соизмерима со стоимостью дороги, поэтому актуальна задача его оптимизации по экономическому критерию.

Рассмотрена задача оптимизации комплекса мероприятий для защиты от железнодорожного шума, приводится алгоритм, позволяющий проектировщику выбрать оптимальный вариант шумозащиты.

На начальном этапе методом динамического программирования определяются оптимальные меры или сочетания мер дополнительной защиты (остекление, конструктивное улучшение путей, зелёные насаждения). Далее оптимизируются однотипные шумозащитные конструкции (например, определяется оптимальный по ЧПС материал ШЭ). На следующем этапе к каждому эффективному сочетанию дополнительных мер подбирается необходимая минимальная высота ШЗК, обеспечивающая требуемое снижение шума. Если значение меньше минимального или больше максимально допустимого, то такой вариант не рассматривается. Составляется

матрица вариантов решений (её пример в таблице 3). Для поиска оптимального сочетания мер с применением комбинаций ШЗК (ШН+ШЭ, ШВ+ШЭ) решается серия задач: перебирая возможные значения высоты экрана определённого вида (от минимальной до высоты на шаг ниже полученной на предыдущем этапе), подбирается высота насыпи (выемки) определённого вида, которые вместе с рассматриваемым сочетанием дополнительных мер обеспечивают заданную эффективность. Т.е. сначала решается задача целочисленного программирования, затем результаты её решения применяются к отысканию оптимальных сочетаний ШЗК. Формируются таблицы результатов (матрица): таблицы 4-5.

При оптимизации только по экономическому критерию, из матриц вариантов выбирается комплекс мероприятий с минимальным значением ЧПС. В случае, когда выбор производится с учётом технологических и эксплуатационных показателей, не влияющих на акустическую эффективность ШЗК, варианты с близкими к минимальному значениям ЧПС сравниваются по выбранным ЛПР критериям (например, по бально-рейтинговой системе).

Список литературы

1. Буторина М.В., Куклин Д.А., Иванов Н.И. Решение проблемы снижения шума на железных дорогах Российской Федерации // VI Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации» : сб. трудов — Санкт-Петербург : БГТУ, 2017. — С. 79-92.
2. Иванов Н.И., Куклин Д.А., Матвеев П.В., Олейников А.Ю. Снижение шума подвижного состава железнодорожного транспорта в источнике образования и на пути распространения // Защита от повышенного шума и вибрации: доклады V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Россия, Санкт-Петербург, 18-20 марта 2015 г.) / под ред. Н.И. Иванова – СанктПетербург: Изд-во «Айсинг» – 2015. – С. 125–144.
3. Куклин Д.А., Матвеев П.В. Расчётные схемы определения шума от железнодорожного транспорта, "Noise Theory and Praticce", Том 2 №1 (I, 2016), Стр. 24-33
4. Борцова С.С. Выбор оптимальной шумозащитной конструкции по параметрам, влияющим на акустическую эффективность, "NoiseTheoryandPraticce", Том 7 №5 (V, 2021), Стр. 48-65
5. Иванов Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом [Текст] : учебник для вузов / Н. И. Иванов. - Изд. 4-е, перераб. и доп. - М. : Логос, 2015. - 431 с. : ISBN 978-5-98704-659-3
6. Борцова С.С. Стоимостная оценка шумозащитной конструкции, "NoiseTheoryandPraticce", Том 8 № 1 (I, 2022), с. 61-71.
7. Борцова С.С. Экономическая эффективность шумозащитных конструкций, "NoiseTheoryandPraticce", Том 8 №2 (II, 2022), с. 45-55

References

1. Butorina M.V., Kuklin D.A., Ivanov N.I Solving the problem of noise reduction on the railways of the Russian Federation // VI All-Russian research to practice conference with international participation «Protection against excessive noise and vibration» – St. Petersburg: BSTU, 2017. – P. 79-92.

2. Ivanov N.I., Kuklin D.A., Matveev P.V., Oleinikov A.Yu., Noise reduction of rolling stock of railway transport at the source of formation and on the path of propagation // Protection against excessive noise and vibration: reports of V All-Russian research to practice conference with international participation – St. Petersburg: ‘Aising’. – 2015. – P. 125-144.

3. Kuklin D.A., Matveev P.V. Calculation models of noise from rail transport. "Noise Theory and Praticce", Vol. 2 No 1 (I, 2016), pp. 24-33.

