

ISSN 2412-8627

Vol. 9 No. 4

12+

# Noise

## Theory and Practice

Scientific Journal



IV  
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



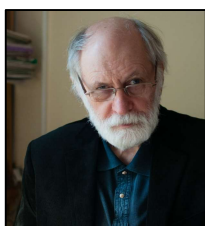
Кандидат технических наук, доцент кафедры "Экология и производственная безопасность" Балтийского государственного технического университета "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова (г. Санкт-Петербург, РФ)

## 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



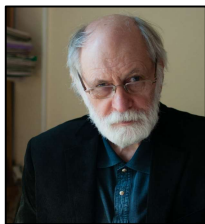
Ph.D. of Engineering Science, Senior Researcher of the Scientific Research Unit, Assistant Professor of the Department of Ecology and Industrial Safety of the Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov (St. Petersburg, Russia)

## 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 №4

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 виброакустики и принимает работы по направлениям:  
- 29.00.00 Физика  
- 29.37.00 Акустика  
- 43.00.00 Общие и комплексные проблемы естественных и точных наук  
- 87.00.00 Охрана окружающей среды. Экология человека

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

**Фактический адрес редакции**

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

www.noisetp.com

e-mail: secretary@noisetp.com

**Ответственный секретарь**

Храпко Н. Н.

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

**Свидетельство**

ЭЛ № ФС 77-74057

## Содержание

- |   |     |
|---|-----|
| <b>Кольхалин В.М.</b>   | РУС |
| Моделирование дистанционного мониторинга твердых остатков нефтепродуктов в резервуарах<br>стр. 7-24   |     |
| <b>Жилина Т.С., Плотников А.С., Ощенко Д.Ю.</b>   | РУС |
| Расчет звукоизолирующего перекрытия в помещении крышной котельной жилого дома в городе Салехарде<br>стр. 25-38  |     |
| <b>Шабарова А.В., Борцова С.С., Буторина М.В., Кондратьев С.А.</b>  | РУС |
| Рекомендации по выбору шумозащитных мероприятий для защиты от шума железной дороги<br>стр. 39-50  |     |
| <b>Борцова С.С., Буторина М.В., Иванов Н.И.</b>   | РУС |
| Расчет акустической эффективности насыпи<br>стр. 51-58  |     |
| <b>Борцова С.С., Буторина М.В., Иванов Н.И.</b>   | РУС |
| Расчет акустической эффективности выемки<br>стр. 59-66  |     |
| <b>Писарев П.В., Ахунзянова К.А.</b>  | РУС |
| Численное исследование акустических процессов в модельных каналах для разработки авиационных звукопоглощающих конструкций на основе конического заполнителя<br>стр. 67-78 |     |
| <b>Югай Л.А.</b>  | РУС |
| Возможность применения метода измерения промышленных предприятий с множественными источниками шума в условиях плотной застройки промышленными предприятиями<br>стр. 79-91 |     |
| <b>Тюрина Н.В., Воронова А.А., Фиев К.П.</b>  | РУС |
| Оценка эффективности кабины для снижения шума на рабочих местах<br>стр. 92-101  |     |
| <b>Воронова А.А., Иванов Н.И., Тюрина Н.В.</b>  | РУС |
| Расчет акустической эффективности кабин, устанавливаемых в помещениях<br>стр. 102-107   |     |

**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

<b>Kolykhalin V.M.</b>	RUS
Modeling of distant monitoring of solid residual oil products in tanks pp. 7-24	
<b>Zhilina T.S., Plotnikov A.S., Oshchenko D.Yu.</b>	RUS
Calculation of soundproofing floors in the roof boiler room of a residential building in the city of Salekhard pp. 25-38	
<b>Shabarova A.V., Bortsova S.S., Butorina M.V., Kondratev S.A.</b>	RUS
Recommendations for selection of sound protection measures to protect against railway noise pp. 39-50	
<b>Bortsova S.S., Butorina M.V., Ivanov N.I.</b>	RUS
Calculation of acoustic efficiency of embankment pp. 51-58	
<b>Bortsova S.S., Butorina M.V., Ivanov N.I.</b>	RUS
Calculation of acoustic efficiency of excavations pp. 59-66	
<b>Pisarev P.V., Akhunzianova K.A.</b>	RUS
Numerical study of acoustic processes in model channels for the development of wideband aviation sound-absorbing structures based on conical filler pp. 67-78	
<b>Yugay L.A.</b>	RUS
The possibility of using the measurement method of industrial enterprises with multiple noise sources in conditions of dense construction by industrial enterprises pp. 79-91	
<b>Tyurina N.V., Voronova A.A., Fiev K.P.</b>	RUS
Evaluation of cabin insertion loss for noise reduction in workplaces pp. 92-101	
<b>Voronova A.A., Ivanov N.I., Tyurina N.V.</b>	RUS
Calculation of the acoustic efficiency of cabins installed indoors pp. 102-107	



УДК: 681.128.8(088.8)

OECD: 2.03

## Моделирование дистанционного мониторинга твердых остатков нефтепродуктов в резервуарах

Колыхалин В.М.

Ведущий специалист научно-конструкторского управления Санкт-Петербургского филиала АО «Атомэнергопроект» - «Санкт-Петербургский проектный институт», г. Санкт-Петербург, РФ

### Аннотация

Приводятся исследование и аппаратная реализация системы акустического мониторинга объема остатков нефтепродуктов на основе волновой модели звукового поля в накопительных резервуарах нефтяных терминалов. Предлагаются результаты компьютерного и физического моделирования процессов звукопередачи акустических колебаний при возбуждении акустических колебаний воздушного объема ударным источником с различной дислокацией для диагностики объемов (массы) твердых остатков нефтепродуктов в цилиндрических резервуарах. Метод нормирования интенсивности акустических колебаний относительно известного воздушного объема (пустого резервуара) является вполне приемлемым подходом к реализации экспресс-регистрации объема остатка и обладает достаточной точностью для предварительной оценки экономических потерь при погрузке танкеров нефтепродуктами. Обосновывается практическое использование метода акустической регистрации объемов твердых остатков нефтепродуктов при разработке задач надежно-ориентированного технического обслуживания оборудования с применением методологии RCM, предполагающей проведение анализа степени критичности элементов для обеспечения безопасности, производительности и экономической эффективности эксплуатации нефтяного терминала. Предлагаемые бесконтактные методы акустической регистрации объемов твердых и жидких нефтепродуктов, сыпучих и смешанных агрегатных композиций, не исключая и ядерные отходы, могут найти применение в средствах воздушного и водного транспорта.

**Ключевые слова:** интенсивность, остаток нефтепродуктов, микрофон, резервуар, надежно-ориентированный, RCM.

### *Modeling of distant monitoring of solid residual oil products in tanks*

*Kolykhalin V.M.*

*Leading Specialist, Scientific and Design Department, St. Petersburg Branch of JSC Atomenergoproekt - St. Petersburg Design Institute, St. Petersburg, Russia*

### **Abstract**

*The research and hardware implementation of the system of acoustic monitoring of the volume of residual petroleum products based on the wave model of the sound field in the storage tanks of oil terminals are presented. The results of computer and physical modeling of the sound transmission processes of acoustic oscillations in the excitation of acoustic vibrations of the air volume by a shock source with different dislocation for the diagnosis of the volume (mass) of solid residual oil products in cylindrical tanks are proposed. The method of standardization of acoustic oscillations intensity concerning the known air volume (empty tank) is*

a quite acceptable approach to the realization of express-registration of residue volume and has a sufficient accuracy for the preliminary estimation of economic losses of tanker loading with oil-products. The practical use of the acoustic registration method of solid residues volumes of oil products in the development of tasks of reliability-oriented maintenance of equipment with the use of RCM methodology, involving the analysis of the degree of criticality elements to ensure safety, productivity and economic efficiency of oil terminal operation is substantiated. The proposed non-contact methods of acoustic registration of volumes of solid and liquid oil products, bulk and mixed aggregate compositions, not excluding nuclear waste, can find application in means of air and water transport.

**Keywords:** intensity, oil residue, microphone, tank, reliability-oriented, RCM.

## Введение

Существующая практика контроля объема товарных нефтепродуктов (н/п), смеси с водой и другими реагентами в накопительных резервуарах нефтяных терминалов базируется, как правило, на дистанционном мониторинге посредством радиолокационных приборов (радаров), сканирующих уровень плоских поверхностей жидких н/п. Здесь, в целом для диагностики объема нефтепродуктов, используется комплексная информация с трех полевых приборов: многозонного термометра, датчика давления, датчика уровня - радара с непрерывной регистрацией и коррекцией показаний во времени для абсолютных измерений в стабильных условиях эксплуатации с безопасной клапанной герметизацией. Однако, для регистрации объемов твердого остатка (шлама) в накопительных резервуарах нефтяных терминалов и при значительных изменениях плотности, влажности, температуры такие системы не пригодны [1, 2].

Здесь сложность практической реализации мониторинга твердых остатков н/п обусловлена тем, что на точность измерений существенно влияют технологические особенности: повышение температуры нефтепродуктов от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $+70^{\circ}\text{C}$ , сопровождающееся испарением легких фракций и воды (пар); изменение температуры окружающей среды от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+30^{\circ}\text{C}$ ; соответствующие изменения плотности нефтепродукта при повышенных и пониженных температурах и т.д.

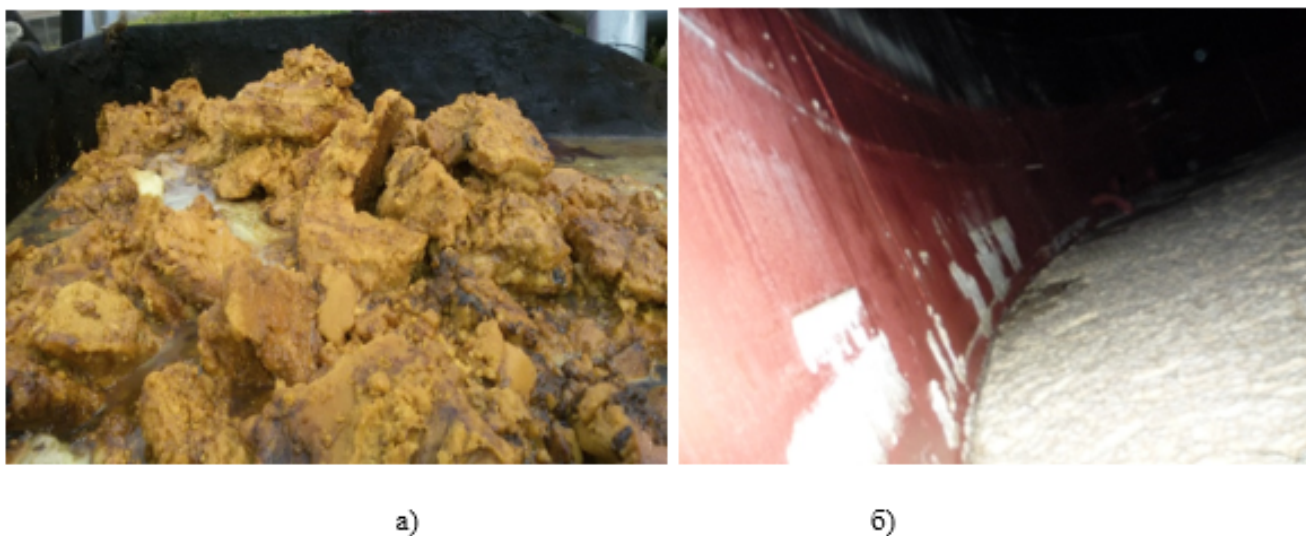


Рис. 1. Твердый остаток нефтепродуктов в накопительном резервуаре: а) компаунда масел смазочных (КМС), б) дизельного топлива в зимнее время

В то же время технические средства, особенно на основе относительных акустических измерений объема (массы) нефтепродуктов по «свободному» воздушному объему путем определения, например, уровня интенсивности с меньшей точностью, чем радарные (линейные), но с нивелированием влияния переменных внешних и внутренних технологических условий либо не разработаны вообще, либо находятся в стадии первоначальных исследований [3, 4].

### 1. Мониторинг объемов твердых остатков нефтепродуктов методом интенсивности

Целью настоящей работы является разработка и экспериментальная проверка способа технического контроля объемов твердых остатков нефтепродуктов в транспортных резервуарах на основе волнового подхода фундаментальной теории акустически. Так в области высоких частот, особенно для радиальных мод, наблюдается высокая плотность спектра, что означает слабую избирательность резервуара для высокочастотных составляющих первичного сигнала. В то же время на низких частотах преобладают аксиальные моды с достаточной энергией, но с незначительной плотностью спектра, что является основной особенностью резервуаров больших объемов и на низких частотах.

До настоящего времени оценка акустических условий в замкнутых пространствах различного назначения в основном базируется на аналитических расчетах и измерениях времени реверберации. Однако, в ряде случаев возникает необходимость определения частотной (спектральной) характеристики звукопередачи энергетической суммы прямого и отраженного звуков при возбуждении сигналов малой длительности (импульс  $\delta$ -функции Дирака) [5-7]. Основной сложностью получения такой зависимости с использованием преобразования Фурье (БПФ) является учет перехода от обычной периодической частоты электрических колебаний  $f_э$ , подводимых к электроакустическому преобразователю ( $f_э = 1/T$ , где:  $T$  – период колебаний), к пространственной частоте ( $f_a = c/l$ , где:  $c$  – скорость звука,  $l$  – линейный или другой пространственный размер замкнутого пространства).

Интенсивность звука, определяемая как среднее значение звуковой энергии, проходящей в единицу времени через единицу площади, может быть выражена формулой

$$I_r = \frac{1}{T} \int_0^T p(t)v(t)dt, \quad (1)$$

где  $I_r$  – интенсивность звука в направлении  $r$  в некоторой точке между приемниками,  $p(t)$  – мгновенное значение звукового давления в этой точке,  $v(t)$  – мгновенное значение скорости частиц в направлении  $r$ ,  $T$  – время измерения.

Колебательная скорость частиц по направлению  $r$ , определяемое линией, на которой расположены микрофоны, выражается формулой:

$$v_r(t) = \frac{1}{\rho} \int \frac{\partial p}{\partial r} dt \approx \frac{1}{\rho} \int \frac{p_2(t) - p_1(t)}{\Delta r} dt, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха,  $p_1(t)$  и  $p_2(t)$  – мгновенные значения, измеренные двумя микрофонами-приемниками звукового давления в двух точках, расстояние между которыми равно  $\Delta r$ .

Давление в этой средней точке между двумя точками измерения приближенно равно:

$$p(t) \cong \frac{p_1(t) + p_2(t)}{2} dt. \quad (3)$$



Интенсивность звука в направлении  $r$  в средней точке между двумя микрофонами можно найти путем интегрирования произведения  $p(t)$  и  $v(t)$ , исходя из уравнений (1), (2) и (3), с помощью анализатора интенсивности звука. Известно, что метрологические возможности метода акустической интенсиетрии при определении акустических характеристик объектов широко применяют при экспериментальных исследованиях [8-10].

## 2. Компьютерное моделирование акустического поля в резервуаре

Компьютерное моделирование применения метода интенсиетрии (программа «Comsol»), полученного для различных объемов остатков нефтепродуктов, представлено на рисунке 2: график  $L5$  соответствует остатку, примерно равному 3% от общего объема резервуара, далее  $L4 \dots L1$  соответствуют увеличению объема остатка с шагом примерно 3%. По оси абсцисс отложено время (с), по оси ординат – нормированный уровень интенсивности  $\Delta N$ .

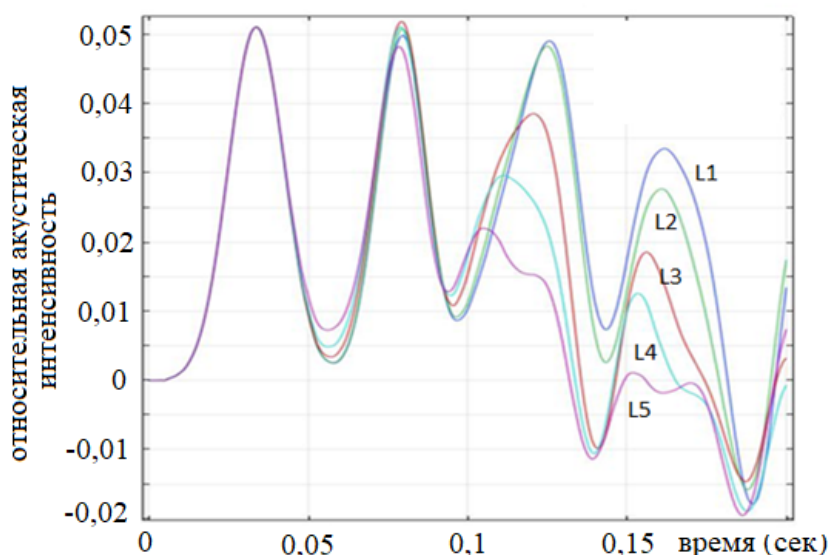


Рис. 2. График зависимости амплитуды нормированного уровня интенсивности от времени (с)

Соответствующие характерные отличия графиков  $L1 - L5$  в частотной области представлены на рисунке 3. По оси абсцисс отложена частота (Гц), по оси ординат – нормированный уровень интенсивности. Здесь в явном виде проявляется резонанс второй аксиальной моды на частоте  $f = 25$  Гц.

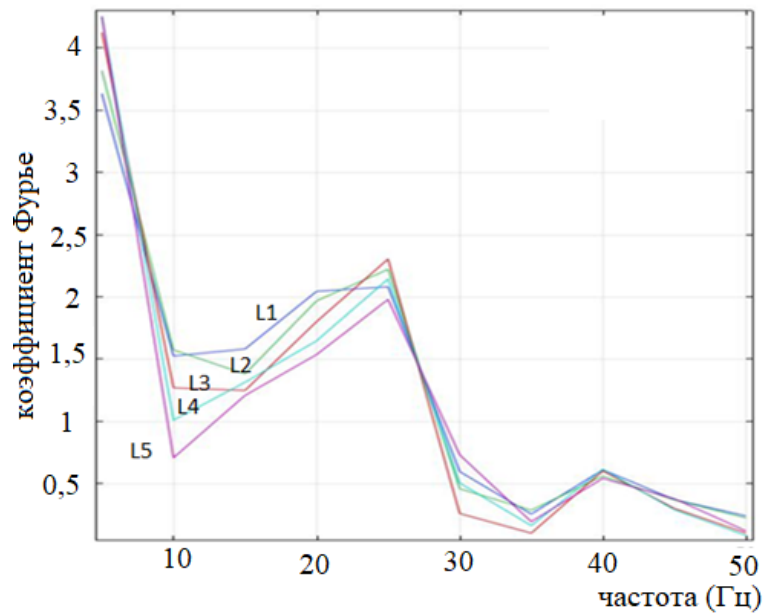


Рис. 3. График зависимости амплитуды нормированного уровня интенсивности от частоты (Гц)

Наличие автономного источника звуковых колебаний (удар) позволяет применить более точный объективный контроль объема, в том числе и дистанционный. Контролируется  $\Delta N$  – относительный (например, к «пустому» резервуару) уровень интенсивности при разных объемах  $V_i$  твердого остатка нефтепродуктов посредством анализатора интенсивности 2134 фирмы В&К (Дания).

Поскольку интенсивность звука содержит информацию как о величине, так и о направлении, она весьма эффективна при исследовании распределения потоков звуковой энергии – в нашем случае у поверхности импедансного днища резервуара. Особенность диаграммы направленности акустического зонда анализатора интенсивности (В&К), позволяет четко регистрировать изменения звукопоглощения днища вертикального цилиндрического резервуара по изменению амплитуды второй аксиальной моды колебаний воздушного объема резервуара в спектре интенсивности.

### 3. Физическое моделирование акустического поля в резервуаре

Для ослабления возможного воздействия внешнего (фонового) шума и помех измерительная установка размещалась в специальной полузаглушенной (с отражающим полом) комнате кафедры акустики СПбГУКиТ сравнительно небольших размеров:  $4 \times 3,5$  м в плане и без окна. Стенки и потолок обработаны достаточно эффективным звукопоглотителем из перфорированных плит АГШ с зазором 0,1 м, заполненным минеральной ватой так, что высота подвесного потолка составила 2,5 м. Данная акустическая обработка с имеющейся звукоизоляцией обеспечила время реверберации в диапазоне 125...4000 Гц около 0,4 с при проникающем интегральном уровне шума не более 30 дБ, начиная с полосы 31,5 Гц.

Измерительная установка состояла из модели резервуара в масштабе М 1:10, ударного устройства для возбуждения колебаний (громкоговорителя), анализатора спектра интенсивности 2134 фирмы В&К с фиксацией результатов в специальной программе компьютера (рис. 4а).

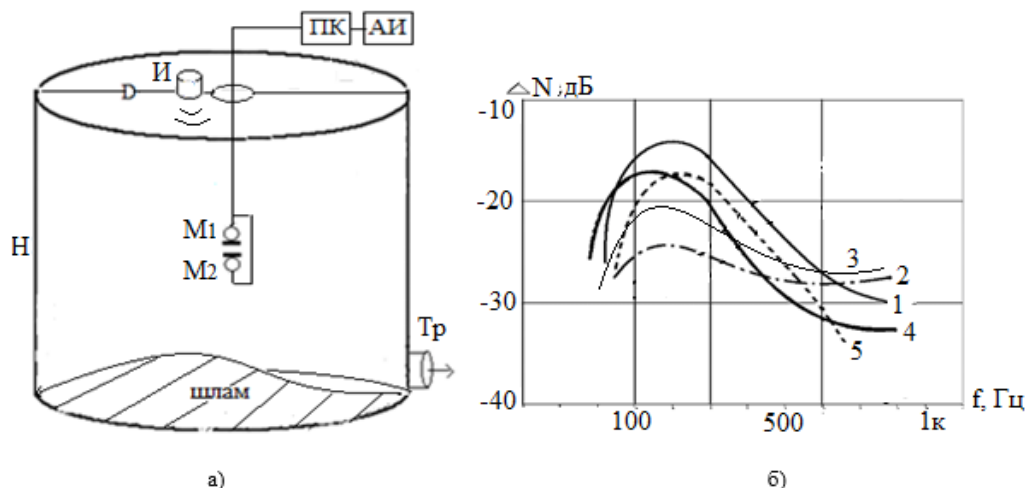


Рис. 4. а) Схема модели измерений объема остатка (шлама):  $M_1$  и  $M_2$  – микрофоны акустического зонда, ПК – компьютер, АИ – анализатора интенсивности, И – ударный источник колебаний,  $H = 1$  м – высота,  $D = 0,7$  м – диаметр;  $T_p$  – бункеровочный патрубок; б) усредненные огибающие спектров уровня интенсивности

Анализатор спектра интенсивности 2134 фирмы В&К (Дания) в реальном масштабе времени определял уровни интенсивности звука в третьоктавных полосах в диапазоне от 1,6 Гц до 20 кГц. Результаты измерений и анализа отображаются на экране ЭЛТ устройства индикации 4715 и выдаются на внешнюю цифровую аппаратуру (рис. 5). По оси ординат отложен относительный уровень интенсивности (дБ), по оси абсцисс отложена частота (Гц).