4. Bortsova S.S. Selection of the optimal noise barrier according to parameters affecting acoustic efficiency, "Noise Theory and Praticce", Vol. 7 No 5 (V, 2021), pp. 48-65

5. Ivanov N.I. Engineering acoustics. Theory and practice of noise control [Text]: textbook for universities / N.I. Ivanov. – 4th edition. Moscow: ‘Logos’. – 2015. – 431 p. ISBN 978-5-98704-659-3

6. Bortsova S.S. Cost estimation of noise protection structures, "NoiseTheoryandPraticce", Vol. 8 No 1 (I, 2022), pp. 61-71

7. Bortsova S.S. Economic efficiency of the noise protection, "NoiseTheoryandPraticce", Vol. 8 No 2(II, 2022), pp. 45-55

УДК: 331.472.226

OECD: 01.03.AA

Шум при дыхании водолаза в оборудовании со шланговой подачей дыхательной смеси

Костив А.Е.

К.т.н, старший научный сотрудник лаборатории акустической томографии, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток, РФ

Аннотация

Аппараты со шланговой подачей дыхательной смеси в водолазный шлем являются наиболее шумными. Шланги и воздушное пространство шлема являются звуковым каналом от источника шума к органу слуха водолаза. Цель данной работы - заинтересовать специалистов проблемой наличия шума при водолажном погружении и привлечь к организации мероприятий по изучению шумности водолазного снаряжения. В работе показано, что спектральные характеристики шумов вдоха и выдоха различаются. Вдох вносит основной вклад в шумность оборудования и имеет узкополосные шумовые составляющие. Эквивалентный уровень шума дыхания водолаза в шлеме со шланговой подачей воздуха на глубине 8 м, с легочной вентиляцией 29 л/мин находится в пределах порога санитарных правил кратковременного воздействия шума на человека 110 дБА, но может оказывать существенный дискомфорт при производстве водолазных работ. Предлагается предпринимать меры по снижению шумности оборудования, в частности, по магистрали вдоха (редуктор высокого давления, легочный автомат) на стадии разработки водолазного снаряжения с кабель-шланговой связкой.

Одновременно, в работе продемонстрирована возможность оценки легочной вентиляции водолаза под водой по шумам вдоха.

Ключевые слова: шум, водолаз, легочная вентиляция, дыхательный цикл, кабель-шланговая связка.

Breathing noise of a diver with surface-supplied diving equipment with umbilical cable

Kostiv A.E.

PhD, senior researcher of the Acoustic Tomography Laboratory, Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

Abstract

A surface-supplied diving equipment with umbilical cable are the most noisy. The hoses and air space of the helmet are a sound channel from a noise source to a diver's hearing organ. The purpose of this research is to interest specialists in the problem of noise and to involve in the organization of measures to reduce the noise of diving equipment. The paper shows that the spectral characteristics of inhalation and exhalation noises differ. Inhalation is main source of noise and has narrow-band noise components. Breathing noise level of a diver in helmet with a hose air supply to depth of 8 m with breathing rate of 29 l/min is within the threshold of sanitary standards for short-term noise exposure of 110 dBA, but can cause significant discomfort during diving. It is proposed to pay attention to reducing the noise of equipment, in particular, along the inhalation line (pressure-reduction regulator, automatic diluent valves) at the stage of developing diving equipment.

It also shows the possibility of assessing the breathing rate of a diver under water by the sound of inspiration.

Keywords: *noise, diver, breathing rate, respiratory cycle, umbilical cable.*

Введение

В процессе профессиональной деятельности водолазы подвергаются воздействию шума из различных источников. Аппараты со шланговой подачей дыхательной смеси в водолазный шлем являются наиболее шумными, так как шланги и воздушное пространство шлема являются звуковым каналом от источника шума к органу слуха водолаза. Существуют публикации [1–8], которые сообщают, что водолазы подвержены ухудшению слуха быстрее, чем основная масса населения.

Уровни шума зависят от конструкции подводного дыхательного аппарата, глубины погружения, легочной вентиляции, состава дыхательной смеси. Водолазы используют различные дыхательные смеси, которые могут различаться как по составу, так и по процентному соотношению входящих газов. Могут применяться следующие составы: воздух, при обогащении смеси кислородом смесь называют Nitrox (азот и кислород); Heliox (гелий и кислород); Trimix (азот, гелий и кислород) и Hydreliox (водород, гелий и кислород). Так, использование Heliox в качестве дыхательного газа создает меньший уровень шума, чем воздух при тех же условиях. Уровень шума увеличивается с глубиной и увеличением легочной вентиляции [9]. Под термином легочная вентиляция (ventilation volume [10]) понимается объем дыхательной смеси прошедшей через легкие человека за одну минуту. Под термином частота дыхания (respiratory rate) понимается количество дыхательных циклов в минуту [11]. Использование маски и «мокрого» капюшона снижают уровень шума на 10 дБА и более [12,13].

Предлагается использовать «наземные» предельно допустимые уровни звука независимо от глубины погружения (давления среды) и состава дыхательной смеси [9]. Так, эквивалентный уровень звука не должен превышать 80 дБА, предельно допустимый уровень звука в машинном отделении корабля с постоянной вахтой составляет 85 дБА, безвахтенное обслуживание - 110 дБА [14 стр. 13, 60]. Далее по тексту предельно допустимый уровень звука 85 дБА называем порогом воздействия шума на человека за рабочую смену, а 110 дБА - порогом кратковременного воздействия шума на человека.