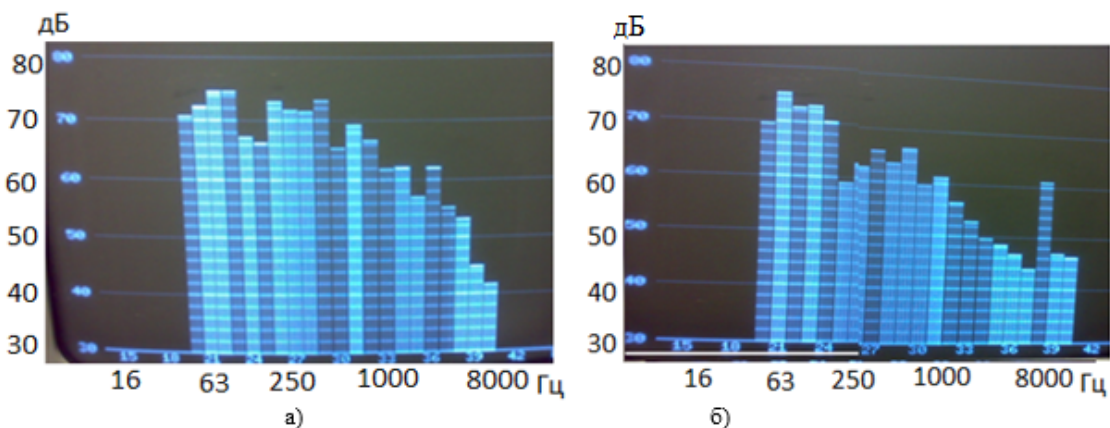


Рис. 5. Фото с устройства индикации 4715 В&К результатов измерений уровней интенсивности: (а) для «пустого» резервуара, (б) заполненного остатком нефтепродукта на 3 % общего объема модели

«Темные» полосы спектра – активная составляющая интенсивности – сигнализируют о том, что источник звуковых колебаний находится впереди зонда. «Светлые» полосы спектра – реактивная составляющая интенсивности – сигнализируют о том, что мультипликативная помеха находится сзади измерительного зонда. По результатам 5 измерений уровней интенсивности различных объемов остатка (с шагом 3% к увеличению от «пустого») были построены усредненные огибающие спектров уровней интенсивности (рис.4 б): позиция 1 соответствует пустому РВС, позиция 2 соответствует



заполнению PBC на 3%, позиция 3 соответствует заполнению PBC на 6% ... п. 5 соответствует заполнению на 12%.

#### 4. Регрессионно-корреляционный анализ модельных измерений

С целью демонстрации монотонности связи между параметрами диагностическим (уровень интенсивности) и состояния  $V_i$  (объем твердого остатка н/п) ниже приводится регрессионно-корреляционный анализ:

- исследуется зависимость результативной переменной (уровень интенсивности) и факторной переменной (объем твердого остатка н/п);
- предлагаются формула и график, по которым возможно прогнозировать значения  $V_i$  объемов твердого остатка н/п на основе известных измеренных уровней интенсивности.

Для пополнения статистики результатов модельных измерений, необходимой для выполнения регрессионно-корреляционного анализа, выбираются значения  $V_i$  и соответствующие им значения уровней интенсивности из спектра интенсивности (третьоктавного частотного диапазона с центральной частотой 250 Гц).

На начальном этапе проводилась первичная обработка данных и фильтрация «выбросов» (значения, которые существенно отличаются других в выборке). Визуально определенный по рисунку 4б один «выброс» был исключен из статистики для дальнейшего анализа — уровень интенсивности для пустого резервуара.

Таблица 1

Данные модельных измерений зависимости уровня интенсивности от объема твердого остатка н/п

Объемом твердого остатка н/п $V_i$ , м <sup>3</sup>	Уровни интенсивности звука по 2134 В&К, дБ
0,006	58
0,011	60
0,016	63
0,023	65
0,030	68
0,033	70
0,039	72
0,043	74

Линейная математическая модель регрессии представлена на рис.6.

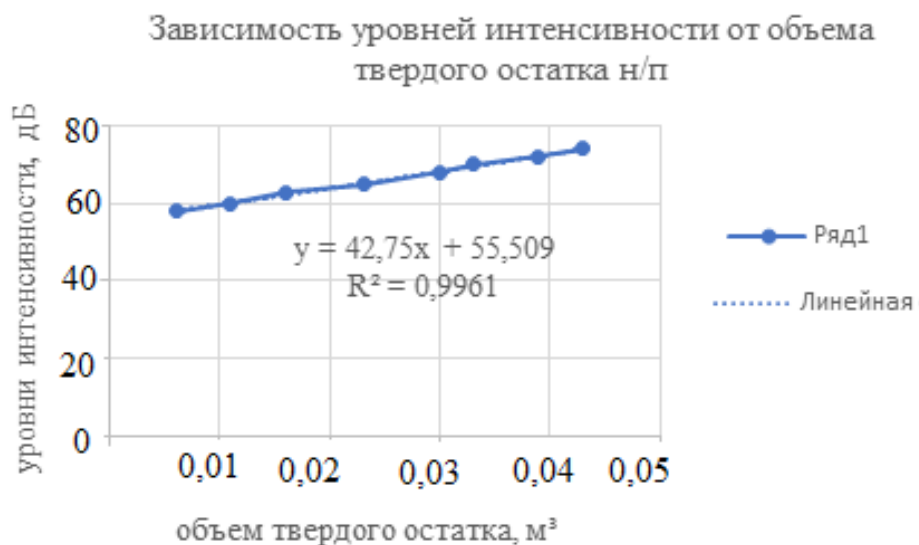


Рис. 6. Линейная математическая модель регрессии

Величина достоверности аппроксимации  $R^2$  у формулы на вышеприведенном рисунке наибольшая по сравнению с другими, выражающих экспоненциальную ( $R^2 = 0,9948$ ), логарифмическую ( $R^2 = 0,9335$ ), степенную ( $R^2 = 0,9483$ ) и др. зависимости. Регрессионная прямая достаточно точно описывает общую тенденцию изменения уровней интенсивности от объема твердого остатка н/п  $V_i$ .

### 5. Практическое применение метода акустической регистрации объемов твердых остатков нефтепродуктов

Техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) элементов оборудования производственного объекта является дорогостоящим и постоянно действующим видом деятельности, поэтому необходимо контролировать его объем и расходы, оптимизировать эффективность. В международной практике по оптимизации ТОиР концепция технического обслуживания (ТО) основана на предупредительном, прогнозном и корректирующем обслуживании [11, 12].

Надежно-ориентированное техническое обслуживание (RCM - Reliability Centered Maintenance) является одним из наиболее распространенных систематических методов, позволяющий анализировать безотказность не только отдельных элементов и систем, но обеспечивает переоценку технического обслуживания (оптимизацию) всех элементов оборудования с требуемым качеством и возможностью оценки влияния изменений на безопасность, функциональную эффективность и экономичность эксплуатации [13].

Внедрение методологии RCM в АО «Петербургский нефтяной терминал» (ПНТ) обусловлено необходимостью достижения следующих целей:

- повышение безотказности элементов;
- установление оптимального состава работ по ТОиР элементов;
- выявление неэффективных работ по ТОиР;
- обоснование периодичности ТО;
- определение оптимальных стратегий ТОиР;
- обоснование необходимых ресурсов ТОиР.

Подход по оптимизации ТОиР основан на процессе определения применимых стратегий технического обслуживания для систем и оборудования с целью предотвращения

потенциальных отказов или оптимального управления видами отказов.

Для каждого вида отказов элементов определяется наиболее подходящий способ управления безотказностью (стратегия ТО): применение ТОиР по техническому состоянию, плановый предупредительный ремонт, плановая замена, применение комбинации из перечисленных выше стратегий и применением только корректирующего ремонта (по факту отказа). Выбор в пользу конкретной стратегии проводится на основании соблюдения баланса между безопасностью и экономической эффективностью. При выборе конкретной стратегии ТОиР безопасность нефтяного терминала является наивысшим приоритетом.

RСM-анализ обосновывает целесообразность и выполнимость оптимизации работ по ТОиР, учитывая следующие целевые ориентиры:

- повышения безопасности ПНТ в результате повышения безотказности функционально-критических элементов за счет увеличения затрат на ТО;
- уменьшения затрат на ТО некритических элементов и элементов, работа которых не предполагает ТО и допустима до отказа.

Поэтому одной из основных задач RСM-анализа является определение перечня критических компонентов на основе инженерного анализа опыта эксплуатации аналогичного оборудования и личных компетенций экспертов RСM:

- *критические* компоненты, отказ которых может привести к невыполнению важной функции системы ПНТ и связан с неприемлемым повышением риска;
- *некритические* компоненты, отказ которых не приводит к значительным последствиям, но оптимизация ТОиР целесообразна по экономическим или другим причинам;
- *эксплуатируемые до отказа* – компоненты, для которого риски и последствия отказа приемлемы без какого-либо диагностического или периодического обслуживания, работают до тех пор, пока не потребуется ремонт.

При выполнении инженерного анализа классический научно-нагруженный FMECA (Failure Mode and Effects Critical Analysis) заменяется единым списком вопросов, направленных на рассмотрение связи между отказами оборудования и функциональным отказами ПНТ, проявляющимися на самых высоких уровнях.

В данной статье рассматривается способ внедрения на ПНТ одного из основных оптимизационных методов RСM-анализа: отказ от планового предупредительного ремонта (ППР) некритического элемента бункеровочной системы нефтепродуктов (н/п) – РВС (резервуар вертикальный стальной) и замена на более экономичное прогнозное ТО по техническому состоянию.

При анализе функциональных отказов системы определяется перечень отказов элементов, приводящих к невыполнению или деградации функции системы, вероятные причины отказов (механизм отказа), их критичность и последствия [14].

Функцией бункеровочной системы является обеспечение непрерывной погрузки-разгрузки н/т из резервуаров хранения на морские танкеры. В качестве одного из основных инструментов RСM-анализа применяется матрица риска отказа элементов. Входными данными для построения матрицы риска, являются: экспертная оценка значимости элементов; тяжесть последствий их отказов и частота отказов элементов предоставляются из опыта эксплуатации морских терминалов-аналогов. На основании данных матрицы риска определяется перечень некритических элементов бункеровочной системы ПНТ, для которых целесообразно рассмотреть возможность замены ППР элемента на обслуживание по техническому состоянию (рис. 7). По оси абсцисс отложен результат экспертного анализа тяжести последствий отказа по влиянию на безопасность, производительность и экономичность. По оси ординат отложены категории риска,

экспертно оцененные на основе данных о частоте отказа и тяжести последствий из опыта эксплуатации.



Рис. 7. Матрица риска отказа элементов бункеровочной системы ПНТ

Для примера приводятся упрощенный алгоритм и результат RCM-анализа некритического элемента бункеровочной системы – РВС. Одним из опасных отказов РВС, по опыту эксплуатации, может быть засорение бункеровочного патрубка РВС из-за отложения шлама на днище. Такой вид отказа РВС может привести к остановке грузовых операций, долговременным потерям производственных мощностей (например, недоступность причала ПНТ к погрузке), штрафные санкции за простой судна и нарушение логистики грузооборота и т. д. *События с значительными последствиями*: отказ вызывает инициирование системы пожаротушения; потерю герметичности цилиндрического корпуса резервуара, приводящей к разливу н/п; выброс нефтепродукта в окружающую среду через технологические отверстия в корпусе; экономические потери при длительной остановке грузовых операций, для которых ключевым является временной фактор. *События с незначительными последствиями*: экономические потери при кратковременной остановке грузовых операций

На основании статистической информации в таблице 2 приводятся вероятные причины опасного отказа – засорение бункеровочного патрубка РВС из-за отложения шлама на днище.

Таблица 2

Вероятные причины отказа - засорение бункеровочного патрубка РВС

Отказ	Засорение бункеровочного патрубка РВС, ДУ 600.
Прямая причина	Недостаточный разогрев н/п в ж/д цистерне при выгрузке в РВС; отсутствие дистанционного контроля объема твердого остатка.
Коренная причина	Высокая температура застывания н/п; наличие присадок в н/п, образующие осадок при транспортировке.
Факторы, влияющие на появление причин	1) материалы (застывание н/п в зимнее время при транспортировке в ж/д цистернах); 2) измерение (применяется только визуальный контроль); 3) среда (тяжелые погодные условия в зимнее время).
Действия, влияющие на факторы	Ошибки логистики.
Ключевые параметры процесса	Акустическим мониторинг достижение предельного значения интенсивности звуковых колебаний в РВС при возбуждении ударным источником.

На следующем этапе RCM-анализа обосновывается выполнимость и достаточность применение ТО РВС по техническому состоянию с применением данных мониторинга технического состояния элемента.

При внедрении ТО по техническому состоянию самая главная и сложная задача состоит в назначении и контроле наступления критериев предельного состояния (или критериев предотказного состояния). В существующей технологии ПНТ такую задачу возможно решить только средствами акустической диагностики. Методы диагностирования должны включать: диагностическую модель изделия; алгоритм диагностирования и программное обеспечение; правила измерения диагностических параметров; правила определения структурных параметров; правила анализа и обработки диагностической информации.

Проблема с безопасностью РВС (резервуар вертикальный стальной) возникает, когда один из критических параметров ухудшается со временем – увеличивается (объем твердого остатка н/п на днище) или уменьшается (свободный воздушный объем). РВС выводится из эксплуатации, когда уровень деградации параметра станет слишком большим для нормального функционирования.

Путем тщательной регистрации и моделирования зависимости деградации от времени можно с достаточной точностью определить наработку на отказ резервуара с целью своевременного вывода РВС в ремонт, минимизирую экономические потери.

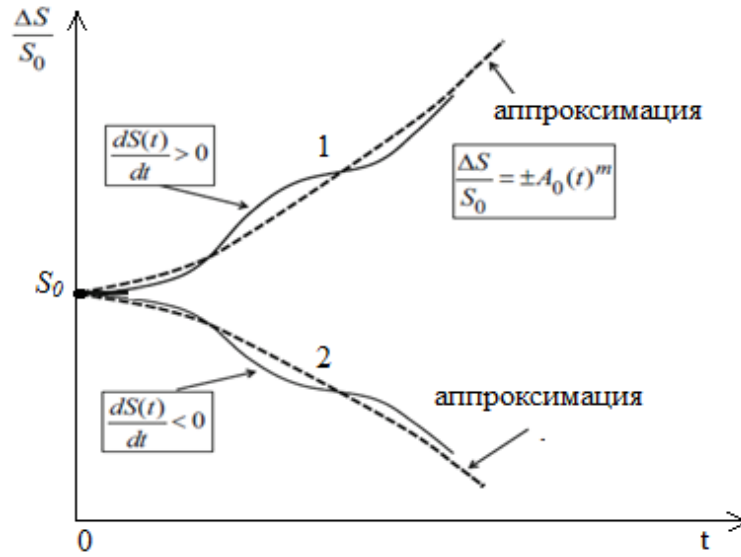


Рис. 8. Графики ухудшения критического параметра со временем: увеличение объема твердого остатка н/п 1 или уменьшение свободного воздушного объема резервуара 2

На рисунке 8 представлены графики ухудшения критического параметра со временем и их аппроксимирующие кривые: увеличение объема твердого остатка н/п (поз. 1) или уменьшение свободного воздушного объема резервуара (поз. 2). По оси абсцисс отложено время наблюдения за изменением критического параметра, по оси ординат отложено относительное текущее значение критического параметра.

Из опыта эксплуатации известно, что накопление твердого остатка происходит относительно медленно, тогда изменение критического параметра может быть представлено разложением Тейлора относительно  $t = 0$ , дающее ряд Маклорена:

$$S(t) = S_{t=0} + \left(\frac{\partial S}{\partial t}\right)_{t=0} t + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 S}{\partial t^2}\right)_{t=0} t^2 + \dots, \quad (4)$$

Предполагается, что члены высшего порядка в разложении (4) могут быть аппроксимированы введением некоторой функции, чтобы записать вышеприведенное разложение в сокращенном виде:

$$S(t) = S_0[1 \pm A_0 t^m], \quad (5)$$

где  $A_0$  — коэффициент, зависящий от физико-химических свойств н/п,  $m$  — регулируемый параметр.

При  $+A_0$  наблюдаемый параметр  $S$  монотонно увеличивается со временем, в то время как для  $-A_0$  он монотонно уменьшается с течением времени.

Рассмотрим критически параметр  $V_n$  — уменьшение свободного воздушного объема РВС в процессе накопления твердого остатка, которое может быть описано уравнением:

$$V_n = V_0(1 - A_0 t^m), \quad (6)$$

где  $V_0$  — воздушный объем РВС без остатка.

Перестановка членов в уравнении (6) и взятие логарифма обеих частей уравнения дает выражение:

$$\ln \left[ \frac{V_0 - V_n}{V_0} \right] = m \ln t + \ln A_0. \quad (7)$$



На основе данных опыта эксплуатации накопительного резервуара очистных сооружений АО «Петербургский нефтяной терминал» объемом 3000 м<sup>3</sup> для сбора розливов н/п после смыва с эстакад выгрузки железнодорожных цистерн, и расчетов по формуле (7), была составлена таблица 3. Статистические данные (первые два столбца таблицы) были оценены автором приближенно с помощью рулетки в процессе эксплуатации РВС.

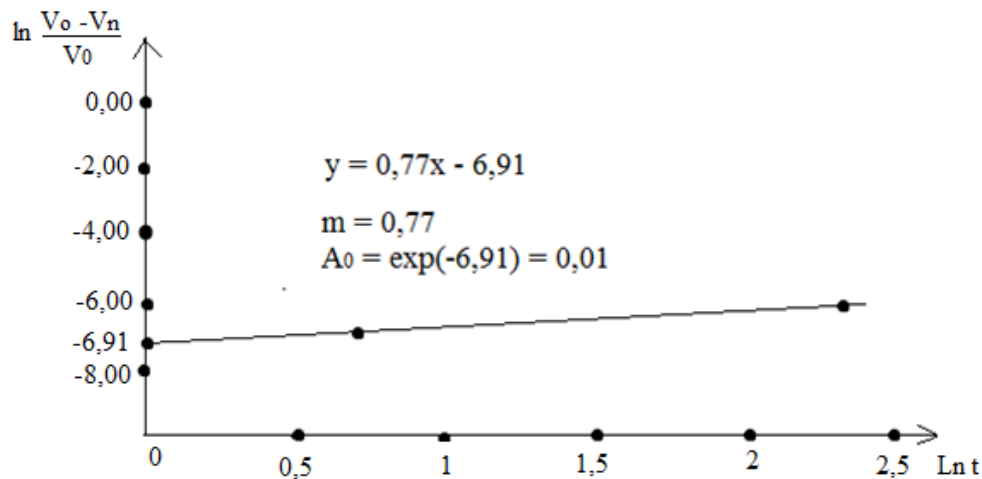
Таблица 3

Данные по уменьшению свободного воздушного объема РВС во времени

Время (месяц)	$V_n(\text{м}^3)$	$(V_0 - V_n)/V_0$	$\ln t$	$\ln[(V_0 - V_n)/V_0]$
0	3000			
1	2997	0,001	0	-6,91
2	2995	0,0017	0,693	-6,38
10	2992	0,0027	2,303	-5,92

Значение коэффициента  $A_0$  определяется из уравнения (7) при подстановке  $t = 1$ . Значение параметра  $m$  находится из уравнения (7) при подстановке  $t = 2$  и полученного  $A_0$ .

По данным таблицы 3 построен логарифмический график относительного уменьшения свободного воздушного объема РВС во времени (рис. 9), на котором представлено уравнение функции деградации (прямая в логарифмическом масштабе), параметр  $m$  и коэффициент  $A_0$ .

Рис. 9. График деградации критического параметра  $V_n$  резервуара

На основе расчетных данных получено уравнение, описывающее деградацию критического параметра  $V_n$  в зависимости от времени:

$$V_n = V_0(1 - A_0 t^m) = 3000(1 - 0,01 t^{0,77}) \quad (8)$$

Уравнение (8) позволяет получить приближенную оценку критического значения параметра  $V_n$  при подстановке прогнозируемого времени. Такие предварительные расчеты позволяют на самом раннем этапе мониторинга определить количественных значений параметров в точках 1 и 2 на рисунке 10, задающие предварительную продолжительность «окна вмешательства». По мере накопления статистических данных на отрезке «обнаружение изменения состояния» границы «окна вмешательства» актуализируются.



Рис. 10. Процесс деградации работоспособности РВС

По результатам физического моделирования акустического поля в резервуаре, рассмотренного выше, было построено «окно вмешательства» (рис. 10). По оси абсцисс отложено время наблюдения процесса деградации РВС по отказу: засорение бункеровочного патрубка РВС. По оси ординат отложены амплитудные значения относительного уровня интенсивности (дБ) в третьоктавной полосе с средней частотой 250 Гц (рис. 5), соответствующие различному объему твердого остатка н/п в РВС (на основе модельных измерений).

Принятие решения о ТОиР по факту деградации работоспособности РВС, с одной стороны, не должно быть преждевременным по экономическим причинам; с другой стороны — должно обеспечивать запас времени для планирования и выполнения мероприятий ТОиР — так называемое «окно вмешательства», при котором оборудование сохраняет свои функции, эффективность и безопасность ПНТ не снижаются.

При анализе процесса деградации РВС (см. рис. 10) возможно с достаточной точностью учитывать период развития отказа, постоянство интервала «окно вмешательства», возможность выполнить ТОиР при признаках ускоренной деградации работоспособности РВС.

## 6. Моделирование скорости деградации

Как было отмечено выше, критический параметр  $V_n$  уменьшается со временем, тогда уравнение (6) можно представить в следующем виде:

$$V^* = 1 - \frac{V_n}{V_0} = A_0 t^m. \quad (9)$$

Дифференцируя (9), получим скорость деградации  $R$ :

$$R = \frac{dV^*}{dt} = mA_0 t^{m-1}. \quad (10)$$

Для  $m = 1$  ожидается линейная зависимость деградации от времени. При  $m < 1$  наблюдается тенденция к насыщению деградации в течение длительного времени. Однако при  $m > 1$  деградация быстро возрастает со временем, что существенно затрудняет наблюдение за ее скоростью. Для  $m = 0,77$  из уравнения (8) скорость деградации РВС по критическому параметру  $V_n$ , как показано на рисунке 11, уменьшается со временем.

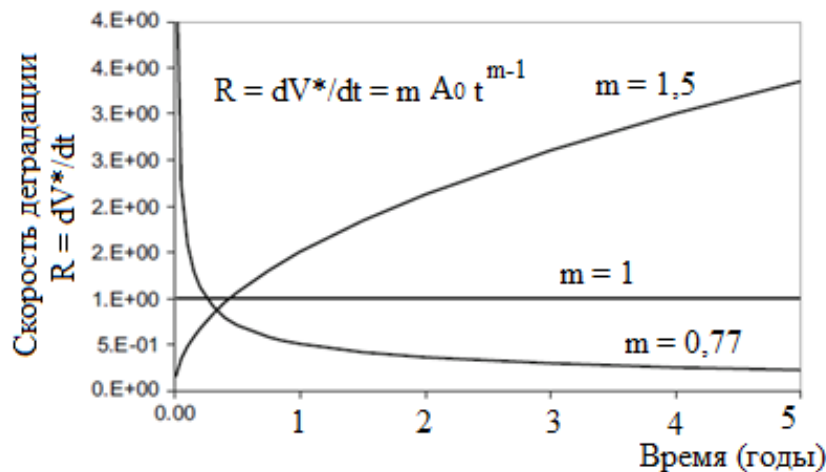


Рис. 11. Прогнозируемая скорость деградации  $V_n$ :  $m = 1$  соответствует постоянной скорости деградации,  $m > 1$  соответствует быстро возрастающей скорости деградации, при  $m < 1$  скорость деградации уменьшается

Время наработки на отказ ( $t_{от}$ ) устанавливается из опыта эксплуатации и актуализируется по мере накопления статистики (см.рис.10 п.3). Решая задачу о времени наработки на отказ, деградация  $V_n$  может быть описана с помощью уравнения (9) следующим образом:

$$t_{от} = \left[ \frac{1}{A_0} \left( \frac{V_0 - V_n}{V_0} \right) \right]^{1/m}. \quad (11)$$

Из уравнения (11) видно, что  $t_{от}$  уменьшается по мере увеличения критической величины  $V_n$ . Кроме того, время наработки на отказ увеличивается при уменьшении экспоненты  $m$ , и обращается в бесконечность при нулевом значении  $m$ , т.е. когда деградация во времени не происходит.