1. Методы

При работе в тяжелом кабель-шланговом водолажном снаряжении со шлемом СВУ-5 (АО «Тетис Про») выполнена запись дыхательных шумов водолаза на глубине 8 м, водолаз находился на морском дне. Регистрация шумов производилась с использованием штатной станции кабельной водолазной подводной связи СВС-2П-М (АО «Тетис Про»). К станции связи на пульте руководителя спусками подключались звуковая карта transit (M-audio) и персональный компьютер. Запись велась с частотой дискретизации 48 кГц, глубиной квантования 24 бит. Сигналограмма фрагмента записи представлена на рисунке 1. В качестве датчика шумов дыхания использовался электродинамический микрофон ME-16R HotMic (Ocean Technology Systems), входящий в комплект водолазного снаряжения, установленный в воздушном зазоре в воротниковой зоне. Дыхание водолаза обеспечивала кабель-шланговая связка длиной 125 м. Через шланг водолазу с судна подавалась газовая смесь - воздух, выдох осуществлялся в воду (открытая схема дыхания). Анализ шумовых сигналов выполнен в программном анализаторе спектра SpectraPLUS (Pioneer Hill Software).

Легочная вентиляция водолаза под водой определялась акустическим способом. Оценивалась суммарная продолжительность шумов вдохов за минутный период по формуле:

$$BR = \sum t_i * BR_{max}, \quad (1)$$

где BR – легочная вентиляция водолаза, л/мин; t_i – продолжительность каждого вдоха, мин; BR_{max} – максимальная легочная вентиляция дыхательного аппарата (для СВУ-5 определена производителем 90 л/мин).

Оценка шумового воздействия на человека во время водолазного погружения производилась путем сравнения значения эквивалентного уровня звука [15] в шлеме с предельным допустимым уровнем звука [14]. Эквивалентный уровень звука определялся встроенным инструментом анализатора спектра «Total Power» измерением трех фрагментов записи в начале, середине и конце погружения. Длительность фрагментов 5 минут каждый. Так же оценивался эквивалентный уровень звука на задержке дыхания по трем фрагментам (где были эти задержки). Инструмент «Total Power» отображает уровень среднеквадратичной мощности для всего спектра, взвешенного по частотной характеристике А, что соответствует показаниям шумомера откалиброванного в единицах уровня звукового давления (сообщает справочная система анализатора спектра). Определение эквивалентного уровня звука за рабочую смену выполнено по существующим правилам расчета [15,16]. В расчете учитывалось максимально допустимое время погружения 6 часов [17 п.142] и длительность изучаемого в настоящей работе погружения.

Регистрация шумов водолаза производилась во время плановых водолазных работ без вмешательства в конструкцию водолазного оборудования с соблюдением норм и правил безопасного погружения. Общая продолжительность записи погружения составила 23 минуты. Температура воды +18 градусов Цельсия. Работы выполнялись на мелководье залива Петра Великого в Японском море.

2. Результаты

2.1. Оценка легочной вентиляции по шумам вдоха

Продолжительность шумов вдоха определялась с использованием спектрограммы. Водолаз находился под водой со средней частотой дыхания 17 дыхательных циклов в минуту и средней продолжительностью (и стандартным отклонением) вдоха 1,13 (0,3) секунды. На рисунке 1 представлена спектрограмма шумов трех дыхательных циклов. Каждый цикл состоит (слева направо) из выдоха, вдоха и задержки дыхания. В одном из циклов дыхания вдох показан прямоугольником. Средняя легочная вентиляция, оцененная акустическим способом (рис. 1, формула 1) составила 29 л/мин.