Из опыта эксплуатации известно, что критический слой твердого остатка на днище РВС составляет примерно 0,5...0,7 м по вертикали для  $V_0 = 3000 \text{ м}^3$ . Тогда начало перекрытия твердым остатком выходного бункеровочного патрубка РВС (см. рис. 4а) соответствует уменьшению  $V_n$  примерно на 4 %. Ожидаемое время наработки на отказ вычисляется из (11) следующим образом:

$$t_{от} = \left[ \frac{11}{0,01} \left( \frac{3000 - 0,96 \cdot 3000}{3000} \right) \right]^{1/0,77} = 4,2. \quad (12)$$

Таким образом, возможно предварительно оценить время наступления отказа РВС по причине засорения бункеровочного патрубка твердым остатком н/п через 4,2 года. Такой расчет крайне важен для позиционирования точки 3 на графике деградации РВС (см. рис. 10). По мере накопления статистических данных параметры функционального отказа и «окна вмешательства» актуализируются и по соответствующим значениям относительных уровней интенсивности звуковых колебаний с достаточной точностью возможен мониторинг твердых остатков в РВС.

Как было выше показано, параметр деградации  $A_0$  зависит от физико-химического состава твердого остатка, что приводит к различным значениям  $t_{от}$ . Однако, существуют и другие важные свойства  $A_0$  — зависимость от температуры н/п, накапливаемого в РВС. Тогда связь между  $t_{от}$  и параметром деградации  $V_0$  определяется следующим образом:

$$t_{от} = \left[ \frac{1}{A_0(\Phi, T)} \cdot \frac{V_0 - V_n}{V_0} \right]^{1/m}, \quad (13)$$

где  $A_0(\phi, T)$  – параметр деградации  $A_0$ , зависящий от физико-химических свойств ( $\phi$ ) и температуры  $T$  твердого остатка.

Из уравнения (13) видно, что кинетика  $t_{от}$  может не иметь простой обратной зависимости от деградации (физико-химической и температурной), содержащейся в параметре деградации  $A_0(\phi, T)$ . Действительно, только для частного случая  $m = 1$  (постоянная скорость деградации), время наработки на отказ будет иметь простую обратную зависимость с параметром деградации  $A_0(\phi, T)$ . Анализ  $t_{от}$  для других  $m$  с параметром  $A_0(\phi, T)$  является сложной задачей, требующей наличие достаточной представительной статистики.

Возможна также конкуренция механизмов деградации в процессе эксплуатации РВС – один приводит к увеличению критического параметра  $V_n$ , а другой приводит к уменьшению  $V_n$ . Такое состояние возможно описать уравнением:

$$V_n = V_0(1 + A_0 t^{m_1})(1 - B_0 t^{m_2}), \quad (14)$$

где  $A_0$  – параметр деградации, зависящий от физико-химических свойств и температуры  $T$  одного вида твердого остатка,  $B_0$  – параметр деградации, зависящий от физико-химических свойств и температуры  $T$  другого вида твердого остатка.

Первый член справа уравнения (14) имеет тенденцию к увеличению параметра  $V_n$ , а второй член справа стремится к уменьшению параметра  $V_n$ .

Механизмы конкурируют между собой и могут приводить поочередно либо к максимуму, либо к минимуму относительной деградации воздушного объема  $V_n/V_0$ . Например, в начале процесса  $V_n/V_0$  увеличивается за счет увеличения воздушного объема РВС (уменьшения объема твердого остатка), поскольку изначально доминирует механизм увеличения, а затем, на более поздних стадиях, доминирует  $V_n/V_0$  убывающего воздушный объема.

Приведенный метод актуально использовать для разделения процесса мониторинга твердого остатка, например, компаунда масел смазочных (КМС) (см. рис. 1а) на ранние и поздние стадии деградации для периода лето-зима. Если в летний период доминирует процесс разогрева твердого остатка и превращения части его в жидкую фазу за счет замеса с КМС высокой температуры летнего сезона, тогда в зимнее время доминирует процесс накопления твердого остатка, имеющего температуру ниже температуры застывания.

## Заключение

Таким образом, метод интенсиметрии с использованием двухмикрофонной техники измерения является вполне приемлемым для реализации экспресс-регистрации объема твердого остатка нефтепродуктов и их композиции в резервуарах и обладает достаточной точностью для прогнозирования отказа – засорение бункеровочного патрубка РВС, снижение риска экономических потерь при погрузке танкеров, в том числе повышение безопасности ПНТ – резервирование системы аварийного останова насосов при аварийном переливе РВС при его наполнении из ж/д цистерн. Предлагаемый бесконтактный метод акустической регистрации объемов твердых и жидких нефтепродуктов, сыпучих и смешанных агрегатных композиций, не исключая и ядерные отходы, могут найти применение в средствах воздушного и водного транспорта.

### Список литературы

1. Monteiro M., Svet Y, Sandilands D., Tsysar S. Experimental investigations of various methods of sludge measurements in storage oil tanks//Advances in Remote Sensing. 2015. № 4. P. 119-137.
2. Venkopora V. Method and apparatus for automatic sediment or sludge detection, monitoring, and inspection in oil storage and other facilities. US Patent № 8452046, 2013.
3. Колыхалин В.М., Давыдов В.В., Способ определения объема остатка твердого нефтепродукта в железнодорожном вагоне-цистерне. Патент на изобретение РФ №2348015, М.Федерал. служ. по интелект. собст., петен. и товар. знакам, RU 2348015 С1, Заявл.2007, опубл. 27.02.2009 Бюл. № 6.
4. Геча В.Я., Либерман М.Ю., Шматков А.В. Исследование метрологической эффективности акустической интенсиметрии при определении характеристик комплексных акустических полей, формирующихся в производственных помещениях при испытаниях электродвигателей. Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ, Т. 162, №1, 2018.
5. Свет В.Д., Цысарь С.А. Особенности акустического профилирования донных отложений в больших нефтяных резервуарах. Акуст. журн. 64, № 1, 2018. С. 112-118.
6. Цукерников И.Е., Невенчанная Т.О., Тихомиров Л.А., Щурова Н.Е. Измерения звукоизоляции строительных изделий с помощью интенсиметрии. Сборник Трудов XXXIV сессии Российского акустического общества. Сборник трудов сессии. Москва, 2022. С. 519-527.
7. Зайцева Б. Д., Бородина И. А., Теплыха А. А., Семёнова А. П. Определение скорости и затухания акустической волны в жидкостях с различным акустическим импедансом с помощью акустического интерферометра. Акуст. журн. Т. 69. № 4, 2023.С. 438–445.
8. Вировлянский А.Л., Казарова А.Ю. Распределение интенсивности звукового поля в глубоком море в фазовом пространстве глубина–угол–время. Акуст. журн. Т. 69. № 5, 2023. С. 515–527.
9. Сидоров Д.Д., Петников В.Г., Луньков А.А. Широкополосное звуковое поле в мелководном волноводе с неоднородным дном// Акуст. журн. Т. 69. № 5, 2023. С. 608–619.
10. Голубев А.Ю., Потокин Г.А. Особенности применения интенсиметрии для определения мощности акустического излучения панели в поле аэродинамических пульсаций давления. Измерительная техника. 2018; (12). С. 51-55.
11. IEC 60300-3-11:2009 Надежность в технике. Техническое обслуживание, ориентированное на надежность.
12. EUR-23232 EN Модель управления сроком службы предприятия, включающая оптимизированную программу MS&I - вопросы безопасности и экономики, декабрь 2007.
13. IAEA-TECDOC-1590 Применение технического обслуживания, ориентированного на надежность, для оптимизации эксплуатации и технического обслуживания атомных электростанций, МАГАТЭ, Вена, 2007 г.
14. INPO. AP-913 Описание процесса обеспечения надежности оборудования. Описание процесса, 2013.

### References

1. Monteiro M., Svet Y, Sandilands D., Tsysar S. Experimental investigations of various methods of sludge measurements in storage oil tanks//Advances in Remote Sensing. 2015. № 4. P. 119-137.

2. Venkoporao V. Method and apparatus for automatic sediment or sludge detection, monitoring, and inspection in oil storage and other facilities. US Patent № 8452046, 2013.
3. Kolykhalin V.M., Davydov V.V. Sposob opredeleniya obema ostatka tverdogo nefteprodukta v zhelezodorozhnom vagone-cisterne. Patent na izobretenie RF №2348015, M.Federal. sluzh. po intellekt. sobst., peten. i tovar. znakam, RU 2348015 S1, Zayavl.2007, opubl. 27.02.2009 Byul. № 6.
4. Gecha V.Ya., Liberman M.Yu., Shmatkov A.V. Investigation of metrological efficiency of acoustic intensimetry in determining the characteristics of complex acoustic fields formed in industrial premises during testing of electric motors. Problems of electromechanics. Proceedings of VNIEM, Vol. 162, No. 1, 2018.
5. Svet V.D., Tsygar S.A. Features of acoustic profiling of bottom sediments in large oil reservoirs. Acoustic Journal, 64, no. 1, 2018. C. 112-118.
6. Tsukernikov I.E., Nevenchannaya T.O., Tikhomirov L.A., Shchurova N.E. Measurements of sound insulation of building products using intensimetry. Proceedings of the XXXIV session of the Russian Acoustic Society. Proceedings of the session. Moscow, 2022. C. 519-527.
7. Zaitseva B. D., Borodina I. A., Teplykha A. A., Semyonova A. P. Determination of the velocity and attenuation of the acoustic wave in liquids with different acoustic impedance using an acoustic interferometer // Acoust. journal. 2023. T. 69. № 4. C. 438-445.
8. Virovlyansky A.L., Kazarova A.Yu. Sound field intensity distribution in the deep sea in the depth-angle-time phase space // Acoust. journal. 2023. T. 69. № 5. C. 515-527.
9. Sidorov D.D., Petnikov V.G., Lunkov A.A. Broadband sound field in a shallow-water waveguide with an inhomogeneous bottom// Acoust. journal. 2023. T. 69. № 5. C. 608-619.
10. Golubev A.Yu., Potokin G.A. Peculiarities of application of intensimetry for determination of panel acoustic radiation power in the role of aerodynamic pressure pulsations. Measuring technology. 2018; (12): 51-55.
11. IEC 60300-3-11:2009 Dependability in technics. Reliability centered maintenance.
12. EUR-23232 EN A plant life management model including optimized MS&I program – Safety and economic issues, December, 2007.
13. IAEA-TECDOC-1590 Application of Reliability Centred Maintenance to Optimize Operation and Maintenance in Nuclear Power Plants, IAEA, Vienna, 2007.
14. INPO. AP-913 Equipment Reliability Process Description. Process Description, 2013.



УДК: 697.322  
OECD: 02.01.FA

## Расчет звукоизолирующего перекрытия в помещении крышной котельной жилого дома в городе Салехарде

Жилина Т.С.<sup>1\*</sup>, Плотников А.С.<sup>2</sup>, Ощенко Д.Ю.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> кандидат технических наук, доцент

<sup>2</sup> старший преподаватель

<sup>3</sup> обучающийся 3 курса

<sup>1,2,3</sup> кафедра инженерных систем и сооружений, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, РФ

### Аннотация

В данной статье авторами рассмотрен способ снижения уровня шума от инженерного оборудования крышной котельной. Место расположения котельной – жилой шестиэтажный дом в городе Салехарде. Обозначена проблема обеспечения требуемой звукоизоляции помещения котельной и выявлены основные характеристики, влияющие на данную величину. Рассмотрено негативное влияние шума на здоровье человека. Определены параметры микроклимата жилых помещений. Выполнены чертежи разреза помещения котельной и план расположения котельного оборудования. Обозначено инженерное оборудование крышной котельной, являющееся источником повышенного шума. Проведен расчет звукоизоляции конструкций. Определен индекс изоляции воздушного шума. Предложена конструкция перекрытия с расчетным обоснованием. Графически показано распределение расчетной частотной характеристики. Сформирован вывод о значимости защиты от шума жилых помещений в зданиях с крышными котельными.

**Ключевые слова:** звукоизоляция, крышная котельная, воздушный шум, индекс изоляции, частотная характеристика.

## *Calculation of soundproofing floors in the roof boiler room of a residential building in the city of Salekhard*

*Zhilina T.S.<sup>1\*</sup>, Plotnikov A.S.<sup>2</sup>, Oshchenko D.Yu.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*

<sup>2</sup> *Senior Lecturer*

<sup>3</sup> *3rd year student*

<sup>1,2,3</sup> *Department of Engineering Systems and Structures, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia*

### **Abstract**

*In this article, the authors consider a method for reducing the noise level from the engineering equipment of a rooftop boiler house. The location of the boiler house is a six-storey residential building in the city of Salekhard. The problem of providing the required sound insulation of the boiler room is indicated and the main characteristics influencing this value are revealed. The negative impact of noise on human health is considered. The parameters of the microclimate of residential premises have been determined. Drawings of the section of the boiler room and a plan of the location of the boiler equipment have been made. The engineering equipment of the rooftop boiler house, which is a source of increased noise, is indicated. The calculation of*

*sound insulation of structures was carried out. The airborne noise insulation index has been determined. A slab design with a design justification is proposed. The distribution of the design frequency response is graphically shown. A conclusion is made about the importance of noise protection of residential premises in buildings with rooftop boiler houses.*

**Keywords:** *sound insulation, rooftop boiler house, air noise, insulation index, frequency response.*

## Введение

Акустике жилых зданий до последнего времени не уделялось должного внимания. Контроль над соблюдением нормативных характеристик по акустике жилья практически отсутствовал. Делалось это сознательно, в целях экономии (иногда до 30% от стоимости строительного объекта). Существенным шагом, заставившим специалистов обращать внимание на вопросы, связанные с шумом от внутреннего инженерного оборудования, в том числе и на крышных котельных жилых зданий можно считать введение поправок в СП 51.13330.2011 «Защита от шума» [1].

Воздействие шума на человека определяется его уровнем и характеристиками, а также его спектром и временем воздействия. Немаловажным фактором является состояния здоровья человека и приспособляемость его организма, его индивидуальные особенности. Шум влияет на инициативу, мотивацию и настрой человека. Его воздействие повышает рабочую нагрузку из-за необходимости дополнительно концентрироваться, ввиду особенностей кратковременной памяти, и борьбы с сопутствующими раздражителями. При длительном действии шум вызывает изменения органа слуха и ухудшает нервную систему [2,3].

Сильный шум оказывает отрицательное влияние на организм человека, понижает его работоспособность, производительность труда, увеличивает вероятность неврозов и нервных заболеваний, ухудшает зрение, повышает предрасположенность к инфарктным заболеваниям, вызывает головные боли, усталость, является причиной снижения внимания и психологического сосредоточения на работе и увеличения времени реакции.

Шум переменной интенсивности (40-70 дБ) является более вредным, чем шум, который имеет постоянную интенсивность (80 дБ). Неожиданно возникающие шумы представляют большую опасность, так как они способны оказывать влияние на эффективность труда человека. Так, например, способность быстро и точно выполнять координированные движения снижает ритмически колеблющийся шум. Шум снижает остроту зрения, быстроту восприятия цвета, приводит к трудностям в оценке расстояния и места, нарушает восприятие визуальной информации. Производительность труда уменьшается на 5-12%. За счет снижения уровня шума на 20% можно достичь повышения производительности труда на 5-10%. Длительное воздействие шума интенсивностью около 90 дБ снижает производительность труда на 30-60%.

Шум влияет на качество сна, заболевания вегетативной системы, при уровне 60-80 дБ, а также человек становится раздражительным, нервным, тревожным, снижаются показатели зрения, происходит быстрое утомление. Еще длительное воздействие шума провоцирует гипертоническую болезнь, бессонницу, неправильный обмен веществ и снижается порог чувствительности нервных клеток.

Согласно СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» [2] (с изменениями на 30 декабря 2022 года), таблицы 5.35 эквивалентные уровни звука не должны превышать 40 дБ в дневное время и, соответственно, 30 дБ в ночное.

## 1. Объект исследования

Для создания комфортных и безопасных условий проживания людей в домах на крышах устанавливаются котельные, способные дать необходимое количество тепла. Однако, вместе с этим котельные создают шум, который влияет на здоровье и самочувствие людей [4,5].

Объектом исследования является жилой многоквартирный 6-этажный дом.

Дом, на кровле которого располагается крышная котельная, находится в городе Салехарде, в восточном Микрорайоне.

Характеристика объекта исследования принята согласно СП 118.13330.2012\* «Общественные здания и сооружения» [6]:

- 1.1. Класс ответственности здания – II (нормальный).
- 1.2. Огнестойкость здания – II.
- 1.3. Класс конструктивной пожарной опасности – С0
- 1.4. Класс функциональной пожарной опасности: – Ф 1.3
- 1.5. Характеристика условий строительства: – I климатический район (II подрайон)

Фасад исследуемого здания изображен на рисунке 1.

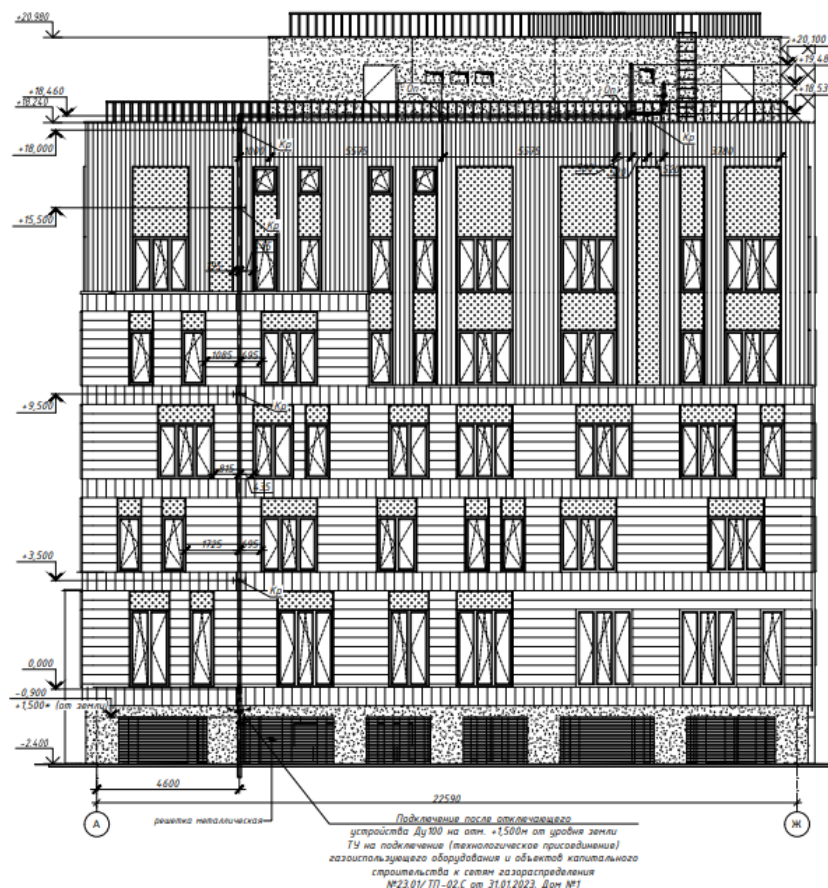


Рис. 1. Фасад здания

Климатические параметры района расположения здания принимаются согласно СП 131.13330.2020 «Строительная климатология» [7]:

Высота здания от уровня земли до низа проема верхнего этажа менее 50 м. Общая площадь квартир на этаже не превышает 500 м<sup>2</sup>. Выход на кровлю жилого дома предусмотрен из лестничной клетки Л1.

Согласно п. 8.3 СП 54.13330.2011, лестничные марши и площадки оборудованы металлическими непрерывными ограждениями с поручнями высотой 1,2 м. Ограждение кровли принято высотой более 1,2 м. Остекленные двери лестничных клеток и тамбуров выполнены с применением армированного стекла.

Над жилыми этажами расположен технический этаж, разделенный герметичными перегородками на 2 отсека, каждый из которых оборудован общей вентиляционной шахтой. Теплоснабжение и горячее водоснабжение обеспечивается крышной котельной.

Крышная котельная представляет собой сооружение, расположенное на кровле здания; стены – кирпичная кладка, покрытие – монолитная железобетонная плита, в качестве легкобрасываемых конструкций используются оконные блоки, площадь проемов превышает  $0.03 \text{ м}^2$  на  $1 \text{ м}^3$  помещения крышной котельной.

Основной акустической задачей архитектурно-строительных мероприятий по защите помещений от шума является соблюдение нормативных требований по звукоизоляции помещений, нейтрализация основных источников шума от внутреннего инженерного оборудования технических помещений.

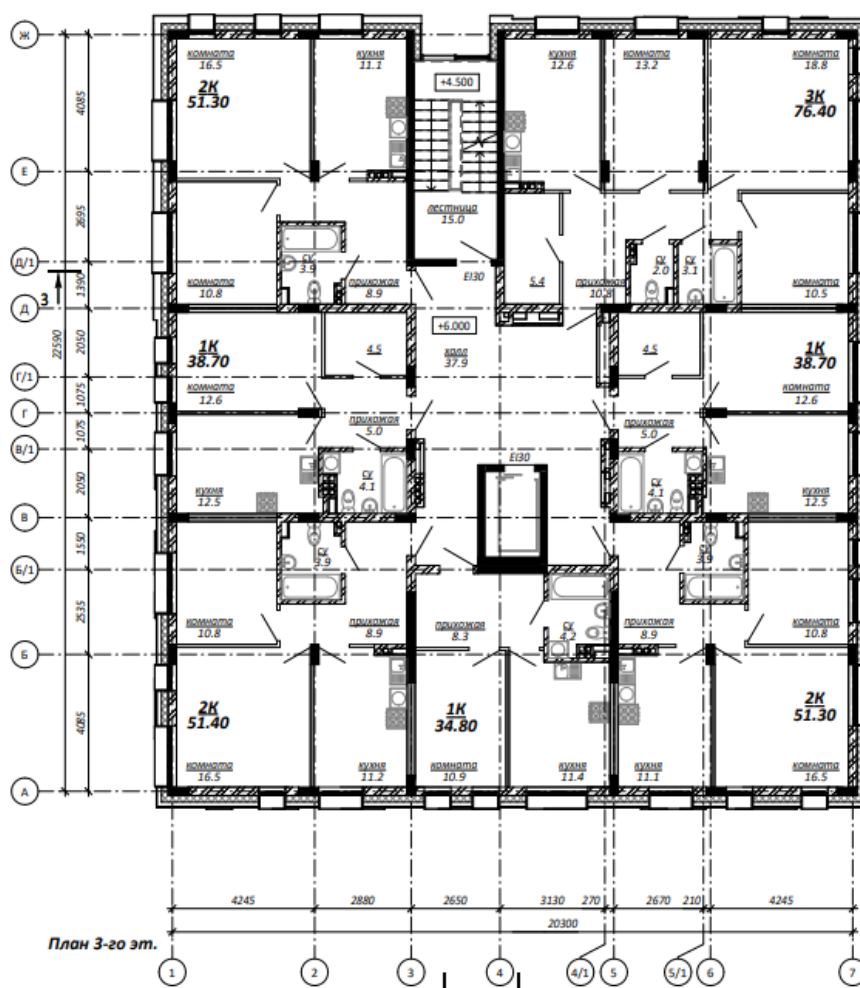


Рис. 2. План типового этажа

Определяем параметры микроклимата жилых помещений:

Параметры внутреннего воздуха выбираются по ГОСТ 30494–2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» [8].

Принимаем оптимальную температуру для расчетов по помещению жилой

комнаты, т.к. в ней человек будет проводить большее количество времени. Она принимается равной 22°C.

Котельная располагается на кровле здания.

В котельной установлены 4 котла Thermex Coloss SW 115, обеспечивающих дом горячей водой и отоплением по схеме: 2 котла в эксплуатации + 2 котла в резерве. Характеристики котла приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики котла Thermex Coloss SW 115

Тип котла	Энергозависимый
Режим работы	Отопление
Камера сгорания	Закрытая
Горелка	Модулируемая
Мах мощность	115
Min мощность	19
Мах давление отопит контура	6
Min давление отопит контура	0,8
Расширительный бак	Да
Циркуляционный насос	Да
Возможность подключения бойлера ГВС	Да
Тип теплообменника	Пластинчатый
Мах расход природного газа, м <sup>3</sup> /ч	11,2
Min расход природного газа, м <sup>3</sup> /ч	2,1
Габариты (ВхШхГ)	840х480х650 мм

Котел производится в России компанией Термекс в городе Тосно.

Список оборудования котельной:

- 4 котла Газтехпром Titan Z;
- 4 насоса для МСА 90/115 G=3,6 м<sup>3</sup>/ч, H = 2,0 м эл. дв. мощностью 0,1 кВт, Grundfos;
- 4 насоса котловой G=4,1 м<sup>3</sup>/ч, H = 3,0 м эл. дв. мощностью 0,1 кВт, Grundfos;
- 2 насоса сетевой G=8,4 м<sup>3</sup>/ч, H = 8,0 м эл. дв. мощностью 0,403 кВт, Grundfos;
- 2 насоса рециркуляции ГВС G=1,7 м<sup>3</sup>/ч, H = 5,7 м эл. дв. мощностью 0,2 кВт, Grundfos;
- 2 насоса на ГВС G=5,6 м<sup>3</sup>/ч, H = 5,4 м эл. дв. мощностью 0,25 кВт, Grundfos;
- 2 насоса сетевой G=8,4 м<sup>3</sup>/ч, H = 8,0 м эл. дв. мощностью 0,403 кВт, Grundfos;
- теплообменник пластинчатый, для приготовления горячей воды, Ридан;
- буферный бак для ГВС;
- бак запаса холодной воды;
- установка химической подготовки;
- мембранные баки;
- гидрострелки;
- система вывода дымовых газов;
- система нейтрализации конденсата;
- насос рециркуляции бака.

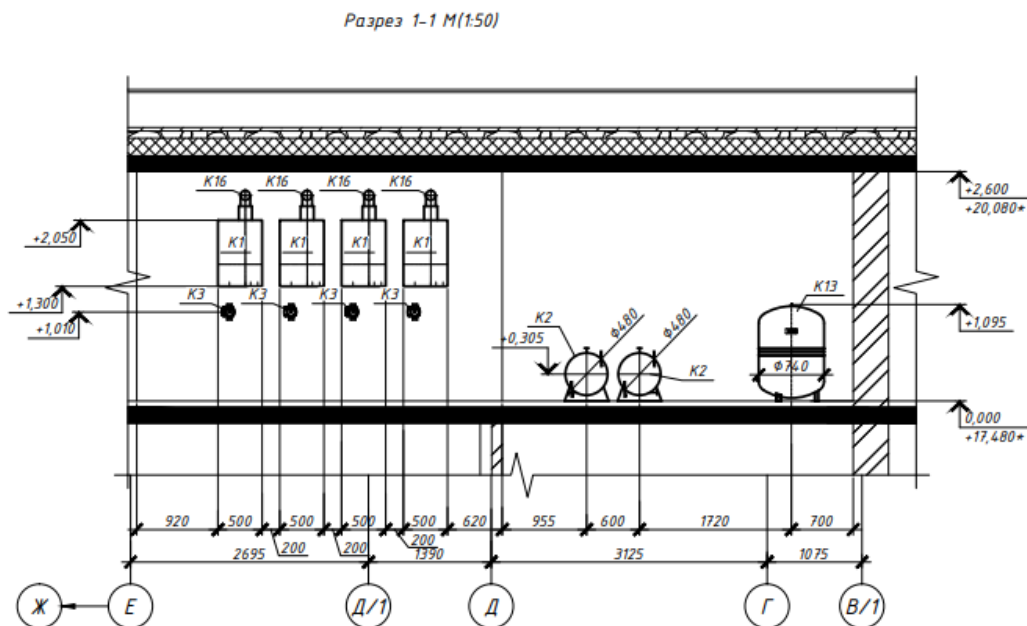


Рис. 3. Разрез помещения котельной

Проектируемая теплогенераторная предназначена для работы без постоянного пребывания обслуживающего персонала [9].

Также были учтены мероприятия по обеспечению безопасности теплогенераторной:

- тепловая изоляция оборудования;
- вращающиеся детали оборудования ограждены защитными кожухами;
- предусмотрено, кроме основного освещения, аварийное (освещение безопасности)

и ремонтное;

- выполнено заземление стальных коммуникаций;
- запроектирован контроль загазованности в помещении теплогенераторной.

План котельной представлен на рисунке 4.



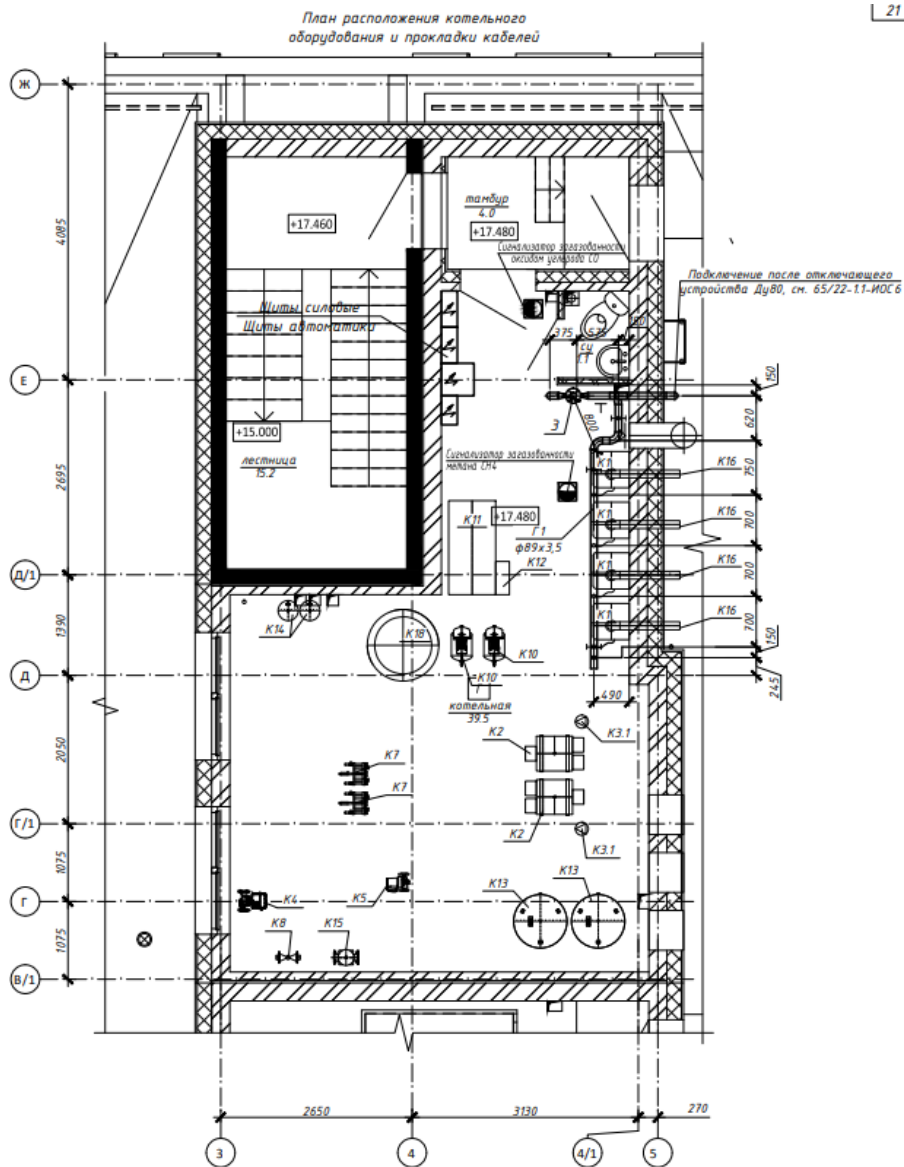


Рис. 4. План расположения котельного оборудования

## 2. Расчетная часть

Согласно СП 51.13330.2011 «Защита от шума» [10] п.4 защита в помещениях жилых и общественных зданий должна обеспечиваться:

- рациональным архитектурно-планировочным решением здания [11];
- применением ограждающих конструкций, обеспечивающих нормальную звукоизоляцию [12];
- использование звукопоглощающих облицовок [13];
- применение глушителей шума в системах принудительной вентиляции и кондиционирования воздуха;
- виброизоляцией инженерного и санитарно-технического оборудования [14,15].

Для того, чтобы обеспечить звукоизоляцию помещения котельной воспользуемся защитой с помощью применения ограждающих конструкций, обеспечивающих нормальную звукоизоляцию.

Уровень производимого шума 1 котлом равняется 61 дБ, в режиме максимальной нагрузки.

В котельной расположены 2 работающих котла, соответственно, шум который они производят будет больше.

Для того, чтобы рассчитать суммарный издаваемый шум воспользуемся формулой сложения шума двух работающих источников.

В нашем случае, так как издаваемый шум одинаковый у 2 источников, то рассчитываем следующим образом:

$$L_{\Sigma} = L_i + 10 \lg n$$

где  $L_{\Sigma}$  – суммарный уровень звука;  $L_i$  – уровень звука 1 источника;  $n$  – количество источников.

$$L_{\Sigma} = 61 + 10 \lg 2 = 64 \text{ дБ}$$

Далее необходимо определить требуемую изоляцию воздушного шума согласно СП 23-103-2003 «Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий» [10] и СП 51.13330.2011 Защита от шума [1].

$$R_{\text{тр}} = L_{\text{ш}} - 10 \lg B_{\text{и}} + 10 \lg S - 10 \lg k - L_{\text{доп}}$$

где  $L_{\text{ш}}$  – октавный уровень звукового давления в помещении с источником шума на расстоянии 2 м от разделяющего помещения ограждения, дБ;

$B_{\text{и}}$  – акустическая постоянная изолируемого помещения, м

$S$  – площадь разделяющего ограждения, м<sup>2</sup>

$L_{\text{доп}}$  – допустимый октавный уровень звукового давления, дБ;

$k$  – коэффициент, учитывающий нарушение диффузности звукового поля.

$L_{\text{доп}}=30$  дБ, определяется согласно СП 23-103-2003, таблицы 1.

Также может определяться по СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» [2] (с изменениями на 30 декабря 2022 года), таблицы 5.35.

Таблица 2

Допустимые нормы звукового давления и зафиксированные в здании (фрагмент)

Назначение помещения или территорий	Время суток, ч	Уровень звукового давления (эквивалентный уровень звукового давления) L, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровень звука $L_A$ (эквивалентный уровень $L_{Aэкв}$ дБА	Максимальный уровень звука $L_{Aмакс}$ дБА
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
Нормативные значения												
8 Жилые комнаты квартир												
- в домах категории А	7.00-23.00	76	59	48	40	34	30	27	25	23	35	50
	23.00-7.00	69	51	39	31	24	20	17	14	13	25	40
- в домах категорий Б и В	7.00-23.00	79	63	52	45	39	35	32	30	28	40	55
	23.00-7.00	72	55	44	35	29	25	22	20	18	30	45
Зафиксированные значения в здании												
Тех.этаж		71	64	55,6	45,1	36,4	32,3	33,7	31,4	27,1	44	47
Жилые комнаты квартир		67	49	39	30	23	20	17	14	13	25	40

$$R_{тр} = 64 - 10lg6,96 + 10lg58 - 10lg1,25 - 30$$

$$R_{тр} = 42,24 \text{ дБ.}$$

Конструкция перекрытия между котельной и квартирами, расположенными ниже будет иметь следующую конструкцию:

Ж/б плита, плотностью  $1800 \text{ кг/м}^3$ , толщина  $0,22 \text{ м}$ .

Звукоизоляционный материал – минераловатные каменные плиты Rockwool флор баттс с толщиной  $20 \text{ мм}$ .

Для того, чтобы определить индекс изоляции воздушного шума, необходимо построить график см. рис. 5.

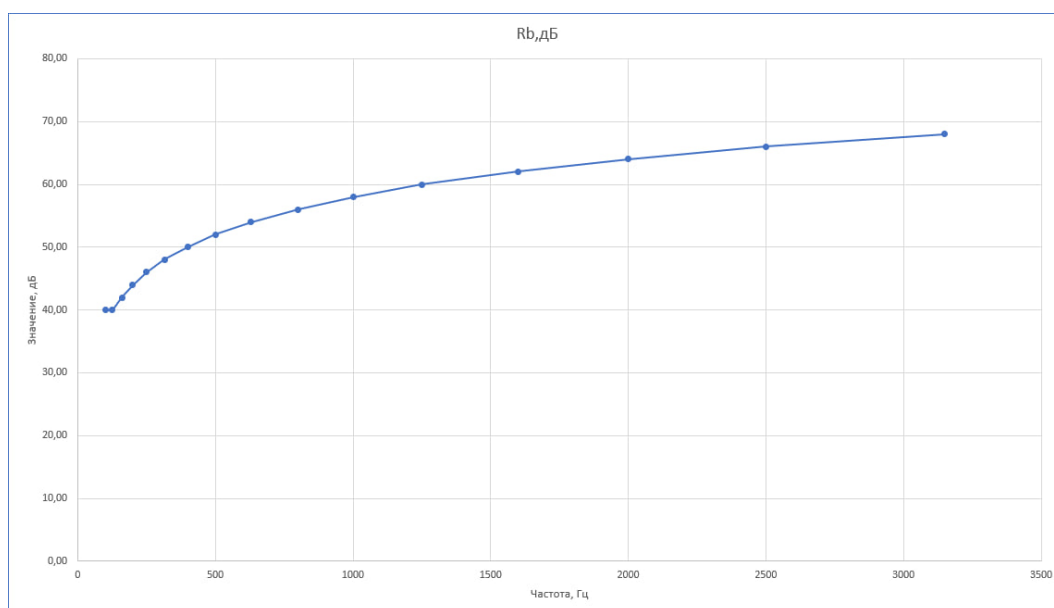


Рис. 5. График расчетной частотной характеристики

Абсцисса точки —  $f_B$  определяется согласно таблицы 8 СП 23-103-2003 «Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий» [10] и зависит от плотности используемого материала.

В предложенном конструктивном решении плотность бетона составляет  $1800 \text{ кг/м}^3$ , значит, по таблице 8 принимаем:

$$f_B = \frac{29000}{h} = \frac{29000}{240} = 121 \text{ Гц}$$

где  $h$  — толщина ограждения в мм.

В соответствии с таблицей 9 СП 23-103-2003 округляем до указанного значения и получаем  $f_B = 125 \text{ Гц}$

Ордината точки  $R_B$  определяется в зависимости от эквивалентной поверхностной плотности  $m_э$  по формуле

$$R_B = 20 \lg m_э - 12$$

$$m_э = k \times \sum m_i \text{ кг/м}^2$$

где  $m$  — поверхностная плотность слоя,  $\text{кг/м}^2$ ;

$k$  — коэффициент, учитывающий относительное увеличение изгибной жесткости ограждения.

$$m_э = 1,2 \times (396 + 2,2) \text{ кг/м}^2$$

$$m_э = 398,2 \text{ кг/м}^2$$

$$R_B = 20 \lg 398,2 - 12$$

$$R_B = 40 \text{ дБ}$$

Таблица 3

Точки графика расчетной частотной характеристики

$f_b$ , Гц	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
$R_b$ , дБ	40	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68

Индекс изоляции воздушного шума ограждающей конструкцией с известной частотной характеристикой изоляции воздушного шума определяется путем сопоставления этой частотной характеристики с оценочной кривой.

Таблица 4

Определение индекса изоляции воздушного шума  $R_w$ 

№ п.п.	Параметры	Среднегеометрическая частота 1/3-октавной полосы, Гц															
		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
1	Расчетная характеристика $R$ , дБ	40	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68
2	Оценочная кривая, дБ	33	36	39	42	45	48	51	52	53	54	55	56	56	56	56	56
3	Неблагоприятные отклонения, дБ	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	Оценочная кривая, смещенная вверх на 4дБ	37	40	43	46	49	52	55	56	57	58	59	60	60	60	60	60
5	Неблагоприятные отклонения от смещенной оценочной кривой, дБ	-	-	1	2	3	4	5	4	3	2	1	-	-	-	-	-
6	Индекс изоляции воздушного шума $R$ , дБ								56								

Получаем индекс изоляции воздушного шума  $R_w=56$  дБ, сумма неблагоприятных отклонений равна 25.

$$R_w \geq R_{тр}$$

$$56 \text{ дБ} \geq 42,24 \text{ дБ}$$

Расчетное значение оказалось больше требуемого, а сумма неблагоприятных отклонений близка к 32, значит предложенная конструкция защитит соседнее с котельной помещение от неблагоприятного воздействия шума.

### Заключение

Ввиду развития техники в существующие стандарты вносятся поправки, с одной стороны, ужесточающие требования, с другой – повышающие уровень комфорта жизнедеятельности человека.

Именно поэтому защите от шума уделяется значительное внимание. При этом положительной тенденцией является и существенная детализация требований и рекомендаций по защите от шума систем теплогасоснабжения и вентиляции, которая была отмечена как в профильном СП 51.13330.2011, так и в ряде документов НОСТРОЙ.

Рассчитанная в данной работе конструкция перекрытия между крышной котельной и квартирами, расположенными ниже: железобетонная плита, плотностью 1800 кг/м<sup>3</sup>, толщиной 0,22 м. и звукоизоляционный материал – минераловатные каменные плиты Rockwool флор баттс с толщиной 20 мм. полностью защитит жителей многоквартирного дома от нежелательного шума.

### Список литературы

1. Защита от шума : СП 51.13330.2011 : утв. Министерством регионального развития Российской Федерации 28.12.2010 : введ. в действие с 20.05.2011 – Москва : Минрегион России, 2011. – 47 с. – Текст : непосредственный.
2. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: СанПиН 1.2.3685-21 : утв. главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 28.01.2021 – Москва : Минюст России, 2021. – 949 с. – Текст : непосредственный.
3. Иванов Н.И., Шашурин А.Е. Учебное пособие "Защита от шума и вибрации", издание второе - дополненное и переработанное / СПб.: Печатный Цех, 2019. - 284с.
4. Плотников А.С., Жилина Т.С., Афонин К.В., Сайфуллин А.А. Исследование структурного шума при применении нескольких контуров плавающего пола в крышных котельных // Noise Theory and Practice, 2021, №7 (2) – С. 93-102.
5. Гуреев К. А., Трясцин Д. В. Исследования акустических свойств материалов для дополнительной звукоизоляции в многоквартирных жилых домах в условиях применения различных строительных конструкций // Noise Theory and Practice, 2022, №8 (4) – С. 49-58.
6. СП 118.13330.2012\*. Свод правил. Общественные здания и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 31-06-2009. – Москва: Минрегион России, 2011. – 92 с.
7. СП 131.13330.2020. Свод правил. Строительная климатология Актуализированная редакция СНиП 23-01-99\*. – Москва: Минрегион России, 2018. – 112 с.
8. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 12 с.
9. Энергетическая стратегии России на период до 2030 г. Утр. распоряжением Правительства РФ от 13.11.2009 г. № 1715-р / Институт энергетической стратегии. [электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения: 20.10.2023)



10. Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий : СП 23-103-2003 : утв. Госстроем России 25.12.2003 : введ. в действие с 22.03.2004 – Москва : ФГУП ЦПП, 2004. – 35 с. – Текст : непосредственный.
11. О ситуации с теплоснабжением в РФ: отчет / Фонд энергетического развития. 2016 г. Москва. URL: <http://www.energsovet.ru/stat880.html> (дата обращения: 15.09.2023).
12. Plotnikov A., Zhilina T. MATEC Web of Conferences. 2018. С. 01010. DOI: 10.1051/mateconf/201714301010.
13. M.Ermann, J.Wiley, Architectural Acoustics (JohnWiley&SonsInc,2017).
14. Плотников А.С. Снижение вибрационных нагрузок при эксплуатации крышных котельных / Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2018. № 1 (34). С. 77-82.
15. Тупов В.Б. Снижение шума от объектов большой и малой энергетики // Доклады V Всерос. науч.-практ. конф. СПб.: Айсинг, 2015. С. 55–64.

## References

1. Noise protection : SP 51.13330.2011 : utv. Ministry of Regional Development of the Russian Federation 28.12.2010 : introduction. effective from 20.05.2011 – Moscow: Ministry of Regional Development of Russia, 2011. – 47 p. – Text : immediate.
2. Hygienic Standards and Requirements for Ensuring Safety and (or) Harmlessness for Humans of Environmental Factors: SanPiN 1.2.3685-21 : utv. Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation 28.01.2021 – Moscow: Ministry of Justice of Russia, 2021. – 949 p. – Text : immediate.
3. Ivanov N.I., Shashurin A.E. Textbook "Protection from noise and vibration", second edition - expanded and revised / St. Petersburg: Printing Shop, 2019. - 284 p.
4. Plotnikov A.S., Zhilina T.S., Afonin K.V., Saifullin A.A. Study of structural noise when using several floating floor circuits in roof boiler houses // Noise Theory and Practice, 2021, No. 7 (2) – pp. 93-102.
5. Gureev K. A., Tryastin D. V. Research on the acoustic properties of materials for additional sound insulation in apartment buildings in the conditions of using various building structures // Noise Theory and Practice, 2022, No. 8 (4) – P. 49-58 .
6. SP 118.13330.2012\*. A set of rules. Public buildings and structures. Updated edition of SNiP 31-06-2009. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia, 2011. 92 p. (in Russian).
7. GOST 30494-2011. The buildings are residential and public. Indoor climate parameters. Moscow: Standartinform, 2019. 12 p. (in Russian).
8. GOST 30494-2011. The buildings are residential and public. Indoor climate parameters. Moscow: Standartinform, 2019. 12 p. (in Russian).
9. Russia's Energy Strategy for the Period up to 2030. Decree of the Government of the Russian Federation dated 13.11.2009 No. 1715-r / Institute of Energy Strategy. [Electronic resource]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (accessed: 20.10.2023)
10. Designing sound insulation of enclosing structures of residential and public buildings: SP 23-103-2003 : utv. Gosstroyem Rossii 25.12.2003 : vved. in action from 22.03.2004 – Moscow: FSUE CPP, 2004. – 35 p. – Text : immediate.
11. On the situation with heat supply in the Russian Federation: report / Energy Development Fund. 2016 Moscow. URL: <http://www.energsovet.ru/stat880.html> (accessed: 15.09.2023).