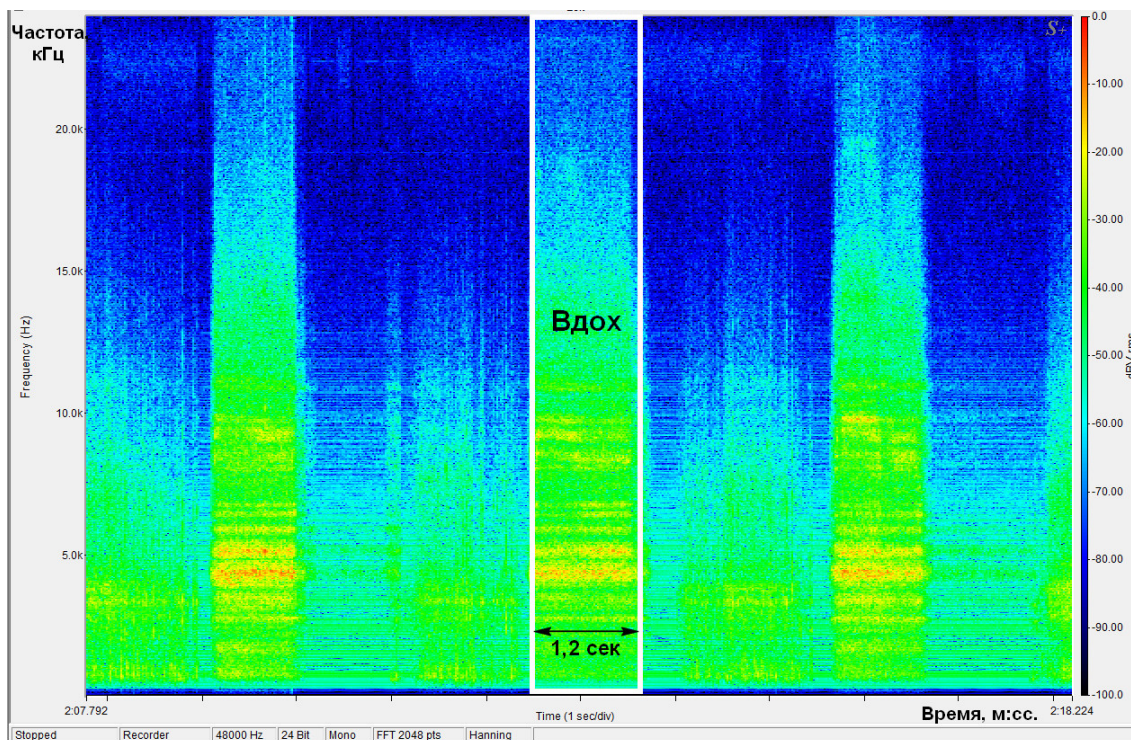


Рис. 1. Спектрограмма трех циклов дыхания

2.2. Шум при дыхании водолаза

Корректированный по шкале А уровень звукового давления в 1/3 октавной полосе частот дБА показан на рисунке 2. Спектр шумов водолазного снаряжения при дыхании водолаза показан графиками: 1 (зеленый, лазурный, фиолетовый) — дыхание в начале, середине и конце погружения; 2 (розовый, коричневый, оранжевый) — фон (водолаз не дышит) в начале, середине и конце погружения; 3 — инструмент «Total Power» показывает среднее квадратичное значение мощности спектра (лазурный график) шумов водолазного снаряжения. Показания инструмента «Total Power» сведены в таблицу 1. Эквивалентные уровни звука в начале, середине и конце погружения различаются не более, чем на 3 дБ.

Таблица 1

Эквивалентный уровень превышения шума дыхания над фоном

№	Шумы дыхания, дБА	Фон, дБА	Эквивалентный уровень превышения шума дыхания над фоном, дБА
1	-12,95	-44,26	31,31
2	-14,63	-42,95	28,32
3	-15,06	-43,53	28,47

Спектральные характеристики шумов вдоха и выдоха показаны на рисунке 3. Выдох создает широкополосный шум с максимальным значением спектра над фоном 17 дБ. Вдох вносит основной вклад в шумность оборудования и создает широкополосный шум в диапазоне частот от 0,5 до 20 кГц, а также имеет узкополосные шумовые составляющие над фоном до 37 дБ.