12. Plotnikov A., Zhilina T. MATEC Web of Conferences. 2018. С. 01010. DOI: 10.1051/mateconf/201714301010.
13. M.Ermann, J.Wiley, Architectural Acoustics (JohnWiley&SonsInc,2017).
14. Plotnikov A.S. Reduction of vibrational loads in the operation of rooftop boiler houses / Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University. 2018. № 1 (34). S. 77-82.
15. Тупов V.B. Reduction of Noise from Large and Small Power Engineering Facilities. Sci.-Prakt. Conf. St. Petersburg, Aising Publ., 2015. Pp. 55–64.

УДК: 534.836.2  
OECD: 1.03. AA

## Рекомендации по выбору шумозащитных мероприятий для защиты от шума железной дороги

Шабарова А.В.<sup>1\*</sup>, Борцова С.С.<sup>2</sup>, Буторина М.В.<sup>3</sup>, Кондратьев С.А.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ассистент <sup>2</sup> Ст. преподаватель <sup>3</sup> Д.т.н., профессор <sup>4</sup> Преподаватель  
<sup>1,2,3</sup> Кафедра «Экология и производственная безопасность»

<sup>1,2,3,4</sup> Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»  
им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

### Аннотация

Проблема снижения шума железных дорог на прилегающих жилых территориях является важной задачей, для решения которой было разработано большое количество различных способов. Правильный выбор подходящих шумозащитных мероприятий сложный и важный вопрос сферы проектирования. В данной статье рассматривается алгоритм выбора шумозащитных мероприятий в соответствии с различными критериями: эффективность мероприятия (обеспечение требуемого снижения шума), его технические характеристики (возможность монтажа конструкции, соответствие требованиям безопасности и пр.), экономическая эффективность. В работе представлена оценочная эффективность различных шумозащитных мероприятий, возможность их применения в различных условиях застройки, критерий принятия управленческого решения на основании оценки индекса WTI, матрица выбора шумозащитных мероприятий. Предложенные в работе алгоритмы позволяют выбрать наиболее рациональный вариант шумозащитного мероприятия или комплекса таких мероприятий.

**Ключевые слова:** шум железнодорожного транспорта, шумозащитные мероприятия, шумозащитные экраны, шумозащитное остекление, снижение шума на селитебной территории.

## *Recommendations for selection of sound protection measures to protect against railway noise*

*Shabarova A.V.<sup>1\*</sup>, Bortsova S.S.<sup>2</sup>, Butorina M.V.<sup>3</sup>, Kondratev S.A.<sup>4</sup>*

*<sup>1</sup> Assistant <sup>2</sup> Senior lecturer <sup>3</sup> PhD, Professor <sup>4</sup> Lecturer*

*<sup>1,2,3</sup> Department of Ecology and Industrial Safety*

*<sup>1,2,3,4</sup> Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia*

### **Abstract**

*The problem of reducing railway noise in adjacent residential areas is an important task, for which a large number of different methods have been developed. The correct selection of suitable noise protection measures is a complex and important design issue. This article discusses the algorithm for selecting noise protection measures in accordance with various criteria: the effectiveness of the measure (ensuring the required noise reduction), its technical characteristics (the possibility of installing the structure, compliance with safety requirements, etc.), economic efficiency. The paper presents the estimated effectiveness of various noise protection measures, the possibility of application in various building conditions, a criterion for making management decisions based on the assessment of the WTI index, and a matrix for selecting noise protection*

---

\*E-mail: shabarova\_av@voenmeh.ru (Шабарова А.В.)

measures. The algorithms presented in the work allow you to choose the most rational option for noise protection measures.

**Keywords:** noise of railway transport, noise protection measures, noise protection screens, noise protection glazing, noise reduction in residential areas.

## Введение

Проблема снижения шума железных дорог на прилегающих жилых территориях является важной задачей, для решения которой было разработано большое количество различных способов. [1-4] Средства снижения шума железных дорог имеют разную эффективность, стоимость, одни из них возможно реализовать лишь на этапе строительства объекта, другие, напротив, применимы для существующих объектов и не требуют вмешательства в конструкцию железнодорожного пути. Целесообразность выбора шумозащитных мероприятий зависит также от типа защищаемой территории, вида ее застройки. Как правило, шумозащитные конструкции реализуются не отдельно, а в составе комплекса, который может включать в себя несколько различных видов мероприятий.

При подборе шумозащитных мероприятий следует руководствоваться как их эффективностью и технической возможностью реализации, так и экономической выгодой.

В данной работе описаны алгоритмы, позволяющие выбирать подходящие варианты шумозащиты и комбинировать их между собой в зависимости от различных условий.

## 1. Алгоритм выбора шумозащитных мероприятий

Алгоритм выбора шумозащитных мероприятий состоит из четырёх этапов. На первом этапе на основании акустических расчетов определяется требуемое снижение шума, после чего выбираются мероприятия, способные обеспечить данное снижение. На втором определяется возможность реализации выбранных мероприятий на основании результатов инженерно-геологических и инженерно-геодезических изысканий, а также анализа данных о строении железнодорожного пути, на этом же этапе проводится детальный расчет параметров шумозащитных конструкций, в т.ч. технических. На третьем этапе производится расчет затрат на данные мероприятия, который позволяет выбрать наиболее экономически выгодное решение [5, 6]. На последнем этапе осуществляется выбор оптимального варианта шумозащиты по заданным проектировщиком критериям (акустическим, экономическим, техническим).

СанПиН 1.2.3685-21 регламентирует допустимые уровни шума на различных территориях, эффективность шумозащитных мероприятий должна быть не ниже требуемого, до указанных в данном документе уровней, снижения. Требования, которым должны соответствовать шумозащитные мероприятия в части механической прочности и устойчивости шумозащитных конструкций, конфигурации шумозащитных сооружений с учетом ограничений, связанных с параметрами полосы отвода железной дороги, пожарной безопасности, водоотвода, обеспечения безопасности движения и беспрепятственного доступа к пассажирам в случае происшествия, простоты монтажа, эстетического вида и пр. предусмотрены ГОСТ 33325-2015, ГОСТ 33329-2015, СП 51.13330.2011, СП 119.13330.2017, СП 276.1325800.2016. Эти и многие другие параметры должны быть учтены при разработке и выборе шумозащитных мероприятий.

Выбор шумозащитных мероприятий на первом этапе (выбор исходя из

эффективности) обязательно должен быть подтвержден акустическими расчетами, однако до проведения итоговых расчетов можно руководствоваться их оценочной эффективностью, представленной в таблице 1. [5, 7-10]

Таблица 1

Максимальная акустическая эффективность шумозащитных мероприятий (при обеспечении требуемых конструктивных параметров)

№ п/п	Наименование мероприятия	Акустическая эффективность, дБА
1	Шумозащитные экраны	19
2	Шумозащитное остекление	10 дБА (на территории) до допустимых уровней (внутри помещений)
3	Земляные грунтовые валы	15
4	Шумозащитные выемки	15
5	Шумозащитные зеленые насаждения (в зависимости от вида посадки)	5-10
6	Шумозащитная галерея	30
7	Малые шумозащитные экраны	5
8	Ограничение скорости движения	3
9	Вибродемпфирующие накладки на шейку рельса	3
10	Подбалластные маты	2
11	Бесстыковый путь	2
12	Шлифование рельсов	2

Как было сказано выше, выбор шумозащитного мероприятия зависит также от типа застройки, расположенной на защищаемой территории. Можно выделить четыре типа территории:

- сельская малоэтажная застройка;
- городская многоэтажная застройка;
- городская среднеэтажная застройка;
- застройка, расположенная ближе 50 м к железной дороге.

Для каждой территории можно выделить мероприятия, которые являются наиболее эффективными. Для сельской местности с малоэтажной застройкой наилучшим образом подходят шумозащитные экраны, малые шумозащитные экраны, шумозащитные насыпи, шумозащитные зеленые насаждения. Для среднеэтажной застройки помимо мероприятий, подходящих для сельской местности может быть использовано шумозащитное остекление, а для многоэтажной застройки и шумозащитные галереи. Для застройки, расположенной ближе 50 м от железной дороги, не следует использовать зеленые насаждения, так как ширина лесополосы не обеспечит требуемого снижения шума. Малые шумозащитные экраны также не рекомендуются в условиях многоэтажной или близко расположенной застройки из-за низкой эффективности, в данном случае лучше использовать полноразмерные экраны. Мероприятия, снижающие непосредственно уровень шума источника (мероприятия 8-12 таблицы 1) не зависят от типа защищаемой застройки, однако следует учитывать невозможность/ограниченность их совместного применения. Шумозащитные выемки, подбалластные маты и бесстыковой

путь применимы на стадии проектирования или капитального ремонта объекта, т.к. требуют вмешательства в конструкцию пути. В таблице 2 представлены мероприятия, целесообразные к применению в зависимости от типа защищаемых территорий. [7, 11, 12]

Таблица 2

Рекомендуемые мероприятия по типу защищаемой от шума территории

№ п/п	Тип защищаемой территории	Рекомендуемые мероприятия											
		шумозащитные зеленые насаждения	земляные грунтовые валы	шумозащитные экраны	шумозащитные галереи	шумозащитное остекление	накладки на шейку рельса	малые шумозащитные экраны	ограничение скорости движения транс.	шумозащитные выемки *	подбалластные маты *	бесстыковой путь *	
1	Садоводческие товарищества, малые жилые массивы	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+
2	Среднеэтажная городская застройка	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+
3	Многоэтажная застройка	+	+	+	+	+	+	±	+	+	+	+	+
4	Близко расположенная застройка (до 50 м)	-	+	+	+	+	+	±	+	+	+	+	+

Примечание: \* – данные мероприятия требуют вмешательства в конструкцию пути.

При выборе шумозащиты возможно применение комплекса мероприятий, однако предпочтение следует отдавать тем мероприятиям, которые самостоятельно могут обеспечивать необходимое снижение шума и не нуждаются в комбинировании с другими. Если в качестве шумозащитного мероприятия предполагается устройство шумозащитной галереи (эффективность данного мероприятий должна быть более 25 дБА), то рекомендуется сначала рассчитать комплекс шумозащитных мероприятий (например, устройство шумозащитного экрана и шумозащитного остекления). Если для достижения санитарных норм расчётом предусматривается устройство в комплексе более трёх различных шумозащитных конструкций, в таком случае применение шумозащитной галереи неизбежно. Для нового железнодорожного пути рекомендуется использовать мероприятия, обеспечивающие снижение шума в источнике (например, подбалластные маты, бесстыковой путь). [5]

## 2. Экономические критерии принятия решения

Принятие решения о выборе шумозащитных мероприятий с экономической точки зрения может быть основано на следующих критериях:

- оценка расселения жилых домов как альтернатива шумозащиты;
- оценка экономической эффективности шумозащиты в течение жизненного цикла дороги, долговечности шумозащитной конструкции, а также дисконтирования;
- оценка проекта шумозащиты по индексу WTI.

Расселение жилых домов, как правило, применяется для малоэтажной сельской застройки. Обеспечить требуемое снижение шума для близко расположенных к железнодорожным путям зданий указанной территории способен только комплекс шумозащитных мероприятий, с более высокой стоимостью. Оценка альтернативного решения по расселению жилых домов проводится на основании информации о кадастровой стоимости жилья, попадающего в зону повышенных уровней шума. На рисунке 1 показана карта шума с оценкой зон в соответствии с Директивой ЕС 2002/49/ЕС. Она отражает область повышенных уровней шума с указанием количества домов, попавших в эту область, и количество человек, проживающих в этой области. Данный тип карт шума очень удобен в использовании при проведении оценки влияния повышенных уровней шума на население и при проведении оценки затрат на расселение жилых домов [13].

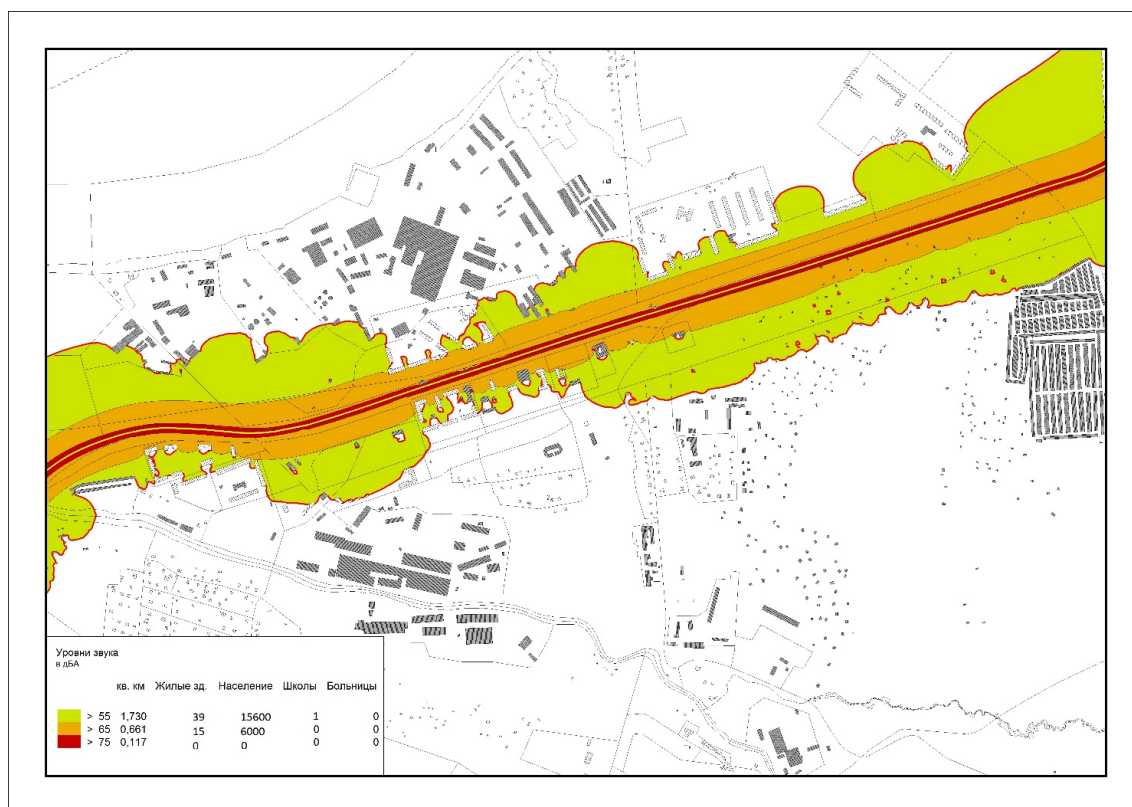


Рис. 1. Карта шума с оценкой зон по Директиве 2002/49/ЕС

В качестве показателей экономической эффективности шумозащиты рассматривают чистый дисконтируемый доход, ЧДД (или чистую приведённую стоимость, ЧПС) и индекс доходности, ИД. Они основаны на сопоставлении затрат на шумозащиту с предотвращаемым за счёт их применения ущербом [6]. Расчет ущерба здоровью населения в результате воздействия повышенных уровней транспортного шума может быть выполнен в соответствии с [14, 15]. При этом рассматриваются экономические

подходы к стоимости болезни, инвалидизации и смертности населения, снижению работоспособности людей под действием шума [16]. Оценка стоимости болезни позволяет учесть часто упускаемые из расчёта косвенные затраты и упущенную выгоду, моральный ущерб. Прямые затраты оценивают полный цикл лечения (диагностику, амбулаторно-поликлиническое или стационарное обслуживание, реабилитацию); дифференцируются в зависимости от пола и возраста пациента, вида и стадии заболевания, группы инвалидности и др.; учитывают временной период лечения и дисконтирование. Выделенные элементы затрат умножаются на количество попадающих в зону действия дороги человек.

Затраты на шумозащиту помимо капитальных вложений в строительство и текущих затрат по их содержанию и эксплуатации включают расходы на проектирование, реконструкцию (или замену) и ликвидацию. Элементы затрат, распределённые во времени, дисконтируются.

Wirtschaftlichen Tragbarkeitsindex (или критерий WTI) – индекс экономической устойчивости, определяется как произведение экологической эффективности мероприятия (обеспечение ПДУ на нормируемых объектах или достижение цели в %) и его экономической рентабельности (выгода/затраты), поделенное на 25 (формула 1) [17].

$$WTI = \text{Эффективность} \times \text{Рентабельность} / 25 \quad (1)$$

Экологическая эффективность оценивается как процент зданий, для которых достигнуты ПДУ в результате применения шумозащитных мероприятий, от всех зданий, подверженных повышенному воздействию уровней шума до применения мероприятий. Рентабельность оценивается как отношение выгод, полученных в результате применения мероприятий, которые могут быть оценены через затраты на расселение зданий, к сумме затрат на шумозащитные мероприятия. Комбинации эффективности и рентабельности приведены на рисунке 2. Критерии принятия управленческого решения представлены в таблице 3.

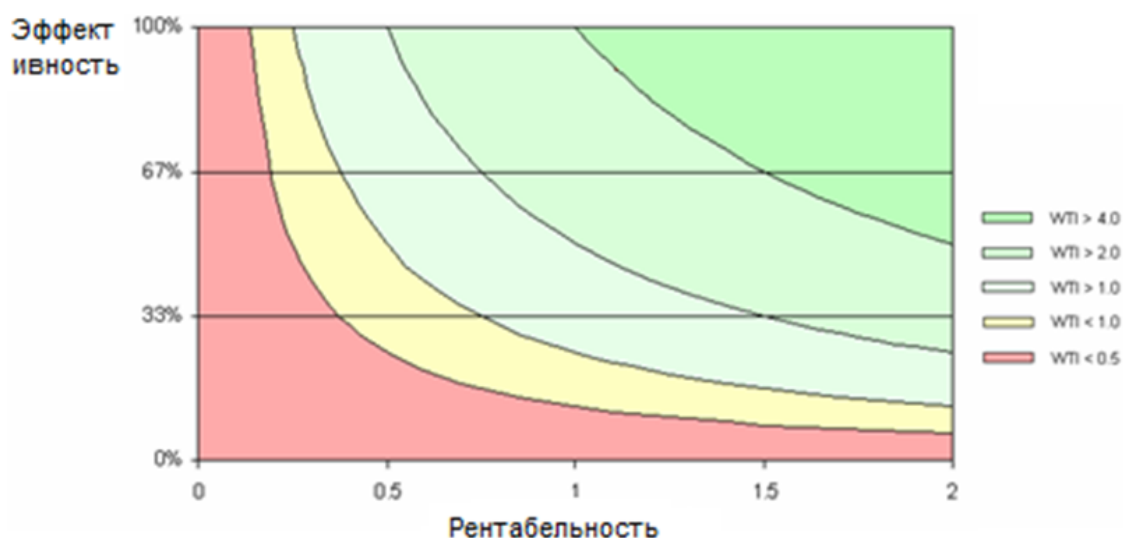


Рис. 2. Оценка индекса WTI



Таблица 3

Критерий принятия управленческого решения

Значение WTI	Оценка	Принятие управленческого решения
WTI > 4	отлично	решение о применении мероприятия принимается
WTI > 2	хорошо	решение о применении мероприятия принимается
WTI > 1	удовлетворительно	для принятия решения необходимы дополнительные исследования
WTI < 1	неудовлетворительно	поиск альтернативных вариантов мероприятий
WTI < 0,5	плохо	поиск альтернативных вариантов дороги

### 3. Матрица выбора шумозащитных мероприятий

В таблице 4 представлена матрица выбора шумозащитных мероприятий. Данная таблица помогает определить соответствие выбираемой шумозащитной конструкции различным требованиям, как акустическим, так и техническим.

В зависимости от значения критерия каждой шумозащитной конструкции рекомендуется присваивать определённое количество баллов от 1 до 5 согласно таблице 4. Для определения оптимальности устройства каждой шумозащитной конструкции баллы суммируются, оптимальной рекомендуется считать ту конструкция, которая имеет наибольшее число баллов [5].

Таблица 4

Матрица выбора различных шумозащитных конструкций

Критерий (требование)	Шумозащитные мероприятия и количество присваиваемых баллов								
	шумозащитные зеленые насаждения	земляные грунтовые валы	шумозащитные выемки	шумозащитные экраны	шумозащитные галереи	шумозащитное остекление	накладки на шейку рельса	малые шумозащитные экраны	ограничение скорости движения
Максимальная акустическая эффективность, дБА	< 5 1	< 15 2	< 15 2	< 19 3	> 30 4	< 10 (+30 в помещении) 5	< 3 1	< 5 1	< 5 5
Конструктивная ширина видимой части,	>10	>5	<0,5	<1	>12	н.п.	н.п.	<1 м	-



Критерий (требование)	Шумозащитные мероприятия и количество присваиваемых баллов								
	шумозащитные зеленые насаждения	земляные грунтовые валы	шумозащитные выемки	шумозащитные экраны	шумозащитные галереи	шумозащитное остекление	накладки на шейку рельса	малые шумозащитные экраны	ограничение скорости движения
Выполнение требований пожарной безопасности конструкции	-	+	+	+	±	+	+	+	+
	1	5	5	5	3	5	5	5	5
Простота конструкции	±	±	-	±	-	+	±	±	+
	3	3	1	3	1	5	2	3	5
Транспортабельность, ремонтпригодность и удобство монтажа	-	-	-	+	±	+	±	±	+
	1	1	1	5	3	5	3	4	3
Экономический критерий	±	+	+	+	±	+	±	+	+
	3	5	5	5	3	5	3	5	5
Эстетичный вид готовой конструкции	+	+	±	+	+	+	+	+	+
	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Общее кол-во баллов	47	47	53	55	45	55	44	47	50
Примечание – Критерии назначения максимального и минимального балла: 0 – конструкция по данному критерию не характеризуется (н.п. – не применяется); 1 – конструкция заданному критерию полностью не соответствует. . . . 5 – конструкция заданному критерию полностью соответствует.									

## Заключение

Грамотный выбор шумозащитных мероприятий сложная и важная задача. Шумозащитные конструкции должны не только обладать достаточной эффективностью, но и быть экономически целесообразными, иметь требуемые технические характеристики, подходить для использования в условиях конкретного участка железной дороги. При выборе шумозащитных мероприятий рекомендован следующий алгоритм:

- на основании акустических расчетов определить требуемую акустическая эффективность шумозащитных мероприятий и произвести выбор типа и параметров мероприятий;
- на основании результатов инженерно-геологических и инженерно-геодезических изысканий, а также анализа данных о строении и конструктивных параметрах элементов железнодорожного пути выполнить обоснование возможности устройства выбранных шумозащитных конструкций и детальный расчет их параметров;

• оценить выбранные конструкции в соответствии с критериями (таблица 4) для обоснования оптимальных шумозащитных свойств, обеспечивающих нормируемые уровни шума, экономических и технических показателей.