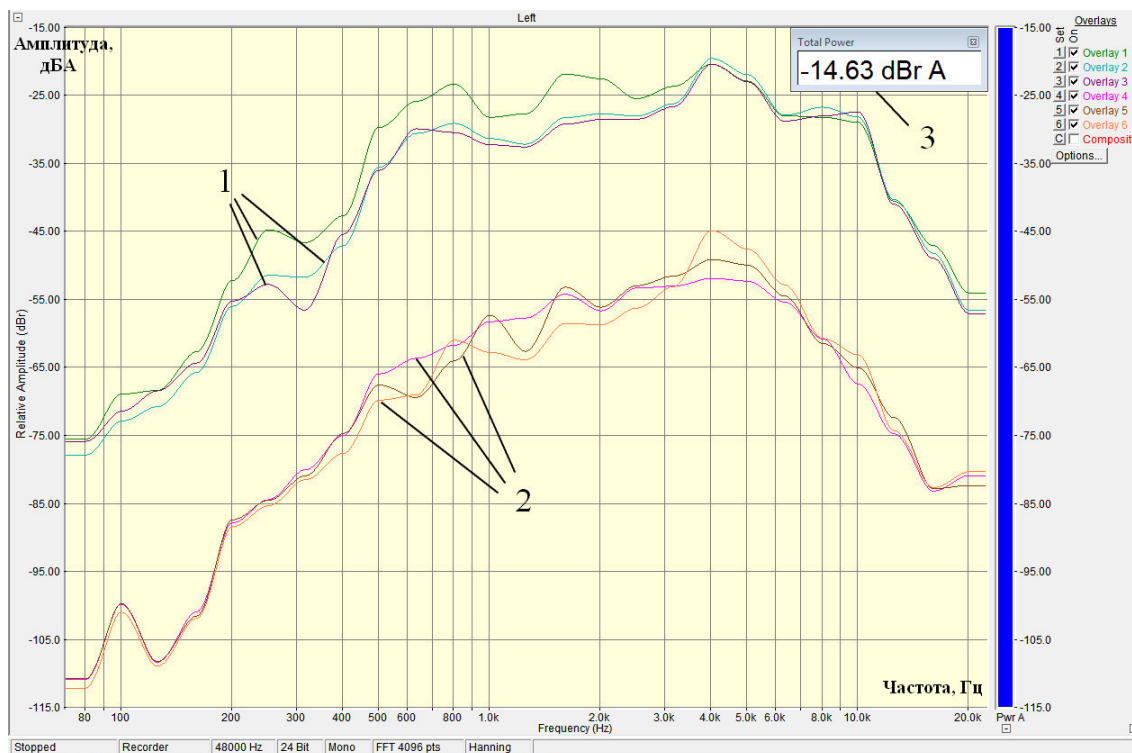


Рис. 2. Спектры фона (2) и шумов дыхания (1) водолаза в шлеме со шланговой подачей дыхательной смеси

3. Обсуждения

Контроль легочной вентиляции водолаза во время погружения может производиться по прибору прямого учета скорости расхода дыхательной смеси, который встроен в арматуру водолазного оборудования, по скорости снижения давления в баллоне с дыхательной смесью. Предложенный в работе акустический способ оценки легочной вентиляции водолаза во время погружения по шумам вдоха может служить дополнением к основным способам контроля. Частота регистрации мгновенного значения легочной вентиляции водолаза акустическим способом определяется продолжительностью дыхательного цикла, то есть единицы секунд.

Водолазное снаряжение разных типов имеют сходные узлы, например, редуктор высокого давления (первая ступень регулятора давления). В работе [18,19] сообщается, что источником узкополосного шума на вдохе в легком водолазном снаряжении с открытой схемой дыхания, подачей дыхательной смеси из баллона является редуктор высокого давления. Потому в настоящей работе делается предположение, что источником узкополосного шума на вдохе в снаряжении с кабель-шланговой связкой служит редуктор высокого давления и легочный автомат.

Определение абсолютных значений уровня акустического давления у водолаза в шлеме под водой при различных режимах работы водолазного снаряжения представляет технические, этические и организационные трудности. Задача решается использованием «искусственного уха» [9]. Предположив, что уровень шумового фона не сильно зависит от модели водолазного оборудования с кабель-шланговой связкой и приняв фоновый шум в шлеме 58,5 дБА – среднееквадратичное значение спектра уровня звука фона [9 стр. 2416]. Суммируя уровень превышения шума дыхания над фоном (Табл. 1) со значением фонового шума 58,5 дБА получаем 89,8; 86,8 и 87,0 дБА в начале, середине и конце погружения, соответственно. Затем рассчитывается эквивалентный уровень