Выбор шумозащитного мероприятия зависит от типа застройки защищаемой территории, поэтому для подбора соответствующего мероприятия рекомендуется использовать таблицу 2.

В качестве экономического критерия оценки шумозащитного мероприятия рекомендованы ЧДД и ИД, ЧПС или индекс WTI. При этом полная стоимость шумозащиты не должна превышать затраты на расселение жилых домов.

### Список литературы

1. Иванов, Н. И. Проблема шума железнодорожного транспорта и пути ее решения / Н. И. Иванов, Д. А. Куклин // Защита населения от повышенного шумового воздействия: Сборник докладов III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 22–24 марта 2011 года / Под редакцией Н.И. Иванова. – Санкт-Петербург: ИННОВА, 2011. – С. 108-123.
2. Оценка шума железнодорожного транспорта и разработка шумозащитных мероприятий / М. В. Буторина, Д. А. Куклин, П. В. Матвеев, А. Ю. Олейников // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 2(74). – С. 57-65.
3. Шашурин А.Е. A refined theory of traffic and technological barriers // В сборнике: 25th International Congress on Sound and Vibration 2018, ICSV 2018: Hiroshima Calling : 25, Hiroshima Calling, Hiroshima. -2018. -Т. 7. -С. 4086-4090
4. Иванов Н.И., Шашурин А.Е. Учебное пособие «Защита от шума и вибрации», издание второе - дополненное и переработанное / СПб.: Печатный Цех, 2019. - 284с.
5. Методические указания по выбору шумозащитных мероприятий при выявлении сверхнормативного акустического воздействия от объектов железнодорожного транспорта (утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 12.10.2022 N 2638/р).
6. Борцова С.С. Экономическая эффективность шумозащитных конструкций // Noise Theory and Practice. – 2022. – Том 8, № 2. – С. 45-55.
7. Борцова С.С. Комплексное решение проблемы снижения шума железнодорожного транспорта // Noise Theory and Practice. 2021. №5 (27) – С. 33-47.
8. Шашурин А.Е. Определение эффективной высоты и акустических характеристик шумозащитного экрана // Noise Theory and Practice. 2018. №2.
9. Инновационные методы снижения уровня шума // Железные дороги мира. – 2011. – № 10. – С. 66-71. – EDN OKHWER.
10. Маэкава З. Экологическая и архитектурная акустика / З. Маэкава, Дж. Х. Риндел, П. Лорд / Spon Press. - Второе издание. – 2011. – 371 с.
11. Воронова, А. А. Выбор мероприятий для защиты от железнодорожного шума в городской и сельской застройке / А. А. Воронова, А. В. Шабарова, М. В. Буторина // Защита от повышенного шума и вибрации: сборник трудов конференции IX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 26–28 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург: Институт акустических конструкций, 2023. – С. 272-279.
12. Шабарова, А. В. Сравнение методов расчета распространения шума железнодорожного транспорта в различных типах застройки / А. В. Шабарова, М. В. Буторина, Д. А. Куклин // Noise Theory and Practice. – 2022. – Т. 8, № 3. – С. 16-33.

13. Риск-ориентированный подход к оценке шума железнодорожного транспорта / М. В. Буторина, Д. А. Куклин, А. П. Васильев, А. В. Шабарова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 1. – С. 28-33.
14. МР 2.1.10.0059–12 «Состояние здоровья населения в связи с состоянием окружающей среды и условиями проживания населения. Оценка риска здоровью населения от воздействия транспортного шума. Методические рекомендации» (утв. Роспотребнадзором 23.03.2012).
15. Борцова С.С. К оценке ущерба от транспортного шума // Noise Theory and Practice, – 2021. – Том 7, № 3. – С. 42-49.
16. Приказ Минэкономразвития России N 192, Минздравсоцразвития России N 323н, Минфина России N 45н, Росстата N 113 от 10.04.2012 «Об утверждении Методологии расчета экономических потерь от смертности, заболеваемости и инвалидизации населения» (Зарегистрировано в Минюсте России 28.04.2012 N 23983).
17. Bundesamt für Umwelt (BAFU) «Wirtschaftliche Tragbarkeit und Verhaeltnismaessigkeit von Laermschutzmassnahmen», Bern 2006.

### References

1. Ivanov, N. I. The problem of railway transport noise and ways to solve it / N. I. Ivanov, D. A. Kuklin // Protection of the population from increased noise exposure: Collection of reports of the III All-Russian scientific and practical conference with international participation, St. -Petersburg, March 22–24, 2011 / Edited by N.I. Ivanova. – St. Petersburg: INNOVA, 2011. – P. 108-123.
2. Assessing the noise of railway transport and developing noise protection measures / M. V. Butorina, D. A. Kuklin, P. V. Matveev, A. Yu. Oleinikov // Bulletin of the Rostov State Transport University. – 2019. – No. 2(74). – P. 57-65.
3. Shashurin, A. E. A refined theory of traffic and technological barriers / A. E. Shashurin // 25th International Congress on Sound and Vibration 2018, ICSV 2018: Hiroshima Calling : 25, Hiroshima Calling, Hiroshima. – Hiroshima, 2018. -Vol. 7. – P. 4086-4090
4. Ivanov N.I., Shashurin A.E. Textbook 'Protection from noise and vibration', second edition - expanded and revised / St. Petersburg: Printing Shop, 2019. - 284 p.
5. Guidelines for the selection of noise protection measures when identifying excess acoustic impact from railway transport facilities (approved by Order of JSC Russian Railways dated October 12, 2022 N 2638/r).
6. Bortsova S.S. Economic efficiency of the noise protection. // Noise Theory and Practice. – 2022. – Vol. 8, N 2. – P. 45-55.
7. Bortsova S.S. A comprehensive solution to the problem of reducing railway noise // Noise Theory and Practice. 2021. No. 5 (27) – P. 33-47.
8. Shashurin A.E. Determination of the effective height and acoustic characteristics of a noise barrier // Noise Theory and Practice. 2018. No. 2.
9. Innovative methods for reducing noise levels // World Railways. – 2011. – No. 10. – P. 66-71. – EDN OKHWER.
10. Maekawa Z. Environmental and Architectural Acoustics / Z. Maekawa, J. H. Rindel, P. Lord / Spon Press. - Second edition. – 2011. – 371 p.
11. Voronova, A. A. Selection of measures for protection from railway noise in urban and rural areas / A. A. Voronova, A. V. Shabarova, M. V. Butorina // Protection from increased noise and vibration: collection of conference proceedings IX All-Russian scientific and practical conference with international participation, St. Petersburg, April 26–28, 2023. – St. Petersburg: Institute of Acoustic Designs, 2023. – P. 272-279.

12. Shabarova, A. V. Comparison of methods for calculating the propagation of railway transport noise in various types of development / A. V. Shabarova, M. V. Butorina, D. A. Kuklin // Noise Theory and Practice. – 2022. – Т. 8, No. 3(30). – P. 16-33.

13. Risk-based approach to assessing the noise of railway transport / M. V. Butorina, D. A. Kuklin, A. P. Vasiliev, A. V. Shabarova // Bulletin of the Rostov State Transport University. – 2019. – No. 1(73). – P. 28-33.

14. MR 2.1.10.0059–12 'State of public health in connection with the state of the environment and living conditions of the population. Assessing the risk to public health from exposure to traffic noise. Methodological recommendations' (approved by Rospotrebnadzor on March 23, 2012).

15. Bortsova S.S. To assess damage from traffic noise// Noise Theory and Practice. – 2021. – Vol. 7, N 3. – P. 42-49.

16. Order of the Ministry of Economic Development of Russia N 192, Ministry of Health and Social Development of Russia N 323n, Ministry of Finance of Russia N 45n, Rosstat N 113 dated 04/10/2012 'On approval of the Methodology for calculating economic losses from mortality, morbidity and disability of the population' (Registered with the Ministry of Justice of Russia on 04/28/2012 N 23983).

17. Bundesamt für Umwelt (BAFU) 'Wirtschaftliche Tragbarkeit und Verhaeltnismaessigkeit von Laermschutzmassnahmen', Bern 2006.

УДК: 331.451  
OECD: 01.03.AA

## Расчет акустической эффективности насыпи

Борцова С.С.<sup>1</sup>, Буторина М.В.<sup>2\*</sup>, Иванов Н.И.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ст. преподаватель <sup>2,3</sup> Д.т.н., профессор

<sup>1,2,3</sup> Кафедра «Экология и производственная безопасность», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

### Аннотация

Применение шумозащитных насыпей (валов) является весьма перспективным мероприятием для снижения шума автомобильного и железнодорожного транспорта. Однако проблемы, связанные с оценкой их акустической эффективности, затрудняют их применение. Методы, отраженные в нормативной документации, завышают расчетные значения на 5-10 дБ, особенно в области низких и средних частот. В представленной работе предложен инженерный метод расчета, основанный на методе последовательного преобразования звуковых полей, который учитывает дифракцию на обеих кромках насыпи, а также такие дополнительные параметры, как коэффициенты звукопоглощения ее склонов и подстилающей поверхности. Верификация расчетной формулы показывает, что точность предложенной формулы составляет  $\pm 3$  дБ во всем диапазоне частот.

**Ключевые слова:** шумозащитная насыпь, акустическая эффективность, расчетный метод, звукопоглощение, двойная дифракция.

## *Calculation of acoustic efficiency of embankment*

*Bortsova S.S.<sup>1</sup>, Butorina M.V.<sup>2\*</sup>, Ivanov N.I.<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup> Senior Lecturer <sup>2,3</sup> DSc, Professor*

*<sup>1,2,3</sup> Department of Ecology and Industrial Safety, Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia*

### **Abstract**

*The use of noise protection embankments (shafts) is a very promising measure for reducing noise from road and rail transport. However, problems associated with assessing their acoustic efficiency make their application difficult. The methods reflected in the regulatory documentation overestimate the calculated values by 5-10 dB, especially in the low and medium frequencies range. In given article an engineering calculation method based on the method of sequential transformation of sound fields is proposed. It takes into account diffraction on both edges of the embankment, as well as additional parameters such as the sound absorption coefficients of its slopes and the underlying surface. Verification of the calculation formula shows that the accuracy of the proposed method is  $\pm 3$  dB over the entire frequency range.*

**Keywords:** *noise protection embankment, acoustic efficiency, calculation method, noise absorption, double diffraction.*

## Введение

По масштабам применения шумозащитные насыпи (земляные валы) – вторая по распространению конструкция барьерного типа после акустических экранов.

Шумозащитные насыпи или валы проектируются в соответствии с ОДМ 218.2.013-2011 [1]. Применение шумозащитных насыпей имеет определенные особенности: при необходимости обеспечить одинаковое снижение шума высота шумозащитного грунтового вала должна быть на 15-20% больше высоты вертикального шумозащитного экрана, при этом существенно увеличивается занимаемая шумозащитным валом площадь территории. Так, по оценкам специалистов акустическая эффективность шумозащитного экрана высотой 7 м сопоставима с эффективностью шумозащитного вала высотой 9,5 м. Вал при этом занимает площадь шириной не менее 32 м, в то время как для установки фундамента экрана требуется порядка не более 1 м. При необходимости размещения шумозащитного сооружения в полосе отвода дороги возникает необходимость ее увеличения на ширину вала, что зачастую приводит к необходимости выкупа земельных участков.

Тем не менее, шумозащитные насыпи рекомендуется использовать за пределами городской застройки, в случае прохождения дороги в уровне земли при отсутствии пересечений с другими дорогами. Допустимость применения шумозащитных валов обосновывается расчетом акустической и экономической эффективности.

С точки зрения акустической эффективности, как и для любого экранирующего сооружения, ключевым параметром шумозащитной насыпи (ШН) является её высота. Однако в отличие от остальных барьеров при огибании звуком верхнего ребра ШН в ряде источников отмечен эффект «двойной дифракции» [2]. К сожалению, данный эффект слабо отражен в действующей нормативно-технической документации [3-5], которая крайне противоречиво толкует оценку снижения шума насыпью.

В основе оценки эффективности ШН лежит расчёт эффективности мнимого экрана, «вписанного» под одну или обе кромки ШН. Согласно СП 276 [5] экран следует располагать под ближней к расчетной точке вершиной насыпи. ГОСТ 31295.2 [4] предлагает размещать условный экран-стенку под вершиной ШН, ближней к источнику шума. Второе отличие – знак перед поправочным коэффициентом  $K_{скл}$ , который учитывает ширину насыпи и позволяет учесть дополнительное влияние склонов на снижение уровней шума. При этом в разных документах знак, стоящий перед этим важным параметром, различен. Применение коэффициента  $K_{скл}$  со знаком «+» даёт существенно завышенный результат, к тому же порядок определения коэффициента при помощи эмпирической номограммы усложняет процесс расчёта эффективности ШН.

Проблемы, связанные с проектированием шумозащитных насыпей, ограничивают их применение в качестве шумозащиты. При этом различные авторы сходятся во мнении, что данное мероприятие весьма перспективно для снижения шума как автомобильных, так и железных дорог [6,7].

Целью данной работы является разработка нового метода расчета, лишённого несовершенств, отмеченных в нормативной документации.

## 1. Разработка расчетного метода для оценки акустической эффективности насыпи

Анализ действующих расчетных методов показывает, что они не дают возможности учесть все влияющие на эффективность насыпи параметры. Предлагаемый в данной работе метод расчета позволяет учесть не только расположение источника шума, кромок насыпи и защищаемого объекта, но и звукопоглощающие коэффициенты склонов



насыпи и подстилающей поверхности, а также геометрические параметры насыпи.

Акустическая эффективность насыпи определяется как:

$$\Delta L_{ш/з} = 10 \lg \frac{I_{РТ}^{б ш/з}}{I_{РТ}^{с ш/з}} \quad (1)$$

где  $I_{РТ}^{б ш/з}$  – интенсивность звука без шумозащитной конструкции в расчетной точке (РТ), Вт/м<sup>2</sup>;

$I_{РТ}^{с ш/з}$  – то же с установленной шумозащитной конструкцией в РТ, Вт/м<sup>2</sup>.

Расчетная схема приведена на рис. 1.

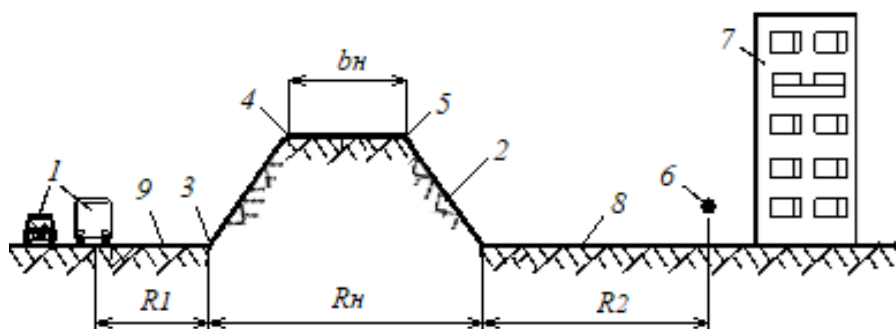


Рис. 1. Расчетная схема прохождения звука за насыпь: 1 – источник шума (ИШ); 2 – насыпь; 3 – основание насыпи; 4 – левая кромка насыпи; 5 – правая кромка насыпи; 6 – расчетная точка (РТ); 7 – защищаемое здание; 8 – опорная поверхность; 9 – часть опорной поверхности между ИШ и насыпью

Выполним расчет звука в РТ при наличии насыпи (рис. 1), используя метод последовательного преобразования звуковых полей [8].

Основные допущения:

- источник шума линейный (фронт звуковой волны цилиндрический);
- длина источника шума (ИШ) принимается равной длине насыпи;
- насыпь, вернее, ее кромки (края) являются вторичными линейными ИШ;
- звук дифрагирует через левую и правую кромки (края) насыпи (двойная дифракция);
- часть опорной поверхности между ИШ и насыпью, склон насыпи и верхняя часть насыпи обладают звукопоглощающими свойствами;
- звукопоглощающие свойства опорной поверхности между насыпью и защищаемым объектом не учитываются.

Интенсивность звука в РТ без насыпи определится как:

$$I_{РТ}^{б/н} = \frac{W_{ист}}{\pi l_{ист} R} \arctg \frac{l_{ист}}{2R}, \text{ Вт/м}^2 \quad (2)$$

где  $W_{ист}$  – акустическая мощность источника шума, Вт;  $l_{ист}$  – длина ИШ, м;  $R$  – расстояние от ИШ до РТ, м:

$$R = R_1 + R_n + R_2 \quad (3)$$

где  $R_1$  – расстояние от ИШ до основания насыпи, м;  $R_n$  – ширина нижней части насыпи (по основанию), м;  $R_2$  – расстояние от насыпи до РТ, м.

Интенсивность звука, пришедшего в нижнюю часть насыпи (излучение звука происходит в полупространство):

$$I_{\text{н}} = \frac{W_{\text{ист}}(1 - \alpha_{\text{пов}})}{\pi l_{\text{ист}} R_1} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{ист}}}{2R_1}, \quad (4)$$

где  $l_{\text{ист}}$  – длина ИШ условно равная длине насыпи, м;  $\alpha_{\text{пов}}$  – коэффициент звукопоглощения части опорной поверхности;  $R_1$  – расстояние между ИШ и насыпью, м.

Акустическая мощность в нижней части насыпи, при этом ее ширина условно принята равной 1 м:

$$W_{\text{н}} = I_{\text{н}} l_{\text{н}} 1 \quad (5)$$

где  $l_{\text{н}}$  – длина насыпи, м.

Интенсивность звука на вершине насыпи:

$$I_{\text{в}} = \frac{W_{\text{н}}(1 - \alpha_{\text{ск}})}{\pi/2 l_{\text{н}} h_{\text{н}}} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{н}}}{2h_{\text{н}}} \quad (6)$$

где  $h_{\text{н}}$  – высота насыпи, м;  $\alpha_{\text{ск}}$  – коэффициент звукопоглощения склона насыпи. Мощность звука на верхней части насыпи:

$$W_{\text{в}} = I_{\text{в}} l_{\text{н}} \lambda \beta_{\text{дифр}}^{\text{н}} \quad (7)$$

где  $\beta_{\text{дифр}}^{\text{н}}$  – коэффициент дифракции насыпи;  $\lambda$  – длина звуковой волны, м.

Интенсивность звука в правой верхней части насыпи:

$$I_{\text{в}} = \frac{W_{\text{в}}(1 - \alpha_{\text{в}})}{2\pi l_{\text{н}} b_{\text{н}}} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{н}}}{2b_{\text{н}}} \quad (8)$$

где:  $\alpha_{\text{в}}$  – коэффициент звукопоглощения поверхности верхней части насыпи;  $b_{\text{н}}$  – ширина верхней поверхности насыпи, м.

Мощность звука вторичного источника, излучающего звук в расчетную точку

$$W_{\text{пр}} = I_{\text{пр}} l_{\text{н}} \lambda \quad (9)$$

Интенсивность звука в расчетной точке (РТ):

$$I_{\text{РТ}} = \frac{W_{\text{пр}}}{\pi l_{\text{н}} R_2} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{н}}}{2R_2} \quad (10)$$

где  $R_2$  – расстояние от насыпи до РТ, м.

Подставим (4)–(9) в (10):

$$I_{\text{РТ}} = \frac{2W_{\text{ист}}(1 - \alpha_{\text{пов}})l_{\text{н}}1(1 - \alpha_{\text{ск}})l_{\text{н}}\lambda\beta_{\text{дифр}}^{\text{н}}(1 - \alpha_{\text{в}})l_{\text{н}}\lambda}{\pi l_{\text{ист}} R_1 \pi l_{\text{н}} h_{\text{н}} \pi l_{\text{н}} b_{\text{н}} \pi l_{\text{н}} R_2} \times \\ \times \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{ист}}}{2R_1} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{н}}}{2h_{\text{н}}} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{н}}}{2b_{\text{н}}} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{н}}}{2R_2}, \quad (11)$$

Подставим (2) и (11) в (1):

$$\Delta L_{\text{н}} = 10 \lg \frac{W_{\text{ист}} \pi l_{\text{ист}} R_1 \pi l_{\text{н}} h_{\text{н}} \pi l_{\text{н}} b_{\text{н}} \pi l_{\text{н}} R_2 \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{ист}}}{2R_1}}{\pi l_{\text{ист}} R l W_{\text{ист}} (1 - \alpha_{\text{пов}}) l_{\text{н}} (1 - \alpha_{\text{ск}})} \times \\ \times \frac{1}{l_{\text{н}} \lambda \beta_{\text{дифр}}^{\text{н}} (1 - \alpha_{\text{в}}) l_{\text{н}} \lambda \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{ист}}}{2R_1} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{н}}}{2h_{\text{н}}} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{н}}}{2b_{\text{н}}} \operatorname{arctg} \frac{l_{\text{н}}}{2R_2}} \quad (12)$$

Приняв  $l_{\text{нст}} = l_{\text{н}}$  и  $R_2 \gg R_1 + R_{\text{н}}$ , сделав сокращения и упрощения, прологарифмировав члены (11), получим акустическую эффективность насыпи:

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{н}} = & 10\lg \frac{R_1 R_2}{R R_0} + 10\lg \frac{h_{\text{н}}}{\lambda} + 10\lg \frac{b_{\text{н}}}{\lambda} - 10\lg(1 - \alpha_{\text{пов}}) - 10\lg(1 - \alpha_{\text{ск}}) - \\ & - 10\lg(1 - \alpha_{\text{в}}) - \text{ПД}_1 - \text{ПД}_2 - 10\lg \arctg \frac{l_{\text{н}}}{2h_{\text{н}}} - 10\lg \arctg \frac{l_{\text{н}}}{2R_1} - \\ & - 10\lg \arctg \frac{l_{\text{н}}}{2b_{\text{н}}} + 10\lg \frac{\pi^3}{2}, \text{ дБ} \end{aligned} \quad (13)$$

где  $\text{ПД}_{1,2}$  – показатели дифракции правой и левой частей насыпи,  $\text{ПД}_{\text{н}} = 10\lg \frac{1}{\beta_{\text{дифр}}^{\text{н}}}$ , дБ (по данным эксперимента  $\text{ПД}_1 = \text{ПД}_2$ );  $R_0 = 1$  м,  $10\lg \frac{\pi^3}{2} = 12$  дБ.

## 2. Верификация расчетного метода

Для того, чтобы оценить, насколько точные результаты могут быть получены при применении предлагаемого в работе расчетного метода, были проведены расчеты по формуле (13) для случая, представленного на рисунке 2, и сравнены с данными, полученными в ходе эксперимента. Результаты пошагового расчета показаны в таблице 1.

Таблица 1

Расчет акустической эффективности насыпи и сравнение с данными эксперимента

Исходные данные для расчета	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
$10\lg \frac{R_1 R_2}{R R_0}$	6	6	6	6	6	6	6	6	6
$10\lg \frac{h_{\text{н}}}{\lambda}$	-1,5	1,7	4,6	7,6	10,6	13,6	16,6	19,6	10,6
$10\lg \frac{b_{\text{н}}}{\lambda}$	-2,5	0,4	3,4	6,4	9,4	12,4	15,4	18,4	9,4
$\alpha_{\text{н}} = \alpha_{\text{пов}} = \alpha_{\text{ск}}$	0,1	0,1	0,15	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$-10\lg(1 - \alpha)$	0	0	1,5	3	3	3	3	3	3
$-(\text{ПД}_1 = \text{ПД}_2)$ - данные эксперимента	-6	-8	-10	-13	-15	-16	-19	-19	-14
$10\lg \arctg \frac{l_{\text{н}}}{2R_1}$	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
$10\lg \arctg \frac{l_{\text{н}}}{2h_{\text{н}}}$	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
$10\lg \arctg \frac{l_{\text{н}}}{2b_{\text{н}}}$	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
$10\lg \frac{\pi^3}{2}$	12	12	12	12	12	12	12	12	12
$\Delta L_{\text{н}}$ (расчет)	2	6	10,5	16	20	25	28	34	21
$\Delta L_{\text{н}}$ (эксперимент)	3	9	10	17	21	22	25	31	22

Для верификации данных расчета были выполнены экспериментальные исследования акустической эффективности насыпи. Схема расположения точек измерений показана на рисунке 2. Результаты измерений в расчетных точках 1-6, а также в точке 6 при отсутствии насыпи приведены в таблице 2 и на рисунке 3.

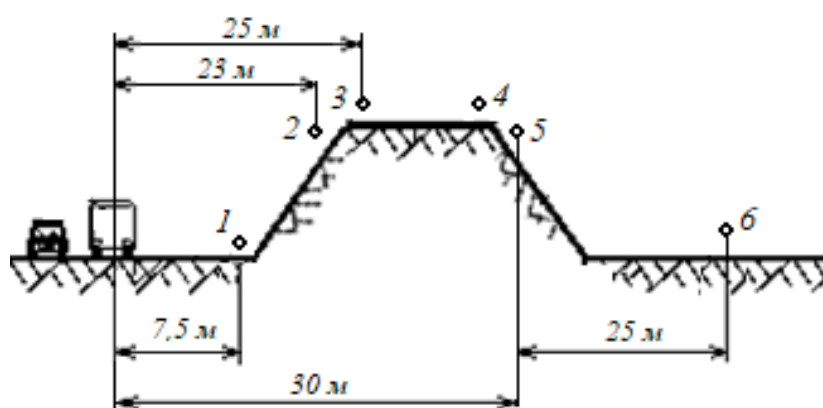


Рис. 2. Схема расположения точек измерений (1-6)

Таблица 2

Усредненные результаты измерений насыпи высотой 6 м

№ измерительной точки (рис. 2)	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	80	77	74	74	79	74	64	59	81
2	79	74	71	70	73	68	56	51	75
3	76	70	66	63	65	61	46	41	68
4	74	67	63	60	62	58	42	35	66
5	73	63	58	54	55	52	33	26	59
6	69	59	53	49	49	46	28	22	51
6 (без насыпи)	72	68	63	66	70	68	53	53	73
$\Delta L_n$ (эксперимент)	3	9	10	17	21	22	25	31	22

На рисунке 3 приведено сравнение расчетной величины эффективности шумозащитной выемки, полученное по формулам из нормативной документации [3], а также при помощи предлагаемого метода (13) и в результате замеров.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных для частотного диапазона 63-8000 Гц показало, что точность предложенной формулы составляет  $\pm 3$  дБ во всем диапазоне частот. При этом метод, представленный в ГОСТ 31295.2, завышает расчетные значения на 5-10 дБ в области низких и средних частот.

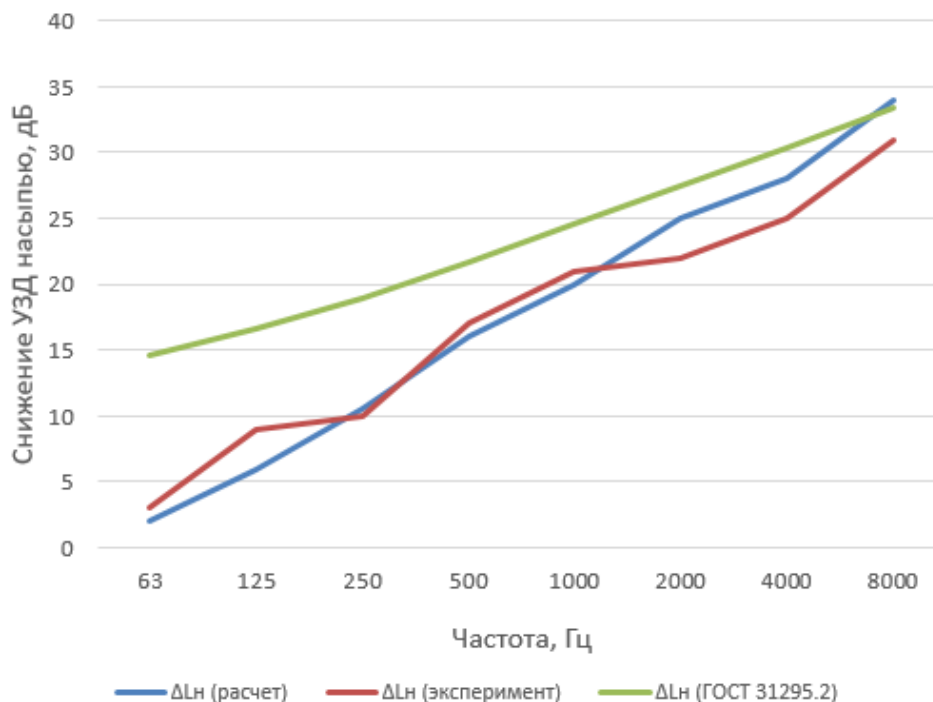


Рис. 3. Сравнение данных расчета и эксперимента

### Заклучение

Шумозащитные насыпи (земляные валы) – вторая по распространению конструкция барьерного типа после акустических экранов. Однако проблемы, связанные с проектированием шумозащитных насыпей, в особенности, с оценкой их акустической эффективности, ограничивают их применение в качестве шумозащиты.

В работе предложен новый инженерный метод оценки снижения шума за насыпью, основанный на методе последовательного преобразования звуковых полей, который учитывает дифракцию на обеих кромках насыпи, а также такие дополнительные параметры, как коэффициенты звукопоглощения ее склонов и подстилающей поверхности.

Для верификации данных расчета были выполнены экспериментальные исследования акустической эффективности насыпи. Сравнение расчетных и экспериментальных данных для частотного диапазона 63-8000 Гц показало, что точность предложенной формулы составляет  $\pm 3$  дБ во всем диапазоне частот. При этом метод, представленный в ГОСТ 31295.2, завышает расчетные значения на 5-10 дБ в области низких и средних частот.

### Список литературы

1. ОДМ 218.2.013-2011 Методические рекомендации по защите от транспортного шума территорий, прилегающих к автомобильным дорогам
2. Maekawa Z. Environmental and Architectural Acoustics / Z. Maekawa, J. H. Rindel, P. Lord / Spon Press. - Second edition. – 2011. – 371 p.
3. ГОСТ 33325-2015 (с изменениями). Методы расчета уровней внешнего шума, излучаемого железнодорожным транспортом.
4. ГОСТ 31295.2-2005 (ИСО 9613-2:1996). Межгосударственный стандарт. Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 2. Общий метод расчета

5. СП 276.1325800.2016. Свод правил. Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков // Принят: Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации 03.12.2016

6. Буторина М.В., Тюрина Н.В., Иванов Н.И., Санников В.А. Классификация автомобильных дорог по уровням шума. Noise theory and practice, Vol.6, No.4, с. 22-32.

7. Буторина М.В., Воронова А.А., Шабарова А.В. Выбор мероприятий для защиты от железнодорожного шума в городской и сельской застройке. Защита от повышенного шума и вибрации: сборник трудов конф. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, 26-28 апреля 2023 г., СПб/ Под ред. Н.И. Иванова. – СПб., 2023. С. 272-280

8. Иванов Н.И. Защита от шума и вибрации [Текст] : учебное пособие [для вузов] / Н. И. Иванов, А. Е. Шашурин. - 2-е изд., перераб. и доп. - СПб. : Печатный Цех, 2019. - 282 с. : граф., схемы, табл.

## References

1. ODM 218.2.013-2011 Guidelines for protecting areas adjacent to highways from traffic noise.

2. Maekawa Z. Environmental and Architectural Acoustics / Z. Maekawa, J. H. Rindel, P. Lord / Spon Press. - Second edition. – 2011. – 371 p.

3. GOST 33325-2015 (as amended). Noise. Calculation methods for external noise emitted by railway transport

4. GOST 31295.2-2005 (ISO 9613-2:1996). Noise. Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2. General method of calculation

5. SP 276.1325800.2016. Set of rules. Buildings and territories. Protection design rules from traffic noise // Adopted by: Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation 12/03/2016

6. Butorina M.V., Tyurina N.V., Ivanov N.I., Sannikov V.A. Classification of highways by noise levels. Noise theory and practice, Vol.6, No.4, p. 22-32.

7. Butorina M.V., Voronova A.A., Shabarova A.V. Selection of noise protection measures for urban and rural areas. Proceedings of All-Russian scientific-practical conf. with international participation “Protection from increased noise and vibration”, April 26-28, 2023, St.Petersburg / Ed. N.I. Ivanova. – St. Petersburg, 2023. pp. 272-280.

8. Ivanov N.I. Protection from noise and vibration [Text]: textbook [for universities] / N. I. Ivanov, A. E. Shashurin. - 2nd ed., revised. and additional - St. Petersburg. : Printing Shop, 2019. - 282 p.

УДК: 331.451  
OECD: 01.03.AA

## Расчет акустической эффективности выемки

Борцова С.С.<sup>1</sup>, Буторина М.В.<sup>2\*</sup>, Иванов Н.И.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ст. преподаватель <sup>2,3</sup> Д.т.н., профессор

<sup>1,2,3</sup> Кафедра «Экология и производственная безопасность», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

### Аннотация

В статье рассмотрена проблема оценки акустической эффективности выемок, применяемых как шумозащитное средство для снижения шума автомобильного и железнодорожного транспорта. Существующие методы расчета, отраженные в нормативной документации, позволяют получить значения эффективности, завышенные на 5-6 дБА по отношению к данным измерений. В работе предложен новый расчетный метод для оценки эффективности выемки, более точно учитывающий не только расположение источника шума, кромки выемки и расчетной точки, но также позволяющий учесть звукопоглощающие коэффициенты склонов выемки и подстилающей поверхности и геометрические параметры выемки. Анализ сравнения результатов расчетов, полученных по разным методикам, показывает, что предлагаемый метод позволяет получить величины акустической эффективности, приближенные к результатам измерений, не завышая расчетное снижение шума выемкой.

**Ключевые слова:** шумозащитная выемка, акустическая эффективность, расчетный метод, звукопоглощение, дифракция.

## *Calculation of acoustic efficiency of excavations*

*Bortsova S.S.<sup>1</sup>, Butorina M.V.<sup>2\*</sup>, Ivanov N.I.<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup> Senior Lecturer <sup>2,3</sup> DSc, Professor*

*<sup>1,2,3</sup> Department of Ecology and Industrial Safety, Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia*

### **Abstract**

*The article discusses the problem of assessing the acoustic efficiency of excavations used as a noise barrier to reduce acoustic pollution coming from road and rail transport. Existing calculation methods, presented in regulatory documentation, make it possible to obtain efficiency values that are overestimated by 5-6 dBA in relation to measurement data. The paper proposes a new calculation method for assessing the efficiency of excavation, which takes into account not only the location of the noise source, the edge of the excavation and the receiver, but also allows taking into account the sound absorption coefficients of the slopes of the excavation, the underlying surface and the geometric parameters of the excavation. An analysis of calculation results obtained using different methods shows that the proposed method helps to obtain acoustic efficiency values that are better correlated to the measurement results, without overestimating the calculated noise reduction by the excavation.*

**Keywords:** *noise protection excavation, acoustic efficiency, calculation method, noise absorption, diffraction.*

## Введение

Для снижения шума автомобильного и железнодорожного транспорта в жилой застройке применяются мероприятия, снижающие шум на пути его распространения. По пути распространения шум может быть уменьшен за счет увеличения расстояния, применения акустических экранов и других экранирующих сооружений, таких как выемки, насыпи, тоннели и т.п. Одним из наиболее эффективных шумозащитных мероприятий является расположение дороги в выемке, что позволяет значительно снизить шум [1].

Применение выемок позволяет значительно сократить размеры защитных зон (санитарных разрывов), устанавливаемых для транспортных источников шума. Так, согласно ранее действовавшего СП 42.13330-2011 жилую застройку следовало отделять от железных дорог санитарно-защитной зоной шириной не менее 100 м, но при размещении железных дорог в выемке это расстояние сокращалось вдвое. Аналогичные требования представлены в действующих «Правилах и нормах технической эксплуатации жилищного фонда»: расстояние от железной дороги до жилой застройки должно быть не менее 100-200 м (выбирается в соответствии с категорией железнодорожной линии), но при устройстве железнодорожной линии в выемке, оно сокращается до 50 м.

Выемки рекомендуется устраивать в пригородных зонах, там, где позволяют местные условия. Они являются более дешевым видом экранов по сравнению с экранами-стенками.

Требования к устройству выемок закреплены в ВСН 04-71 [2], согласно которым откосы выемок должны иметь уклон 1:2 или 1:1,5 и быть укреплены с помощью облицовки их бетонными или каменными плитами или дерном.

Специальные шумозащитные выемки (ШВ) рекомендуется устраивать при невозможности обеспечить снижения шума до нормативных значений в расчетной точке при проложении дороги в обычной выемке с пологими откосами. Расчет акустической эффективности шумозащитной выемки в составе проектной документации рекомендуется производить в соответствии с положениями ГОСТ 33325 [3] как для проложения железной дороги в выемке. Согласно ГОСТ 33325 расчет эффективности выемки производится в соответствии с положениями ГОСТ 31295.2 [4] как для экрана, дополнительно вносится поправка на крутизну склона (внутренний угол) величиной 1-6 дБА. С учетом того, что максимальная расчетная эффективность экрана достигает 25 дБА, с учетом поправки расчетная эффективность выемки может превышать значение в 30 дБА [5].

Исследованиями эффективности выемки занимались различные ученые, среди которых следует упомянуть работы Мининой Н.Н. [6], Куклина Д.А. [7], в соответствии с их исследованиями реальная эффективность выемок не превышает величины 15-20 дБА, что значительно ниже расчетной величины. Поэтому необходим новый более точный метод расчета эффективности шумозащитной выемки.

## 1. Существующие методы оценки эффективности выемки

Обычно оценку эффективности шумозащитной выемки производят при помощи метода Маекавы, основанного на теории линейной акустики [8]. Он первым предложил производить оценку эффективности экранирующего сооружения на основании числа Френеля, а для широких экранов (насыпей, выемок, зданий) — дополнительно учитывать их ширину. Его методы положены в основу существующих инженерных методов, реализованных в [3, 4].

Согласно теории Маекавы эффективность шумозащитной выемки ( $\Delta L^B$ , дБА) может быть описана как:



$$\Delta L^B = 9,4 \cdot \lg(2 + 50 \cdot \delta) \quad (1)$$

где  $\delta$  – разность путей хода звукового луча – параметр, учитывающий расположение ШВ относительно ИШ и РТ:

$$\delta = a + b - c \quad (2)$$

где  $a$  – расстояние от источника шума до дифракционной кромки, м;  $b$  – расстояние от дифракционной кромки до РТ, м;  $c$  – расстояние от ИШ до РТ, м (расстояния указаны рис. 1).

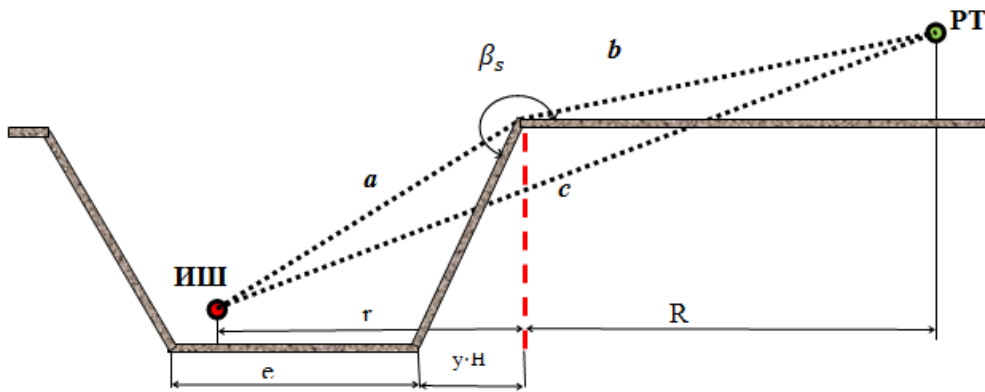


Рис. 1. Схема для определения эффективности ШВ

В соответствии с действующими инженерными методами расчета выемка имеет эффективность мнимого экрана, условно вписанного под бровку откоса ШВ, той же высоты, дополненную влиянием склона – коэффициент  $K_{\text{скл}}$ . Воплощение данного положения в нормативной документации несколько различается, так, расчётная формула по ГОСТ 33325 [3] может быть представлена в виде:

$$\Delta L^B = 10 \cdot \lg(3 + 58,8 \cdot \delta \cdot K_{\text{мет}}) + K_{\text{скл}} \quad (3)$$

Согласно СП 276.1325800.2016 [9]:

$$\Delta L^B = 18,2 + 7,8 \cdot \lg(\delta + 0,02) + K_{\text{скл}} \quad (4)$$

где  $\Delta L^B$  – эффективность ШВ, дБА;  $K_{\text{мет}}$  – коэффициент, учитывающий влияние метеорологических условий;  $\delta$  определяется по формуле (2).

$K_{\text{скл}}$  – коррекция на склон выемки. Он одинакова во всех документах и составляет от 1 до 6 дБА независимо от коэффициента звукопоглощения склона выемки и определяется только его внутренним углом.

Ширина нижней площадки выемки определяется категорией дороги, поэтому возможность изменять ее для увеличения эффективности выемки весьма ограничена. На снижение шума влияет уклон ШВ, который вместе с главным параметром – глубиной – учтен в формуле для  $\delta$  (2).

## 2. Разработка расчетного метода оценки эффективности выемки

Анализ действующих расчетных методов показывает их ограниченность с точки зрения учета всех влияющих на эффективность выемки параметров. Предлагаемый в данной работе метод позволяет более точно учесть расположение источника шума, кромки выемки и расчетной точки, звукопоглощающие коэффициенты склонов выемки и подстилающей поверхности, а также геометрические параметры выемки.

Акустическая эффективность шумозащитного сооружения определяется как:

$$\Delta L_{ш/з} = 10 \lg \frac{I_{РТ}^{бш/з}}{I_{РТ}^{сш/з}} \quad (5)$$

где  $I_{РТ}^{бш/з}$  – интенсивность звука без шумозащитной конструкции в расчетной точке (РТ), Вт/м<sup>2</sup>;

$I_{РТ}^{сш/з}$  – то же с установленной шумозащитной конструкцией в РТ, Вт/м<sup>2</sup>.

Определяем значение числителя в формуле (5), где обозначения даны на схеме (рис. 2) для линейного источника шума (ИШ).

$$I_{РТ}^{б/в} = \frac{W_{ист}}{2\pi l_{ист}(R_1 + b_в + R)} \arctg \frac{l_{ист}}{2(R_1 + b_в + R)}, \quad (6)$$

где  $W_{ист}$  – акустическая мощность источника шума, Вт;

$l_{ист}$  – длина источника шума (участка транспортного потока), условно принимаемая равной длине выемки, м;

$R_1, b_в, R$  – расстояния, указанные на рис. 2:  $b_в$  – ширина выемки, м;  $R_1$  – расстояние от ИШ до нижнего края выемки, м;  $R$  – расстояние от края выемки до РТ, м.

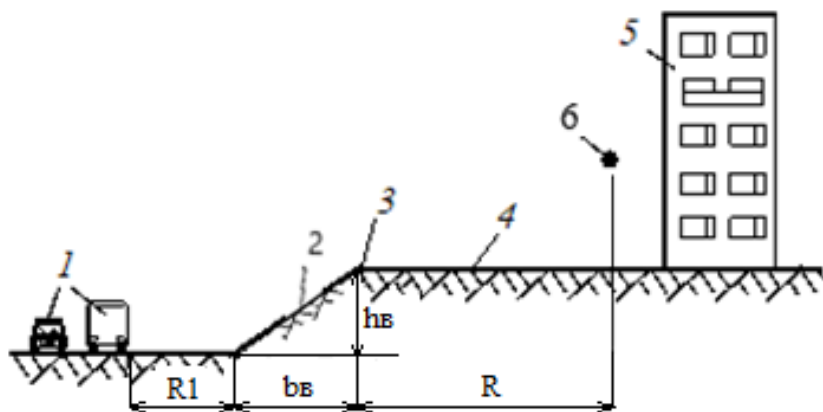


Рис. 2. Расчетная схема распространения звука за выемку: 1 – источники шума; 2 – склон выемки; 3 – край выемки; 4 – опорная поверхность; 5 – защищаемый от шума объект; 6 – расчетная точка

Выполним вывод знаменателя в формуле (5), используя метод преобразования звуковых полей [10].

Принятые допущения:

- звук проходит через верхнюю грань выемки;
- длина выемки условно принимается равной длине источника шума;
- источник шума линейный (транспортный поток);

- склон выемки, а также опорная поверхность, обладают определенными звукопоглощающими свойствами.

Тогда интенсивность звука, падающего на нижнюю часть выемки, определится как:

$$I_{\text{пад}} = \frac{W_{\text{ист}}(1 - \alpha_{\text{пов1}})}{2\pi l_{\text{ист}} R_1} \arctg \frac{l_{\text{ист}}}{2R_1}, \quad (7)$$

где  $W_{\text{ист}}$  – акустическая мощность источника шума (ИШ), Вт;  $\alpha_{\text{пов1}}$  – коэффициент звукопоглощения поверхности между ИШ и основанием выемки;  $l_{\text{ист}}$  – условная длина ИШ, принятая равной длине выемки, м;  $R_1$  – расстояние между ИШ и основанием выемки, м.

Акустическую мощность условного вторичного ИШ, расположенного в основании выемки, получаем, приняв его ширину условно равной 1 м:

$$W_{\text{осн}} = I_{\text{пад}} \cdot l_{\text{в}} \cdot 1, \quad (8)$$

где  $l_{\text{в}}$  – длина выемки, м.

Интенсивность звука на кромке выемки:

$$I_{\text{к}} = \frac{W_{\text{осн}}(1 - \alpha_{\text{в}})}{\pi \sqrt{h_{\text{в}}^2 + b_{\text{в}}^2} l_{\text{в}}} \arctg \frac{l_{\text{в}}}{2\sqrt{h_{\text{в}}^2 + b_{\text{в}}^2}}, \quad (9)$$

где  $h_{\text{в}}$  – высота выемки;  $b_{\text{в}}$  – расстояние от нижнего края (кромки) выемки до перпендикуляра, опущенного из верхнего края на основание, м;  $\alpha_{\text{в}}$  – коэффициент звукопоглощения склона выемки.