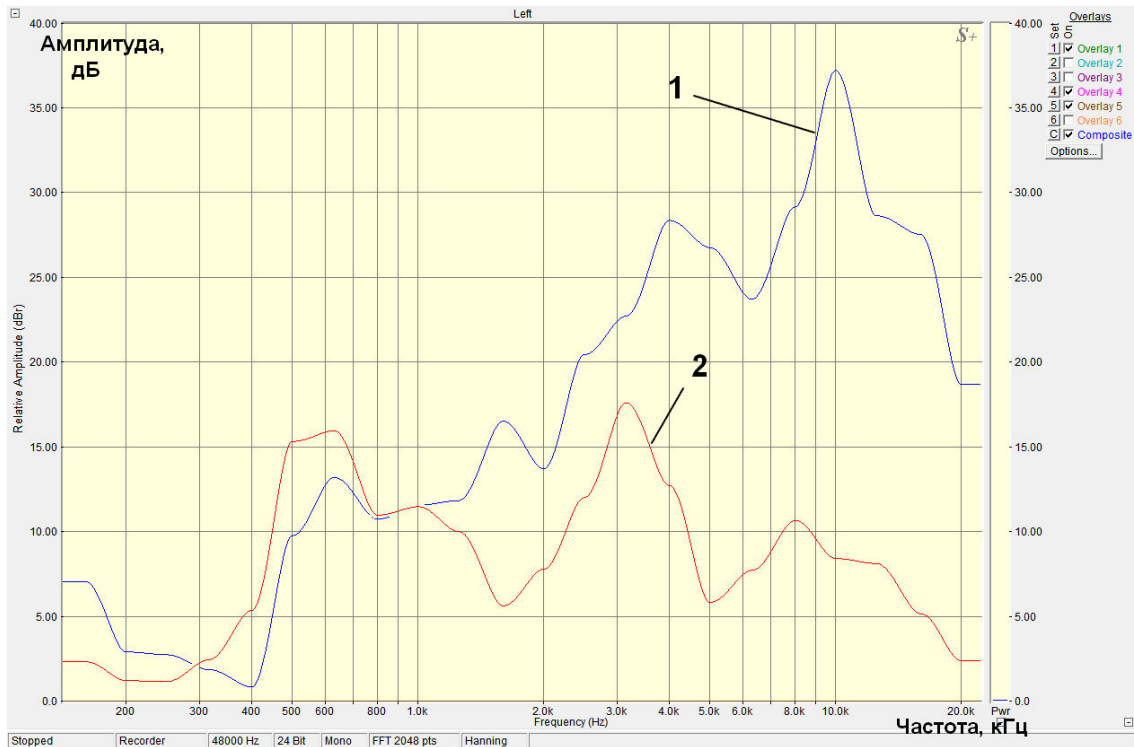


Рис. 3. Отношение спектров шума вдоха (1) и выдоха (2) водолаза к фону в шлеме со шланговой подачей дыхательной смеси

звука шумового воздействия при погружении 23 мин., на глубину 8 м, использовании в качестве дыхательной смеси воздуха и легочной вентиляции 29 л/мин, который составил 74,9 дБА. При этом, эквивалентный уровень звука за рабочую смену составляет 86,8 дБА (Рис.4). Значение эквивалентного уровня звука за рабочую смену сопоставимо с порогом санитарных норм [14] воздействия шума на человека за рабочую смену 85 дБА и согласуется с результатами других работ [9].

Исходные данные		Результаты промежуточные	
Число членов рабочей группы	1	Среднее значение уровня выборочного измерения, дБ	88,1
Число выборочных измерений	3	Составляющая неопределенности прибор+микрофон, $C2^2(u2^2+u3^2)$	1,5
Эффективная длительность рабочего дня, час	6	Стандартное отклонение уровня выборочных измерений	1,7
Результаты выборочных измерений Lp, A, eqT, n , дБ	89,8	Статистическая составляющая, $s1u1$	3,1
	86,8		
	87		
		Результаты итоговые	
		Эквивалентный уровень смены LEX8h	86,8
		Стандартная неопределенность $u(LEX8h)$	3,3
		Расширенная неопределенность $U(LEX8h), P=95\%$	6,7
		Расширенная неопределенность $U(LEX8h), P(\text{меньше } DU)=95\%$	5,5

Рис. 4. Пример отчета расчета эквивалентного уровня звука за рабочую смену программным средством [16]

В настоящем исследовании не рассматривались возможные источники шума из внешней среды. Такие как шум винтов [20], работа гидролокатора, подводного инструмента. Описанное в разделе «Методы» оборудование, хоть и позволяет без вмешательства в конструкцию водолазного снаряжения оценивать шум при дыхании водолаза со шланговой подачей дыхательной смеси, все же не является, с метрологической точки зрения, шумомером, потому полученные в работе уровни звука нуждаются в

проверке соответствующим ГОСТу оборудованием [15].

Заключение

Оценка шумового воздействия на человека в течении предельно допустимого времени водолазного погружения со шланговой подачей дыхательной смеси показала, что уровень шума дыхания водолаза в шлеме сопоставим с порогом санитарных правил воздействия шума на человека за рабочую смену. Шум дыхания водолаза в шлеме может оказывать существенный дискомфорт [21] при производстве водолазных работ, а также негативное влияние на подводную фауну в районе проведения работ.

Предлагается уделять внимание изучению шумности оборудования, в частности, по магистрали вдоха (редуктор высокого давления, легочный автомат) на стадии разработки или модернизации водолазного снаряжения с кабель-шланговой связкой.

Список литературы

1. Zannini D., Odaglia G., Sperati G. Auditory changes in professional divers // Underwater physiology V—Proceedings of the Fifth Symposium on Underwater Physiology. Federation of American Societies for Experimental Biology, Bethesda. 1976. P. 675–684.
2. Molvaer O.I., Lehmann E.H. Hearing acuity in professional divers. // Undersea biomedical research. Undersea Medical Society Inc., 1985. Vol. 12, № 3. P. 333–349.
3. Molvaer O.I., Albrektsen G. Hearing deterioration in professional divers: an epidemiologic study. // Undersea biomedical research. 1990. Vol. 17, № 3. P. 231–246.
4. Zulkafly A.R. et al. Hearing loss in diving—a study amongst Navy divers. // The Medical journal of Malaysia. 1996. Vol. 51, № 1. P. 103–108.
5. Skogstad M., Haldorsen T., Arnesen A.R. Auditory function among young occupational divers: a 3-year follow-up study // Scandinavian audiology. Taylor & Francis, 2000. Vol. 29, № 4. P. 245–252.
6. Skogstad M. et al. Hearing thresholds among young professional divers: a 6-year longitudinal study // Aviation, space, and environmental medicine. Aerospace Medical Association, 2005. Vol. 76, № 4. P. 366–369.
7. Haraguchi H. et al. Progressive sensorineural hearing impairment in professional fishery divers // Annals of Otology, Rhinology & Laryngology. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, 1999. Vol. 108, № 12. P. 1165–1169.
8. Ross J.A. et al. Health status of professional divers and offshore oil industry workers // Occupational Medicine. Oxford University Press, 2007. Vol. 57, № 4. P. 254–261.
9. Langston T., Singh S., Hunt J. Noise characteristics of the Kirby Morgan 37 surface-supplied diving helmet under simulated diving conditions // The Journal of the Acoustical Society of America. Acoustical Society of America, 2021. Vol. 150, № 6. P. 4213–4218.
10. Dreyer S. et al. How to Survive 33 min after the Umbilical of a Saturation Diver Severed at a Depth of 90 msw? // Healthcare. MDPI, 2022. Vol. 10, № 3. P. 453.
11. Костив А.Е., Коренбаум В.И., Дорожко В.М. Акустический мониторинг дыхательного ритма у водолазов in situ по дыхательным шумам // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики. 2020. P. 474–477.
12. Paddan G.S., Lower M. Attenuation of airborne noise by wet and dry neoprene diving hoods // Underwater Technology. 2021. Vol. 38, № 1. P. 3–12.
13. Fothergill D.M., Sims J.R., Curley M.D. Neoprene wet-suit hood affects low-frequency underwater hearing thresholds // Aviation, space, and environmental medicine. Aerospace Medical Association, 2004. Vol. 75, № 5. P. 397–404.

14. Санитарные правила РФ СП 2.5.3650-20 Санитарно-эпидемиологические требования к отдельным видам транспорта и объектам транспортной инфраструктуры.
15. ГОСТ 9612-2016 (ИСО 9612-2016) «Акустика. Измерения шума для оценки его воздействия на человека. Метод измерений на рабочих местах» - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200140579> (дата обращения 06.06.2023).
16. ООО «НТМ-Защита»: Калькулятор для ГОСТ ISO 9612-2016 «Акустика. Измерение шума для оценки его воздействия на человека. Метод измерения на рабочих местах»: [сайт]. Москва – . – URL: https://ntm.ru/UserFiles/File/programm/calculator-9612/calc-9612_publ5_1.xlsx (дата обращения: 06.06.2023). – Режим доступа: свободный. – Электронная таблица.
17. Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ “Об утверждении Правил по охране труда при проведении водолазных работ” от 17.12.2020 №922н: XII Требования к рациональной организации труда, профилактике несчастных случаев, предотвращению производственного травматизма и ограничению тяжести труда. (вступ. в силу с 01.01.2021, срок действия ограничен 31.12.2025) // Консультант Плюс [электронный ресурс] Режим доступа. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_372949/ef6b3a4e9d4c0c03b579a500b9a4d265bd40eb47/dst100011 (дата обращения: 06.06.2023).
18. Donskoy D.M. Acoustic emission mechanism from scuba diving equipment // The Journal of the Acoustical Society of America. Acoustical Society of America, 2007. Vol. 121, № 5. P. 3086–3086.
19. Donskoy D. et al. Turbulence-Induced Acoustic Emission of SCUBA Breathing Apparatus // AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2008. Vol. 1022, № 1. P. 95–98.
20. Prawirasasra M.S. et al. Underwater noise impact of a ferry route on dive patterns of transiting Baltic ringed seals. // Estonian Journal of Earth Sciences. 2022. Vol. 71, № 4.
21. Римская-Корсакова, Л. К. Оценки раздражающего действия шума / Л. К. Римская-Корсакова, П. А. Пятаков, С. А. Шуляпов // Акустический журнал. – 2022. – Т. 68, № 5. – С. 550-561.

References

1. Zannini D., Odaglia G., Sperati G. Auditory changes in professional divers // Underwater physiology V—Proceedings of the Fifth Symposium on Underwater Physiology. Federation of American Societies for Experimental Biology, Bethesda. 1976. P. 675–684.
2. Molvaer O.I., Lehmann E.H. Hearing acuity in professional divers. // Undersea biomedical research. Undersea Medical Society Inc., 1985 Vol. 12, № 3. P. 333–349.
3. Molvaer O.I., Albrektsen G. Hearing deterioration in professional divers: an epidemiologic study. // Undersea biomedical research. 1990. Vol. 17, № 3. P. 231–246.
4. Zulkafay A.R. et al. Hearing loss in diving—a study amongst Navy divers. // The Medical journal of Malaysia. 1996. Vol. 51, № 1. P. 103–108.
5. Skogstad M. et al. Hearing thresholds among young professional divers: a 6-year longitudinal study // Aviation, space, and environmental medicine. Aerospace Medical Association, 2005. Vol. 76, № 4. P. 366–369.
6. Haraguchi H. et al. Progressive sensorineural hearing impairment in professional fishery divers // Annals of Otology, Rhinology & Laryngology. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, 1999. Vol. 108, № 12. P. 1165–1169.
7. Skogstad M., Haldorsen T., Arnesen A.R. Auditory function among young

occupational divers: a 3-year follow-up study // Scandinavian audiology. Taylor & Francis, 2000. Vol. 29, № 4. P. 245–252.

8. Ross J.A. et al. Health status of professional divers and offshore oil industry workers // Occupational Medicine. Oxford University Press, 2007. Vol. 57, № 4. P. 254–261.

9. Langston T., Singh S., Hunt J. Noise characteristics of the Kirby Morgan 37 surface-supplied diving helmet under simulated diving conditions // The Journal of the Acoustical Society of America. Acoustical Society of America, 2021. Vol. 150, № 6. P. 4213–4218.

10. Dreyer S. et al. How to Survive 33 min after the Umbilical of a Saturation Diver Severed at a Depth of 90 msw? // Healthcare. MDPI, 2022. Vol. 10, № 3. P. 453.

11. Kostiv A.E., Korenbaum V.I., Dorozhko V.M. Acoustic monitoring of diver's respiratory rate by respiratory-associated noise in situ // Advanced technologies of hydroacoustics and hydrophysics. 2020. P. 474–477.

12. Paddan G.S., Lower M. Attenuation of airborne noise by wet and dry neoprene diving hoods // Underwater Technology. 2021. Vol. 38, № 1. P. 3–12.

13. Fothergill D.M., Sims J.R., Curley M.D. Neoprene wet-suit hood affects low-frequency underwater hearing thresholds // Aviation, space, and environmental medicine. Aerospace Medical Association, 2004. Vol. 75, № 5. P. 397–404.

14. Sanitary rules of the Russian Federation SP 2.5.3650-20 Sanitary and Epidemiological Requirements for Certain Modes of Transport and Transport Infrastructure Facilities.

15. GOST ISO 9612-2016 «Acoustics. Noise measurement for the purpose of evaluating human exposure to noise. Method of measurements at workplaces» - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200140579> (accessed 06/06/2023).

16. «NTM-Zashita» LLC: Calculator for GOST ISO 9612-2016 «Acoustics. Noise measurement for the purpose of evaluating human exposure to noise. Method of measurements at workplaces»: [website]. Moscow - . - URL: https://ntm.ru/UserFiles/File/programm/calculator-9612/calc-9612_publ5_1.xlsx (date of access: 06/06/2023). - Access mode: free. - Spreadsheet.

17. Order of the Ministry of Labor and Social Protection of the Russian Federation “On approval of the Rules for labor protection during diving operations” dated December 17, 2020 №922n: XII Requirements for the rational organization of work, prevention of accidents, prevention of industrial injuries and limitation of the severity of labor. (effective from 01/01/2021, validity period is limited to 12/31/2025) // Consultant Plus [electronic resource] Access mode. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_372949/ef6b3a4e9d4c0c03b579a500b9a4d265bd40eb47/dst100011 (date of access: 06/06/2023).

18. Donskoy D.M. Acoustic emission mechanism from scuba diving equipment // The Journal of the Acoustical Society of America. Acoustical Society of America, 2007. Vol. 121, № 5. P. 3086–3086.

19. Donskoy D. et al. Turbulence-Induced Acoustic Emission of SCUBA Breathing Apparatus // AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2008. Vol. 1022, № 1. P. 95–98.

20. Prawirasasra M.S. et al. Underwater noise impact of a ferry route on dive patterns of transiting Baltic ringed seals. // Estonian Journal of Earth Sciences. 2022. Vol. 71, № 4.

21. Rimskaya-Korsakova L.K., Pyatakov P.A., Shulyapov S.A. Evaluations of the Annoyance Effects of Noise // Acoustical Physicsthis – 2022. – Vol. 68, № 5. – P. 550-561.

Сетевой Научный Журнал "Noise Theory and Practice"

ООО "ИАК"

при БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова



Главная цель

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

Основные задачи

Основными задачами Журнала являются:

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

Научное цитирование Журнала

Журнал является общедоступным для чтения неограниченным числом пользователей.

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

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

ООО"ИАК"
г. Санкт-Петербург
2023