Мощность звука очередного вторичного источника, образовавшегося на краю (кромке) выемки равна:

$$W_{\text{в}} = I_{\text{к}} \cdot l_{\text{в}} \cdot \lambda \cdot \beta_{\text{дифр}}^{\text{в}}, \quad (10)$$

где  $\beta_{\text{дифр}}^{\text{в}}$  – коэффициент дифракции звука, огибающего край выемки (определяется по результатам измерений).

Интенсивность звука в расчетной точке (РТ) с учетом звукопоглощения поверхности между краем выемки и РТ ( $\alpha_{\text{пов2}}$ ):

$$I_{\text{РТ}} = \frac{W_{\text{в}}(1 - \alpha_{\text{пов2}})}{2\pi l_{\text{в}} R} \arctg \frac{l_{\text{в}}}{2R}, \quad (11)$$

где:  $\alpha_{\text{пов2}}$  – коэффициент звукопоглощения опорной поверхности;  $R$  – расстояние от края выемки до РТ, м.

Подставив (7)-(10) в (11), получим:

$$I_{\text{РТ}} = \frac{W_{\text{ист}}(1 - \alpha_{\text{пов1}}) l_{\text{в}} (1 - \alpha_{\text{в}}) l_{\text{в}} \lambda \cdot \beta_{\text{дифр}}^{\text{в}} (1 - \alpha_{\text{пов2}})}{2\pi l_{\text{ист}} R_1 \pi \sqrt{h_{\text{в}}^2 + b_{\text{в}}^2} 2\pi l_{\text{в}} R} \times \\ \times \arctg \frac{l_{\text{в}}}{2R} \arctg \frac{l_{\text{ист}}}{2R_1} \arctg \frac{l_{\text{в}}}{2\sqrt{h_{\text{в}}^2 + b_{\text{в}}^2}}, \quad (12)$$

Подставив (6) и (12) в (5) получим:

$$\Delta L_{\text{в}} = 10 \lg \frac{W_{\text{ист}} 2\pi l_{\text{ист}} R_1 \pi \sqrt{h_{\text{в}}^2 + b_{\text{в}}^2} 2\pi l_{\text{в}} R}{2\pi l_{\text{ист}} (R_1 + b_{\text{в}} + R) W_{\text{ист}} (1 - \alpha_{\text{пов2}}) l_{\text{в}} (1 - \alpha_{\text{в}}) l_{\text{в}} \beta_{\text{дифр}}^{\text{в}} (1 - \alpha_{\text{пов1}})} \times \\ \times \arctg \frac{\frac{l_{\text{ист}}}{2(R_1 + b_{\text{в}} + R)}}{\arctg \frac{l_{\text{в}}}{2R_1} \arctg \frac{l_{\text{в}}}{2\sqrt{h_{\text{в}}^2 + b_{\text{в}}^2}} \arctg \frac{l_{\text{в}}}{2R_1}} \quad (13)$$

После сокращений, перестановок и логарифмирования получим акустическую эффективность выемки (приняв допущение, что  $R \ll R_1 + b_b$ ):

$$\begin{aligned} \Delta L_b = & 10\lg \frac{R_1 R}{(R_1 + b_b + R) R_0} + 10\lg \sqrt{h_b^2 + b_b^2} - 10\lg(1 - \alpha_{пов1}) - 10\lg(1 - \alpha_b) - \\ & - 10\lg(1 - \alpha_{пов2}) + \text{ПД}_b - 10\lg \arctg \frac{l_{ист}}{2\sqrt{h_b^2 + b_b^2}} - 20\lg \arctg \frac{l_b}{2R_1} + \\ & + 10\lg \arctg \frac{l_{ист}}{2(R_1 + b_b + R)} + 10\lg 2\pi^2, \text{ дБ} \end{aligned} \quad (14)$$

где  $\text{ПД}_b$  – показатель дифракции выемки ( $\text{ПД}_b = 10\lg \frac{1}{\beta_{диф}^b}$ ),  $R_0 = 1$  м,  $10\lg 2\pi^2 = 13$  дБ.

### 3. Оценка точности предлагаемого расчетного метода

В исследовании [6] были произведены попытки экспериментально оценить зависимость эффективности ШВ ( $\Delta L_b$ , дБА) от её глубины ( $H^b$ , м). Полученные данные достаточно противоречивы, так, например, при глубине выемки в 10 м снижение шума за ней составило 15 дБА, а снижение шума выемкой в 9 м, полученное в аналогичных условиях – 20 дБА, что значительно превышает данные, полученные в ходе первой серии измерений. Тем не менее, результаты измерений свидетельствуют о том, что предельная эффективность шумозащитных выемок не превышает 20 дБА.

На рисунке 3 приведено сравнение расчетной величины эффективности шумозащитной выемки, полученное по формулам из нормативной документации (3) и (4), а также при помощи предлагаемого метода (14).

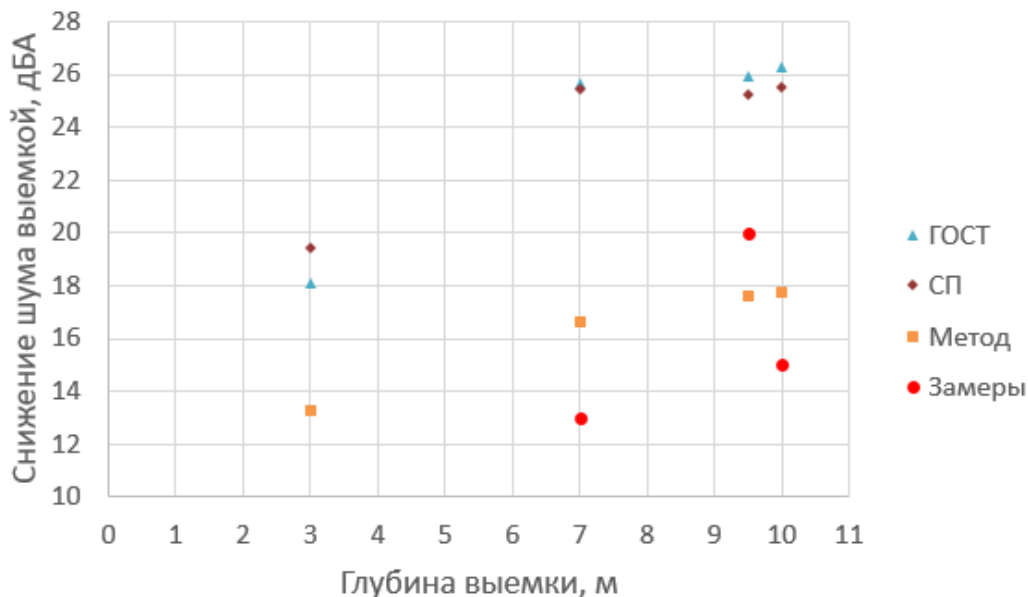


Рис. 3. Зависимость акустической эффективности выемки, дБА, от глубины, м

Результаты анализа полученных данных показывают, что данные, полученные при помощи предлагаемого расчетного метода показывают хорошую сходимость с данными, полученными при помощи нормативной документации, при этом он позволяет получить величины, которые лучше коррелируют с результатами измерений, не завышая расчетное снижение шума за выемкой.

Следует отметить, что для получения достоверных данных необходимо выполнить дополнительные эксперименты, устанавливающие связь эффективности выемки с её глубиной. Также необходимо уточнить величину показателя дифракции, т.к. нормативной методики для его определения нет, а имеющиеся результаты замеров вызывают определенные сомнения.

### **Заключение**

Одним из наиболее эффективных шумозащитных мероприятий является расположение дороги в выемке, что позволяет значительно снизить шум, а также сократить размеры санитарных разрывов, устанавливаемых для транспортных источников шума.

Сооружение выемок строго регламентировано нормативными документами. Расчёт акустической эффективности шумозащитной выемки в составе проектной документации рекомендуется производить в соответствии с положениями ГОСТ 33325 либо СП 276.1325800.2016. Результаты расчетов, произведенных при помощи данной нормативной документации, демонстрируют завышенные значения снижения шума выемкой (до 30 дБА), в то время как результаты измерений свидетельствуют о том, что предельная эффективность шумозащитных выемок не превышает 20 дБА.

На основании метода преобразования звуковых полей был разработан инженерный метод оценки снижения шума выемкой, который позволяет более точно учесть расположение источника шума, кромки выемки и расчетной точки, звукопоглощающие коэффициенты склонов выемки и подстилающей поверхности, а также геометрические параметры выемки.

Данные, полученные при помощи предлагаемого расчетного метода, показывают хорошую сходимость с данными, полученными при помощи нормативной документации, при этом он позволяет получить величины, более близкие к результатам измерений, не завышая расчетное снижение шума выемкой.

### **Список литературы**

1. Буторина М.В., Куклин Д.А. Классификация железнодорожных линий по уровням шума и шумозащитные мероприятия Путь и путевое хозяйство, 2019. №9. С. 15-19.
2. ВСН 04-71/Минэнерго СССР. Ведомственные строительные нормы. Указания по расчету устойчивости земляных откосов. Издание второе (утв. Главтехстройпроектком Минэнерго СССР 21.01.1971).
3. ГОСТ 33325-2015 (с изменениями). Методы расчета уровней внешнего шума, излучаемого железнодорожным транспортом.
4. ГОСТ 31295.2-2005 (ИСО 9613-2:1996). Межгосударственный стандарт. Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 2. Общий метод расчета
5. Шабарова А.В., Буторина М.В., Куклин Д.А. Сравнение методов расчета распространения шума железнодорожного транспорта в различных типах застройки Noise Theory and Practice. 2022; 3 (8): с. 16-33.
6. Минина, Н.Н. Проблема снижения акустического воздействия на жилую застройку при проектировании, строительстве и функционировании транспортных сооружений: диссертация докт. техн. наук: 01.04.06 / Минина Наталия Николаевна. - Санкт-Петербург, 2012. - 286 с.

7. Куклин Д.А. Снижение внешнего шума поездов в источнике и на пути распространения / Д. А. Куклин ; БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова. - СПб. : [б. и.], 2016. - 154 с. : граф., схемы, табл., фото. - Библиогр.: с. 150-152. - Список принят. сокращ.: с. 3. - ISBN 978-5-85546-953-0
8. Maekawa Z. Environmental and Architectural Acoustics / Z. Maekawa, J. H. Rindel, P. Lord / Spon Press. - Second edition. - 2011. - 371 p.
9. СП 276.1325800.2016. Свод правил. Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков // Принят: Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации 03.12.2016
10. Иванов Н.И. Защита от шума и вибрации [Текст] : учебное пособие [для вузов] / Н. И. Иванов, А. Е. Шашурин. - 2-е изд., перераб. и доп. - СПб. : Печатный Цех, 2019. - 282 с. : граф., схемы, табл.

## References

1. Butorina M.V., Kuklin D.A. Classification of railway lines by noise levels and noise protection measures. Put' i putevoye khozyaystvo, 2019. No. 9. pp. 15-19.
2. VSN 04-71/Ministry of Energy of the USSR. Department building standards. Instructions for calculating the stability of earthen slopes. Second edition (approved by Glavtekhstroyproekt of the USSR Ministry of Energy on January 21, 1971).
3. GOST 33325-2015 (as amended). Noise. Calculation methods for external noise emitted by railway transport
4. GOST 31295.2-2005 (ISO 9613-2:1996). Noise. Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2. General method of calculation
5. Shabarova A.V., Butorina M.V., Kuklin D.A. Comparison of methods for calculating the propagation of railway noise in various types of development. Noise Theory and Practice. 2022; 3 (8): p. 16-33.
6. Minina, N.N. The problem of reducing the acoustic impact on residential buildings during the design, construction and operation of transport structures: dissertation of Dr. tech. Sciences: 01.04.06 / Minina Natalia Nikolaevna. - St. Petersburg, 2012. - 286 p.
7. Kuklin D.A. Reducing external train noise at the source and along the propagation path / D. A. Kuklin; BSTU "VOENMEH" named after. D. F. Ustinova. - St. Petersburg. : [b. i.], 2016. - 154 p. : graphs, diagrams, tables, photos. - Bibliography: p. 150-152. - The list has been accepted. abbreviation: p. 3. - ISBN 978-5-85546-953-0
8. Maekawa Z. Environmental and Architectural Acoustics / Z. Maekawa, J. H. Rindel, P. Lord / Spon Press. -Second edition. - 2011. - 371 p.
9. SP 276.1325800.2016. Set of rules. Buildings and territories. Protection design rules from traffic noise // Adopted by: Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation 12/03/2016
10. Ivanov N.I. Protection from noise and vibration [Text]: textbook [for universities] / N. I. Ivanov, A. E. Shashurin. - 2nd ed., revised. and additional - St. Petersburg. : Printing Shop, 2019. - 282 p.

УДК: 534.833.534

OECD: 1.03.AA

## Численное исследование акустических процессов в модельных каналах для разработки авиационных звукопоглощающих конструкций на основе конического заполнителя

Писарев П.В.<sup>1</sup>, Ахунзянова К.А.<sup>2\*</sup><sup>1</sup> Доцент каф. МКМК, ПНИПУ, г. Пермь, РФ<sup>2</sup> М.н.с. каф. МКМК, ПНИПУ, г. Пермь, РФ

### Аннотация

Настоящая работа посвящена исследованию акустической эффективности ячеек звукопоглощающей конструкции конической формы в канале с потоком. В рамках выполненных исследований сформулирована физическая и математическая модель, описывающая акустические процессы в каналах, оснащенных звукопоглощающими конструкциями, учитывающая пограничный слой в районе резонаторов и диссипацию энергии при наличии потока. Проведено численное исследование акустической эффективности ячеек звукопоглощающих конструкций конической формы в модельном канале прямоугольного сечения при наличии потока. Выявлены основные механизмы снижения интенсивности акустической волны за счет взаимодействия с взаимно перевернутыми конусообразными ячейками. Установлено влияние потока на акустические характеристики рассматриваемых звукопоглощающих конструкций. Обнаружено, что звукопоглощающие конструкции на основе взаимно перевернутых конусов являются акустически эффективнее по сравнению с ЗПК с сотовыми ячейками.

**Ключевые слова:** звукопоглощающие конструкции, акустическая эффективность, резонансная частота, канал с потоком, конусообразные ячейки.

## *Numerical study of acoustic processes in model channels for the development of wideband aviation sound-absorbing structures based on conical filler*

Pisarev P.V.<sup>1</sup>, Akhunzianova K.A.<sup>2\*</sup><sup>1</sup> Associate Professor of the Department MCMC, PNRPU, Perm, Russia<sup>2</sup> Junior research assistant of the Department MCMC, PNRPU, Perm, Russia

### Abstract

The present work is devoted to the study of the acoustic efficiency of the cells of a conical sound-absorbing structure in a channel with a flow. The physical and mathematical model describing acoustic processes in channels equipped with sound-absorbing structures, taking into account the boundary layer in the area of resonators and the dissipation of energy in the presence of flow has been formulated. A numerical study of the acoustic efficiency of cells of sound-absorbing conical structures in a model channel of rectangular cross-section in the presence of flow was carried out. The main mechanisms of acoustic wave intensity reduction due to the interaction with the mutually-inverted conical cells are revealed. The influence of the flow on the acoustic characteristics of the analyzed sound-absorbing structures has been established. It has been found that sound-absorbing structures based on mutually inverted cones are acoustically more efficient compared to cellular-cell sound-absorbing structures.

---

\*E-mail: karina-maksimova0402@yandex.ru (Ахунзянова К.А.)

**Keywords:** *sound-absorbing structures, acoustic efficiency, resonant frequency, flow channel, cone-shaped cells.*

## Введение

Звукопоглощающие конструкции (ЗПК) используются для снижения шума авиационных силовых установок почти шесть десятилетий. Первые ЗПК представляли собой однослойную панель, которую настраивали на поглощение отдельных тонов (например, кратных частоте прохождения рабочей лопатки вентилятора). Традиционно резонансные ЗПК состоят из совокупностей сотовых ячеек – резонаторов Гельмгольца, расположенных по заданной схеме между силовой и перфорированной пластиной [1-7].

В настоящее время в авиационной промышленности используются двухконтурные турбореактивные двигатели (ТРДД), в связи с чем значительно увеличивается шум от различных источников, таких как шум вентилятора, турбины и камеры сгорания [8, 9]. Для снижения шума в ТРДД традиционно используют многослойные ЗПК (двух, трех и четырехслойные). Однако применение многослойных конструкций приводит к увеличению массы, себестоимости и снижению жесткости [6, 10]. Можно с уверенностью сказать, что в настоящий момент такие конструкции полностью исчерпали свой потенциал. Дальнейшее совершенствование эффективности создаваемых ЗПК требует решения новых научных задач и исследований в области аэроакустики.

Вместе с тем актуальность данных исследований обусловлена необходимостью повышения конкурентоспособности отечественной гражданской авиации на международном рынке. Нормы международной организации гражданской авиации ИКАО по шуму самолетов на местности неуклонно ужесточаются. С 2018 года для среднемагистральных самолетов весом до 55 т требования по уровню шума стали жестче на 7EPN dB, и этим нормам не соответствует большинство зарубежных и ни один эксплуатируемый ныне самолет российского производства.

Для решения проблемы требуется серьезная интенсификация усилий в разработке подходов и систем снижения авиационного шума [6, 7, 10-14]. Наиболее эффективным способом является применение в конструкции авиадвигателей ЗПК, настроенных таким образом, чтобы обеспечить максимальное ослабление звука при его распространении вдоль каналов двигателя и мотогондол в различных эксплуатационных условиях.

Создание новых звукопоглощающих конструкций (ЗПК) для перспективных двигателей является сложной задачей, требующей проектирования и разработки новых технологий изготовления таких конструкций. Этот процесс включает в себя несколько этапов, начиная с моделирования и расчета конструкции, и заканчивая выбором материалов и оптимальных технологических режимов изготовления ЗПК [15].

Одним из ключевых аспектов проектирования ЗПК является численное моделирование распространения акустической волны в свободном объеме канала. Численное моделирование позволяет оценить работу ЗПК и внести необходимые корректировки до изготовления. Однако необходимо отметить, что разработка ЗПК для новых перспективных двигателей является непрерывным процессом. С появлением новых материалов и технологий требуется усовершенствование конструкции и повышение ее акустической эффективности.

ЗПК широко используются во многих отраслях промышленности, включая авиационные двигатели, в качестве эффективных узкополосных шумоглушителей, особенно на низких частотах. Однако большинство исследований проведено без влияния набегающего потока, в то время как применяемые в авиационном двигателестроении



ЗПК подвергаются воздействию набегающего потока, который обладает нелинейными свойствами.

В связи с этим, разработка систем взаимодействующих резонансных ячеек, способных эффективно поглощать звук в широком диапазоне рабочих частот, является актуальной задачей в современной аэроакустике. В рамках настоящей работы проведены численные исследования по расчету акустической эффективности ячеек конической формы при наличии потока.

### 1. Численное моделирование акустических процессов в модельных каналах

Авторами данной работы были проведены исследования по оценке акустической эффективности единичных ячеек сотовых и конусообразных звукопоглощающих конструкций в интерферометре с нормальным падением звуковой волны при линейном и нелинейном режиме работы [16]. Выявлено влияние формы резонатора на его акустическую эффективность и резонансную частоту при одинаковом объеме. Определено, что коэффициент звукопоглощения конусообразного резонатора выше, чем у сотового резонатора на 9%.

Исходя из вышеперечисленных исследований, в качестве объектов настоящего исследования рассматривались звукопоглощающие конструкции на основе взаимно перевёрнутых конусообразных ячеек (рис. 1). Кроме этого, рассматривались единичная конусообразная и перевёрнутая конусообразная ячейки.

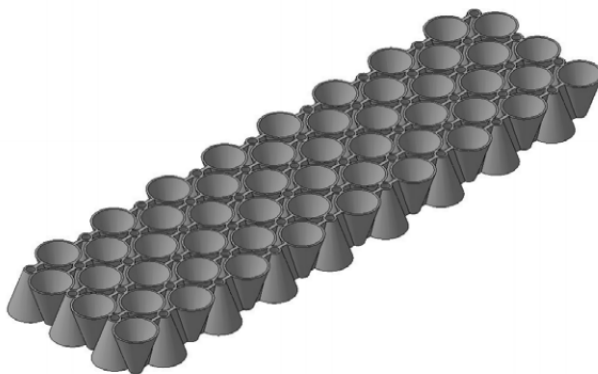


Рис. 1. Общий вид звукопоглощающей конструкции на основе взаимно перевёрнутых конусообразных ячеек

Резонаторы размещались по центру модельного канала прямоугольного сечения. Канал прямоугольного сечения имеет длину 400 мм и поперечное сечение 20x20 мм. Общий вид геометрической модели представлен на рисунке 2. На канале конечной длины прямоугольного сечения (1) по центру на одной из продольных граней расположены ячейки конусообразной формы (2), которые соединены с каналом «узким» горлом (3).

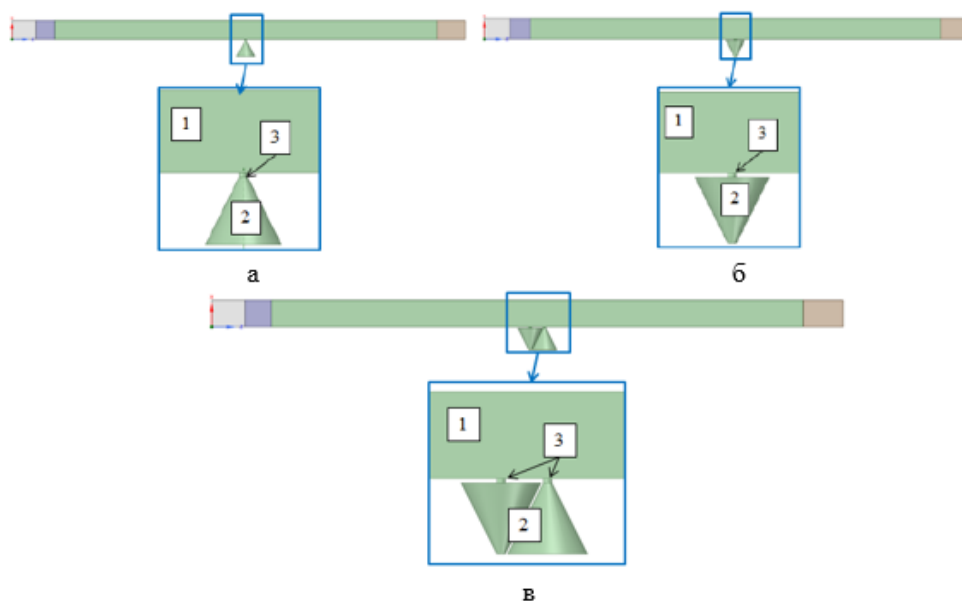


Рис. 2. Общий вид геометрической модели а) с конусообразной ячейкой, б) с перевернутой конусообразной ячейкой, в) с парой взаимно перевернутых конусов

Решение задачи по расчету акустической эффективности ячеек звукопоглощающей конструкции с ячейками конической формы осуществлялось в два этапа. На первом этапе решалась стационарная задача по расчету газодинамических характеристик вязкого, сжимаемого газа, движущегося по каналу прямоугольного сечения. Процессы рассматривались в трехмерной постановке, поток газа рассматривался однофазным. Считалось, что стенки канала и ЗПК адиабатические и не проницаемы. Численный расчет осуществлялся без учета гравитации. В качестве модели турбулентности принималась модель SST.

На втором этапе моделировалось распространение гармонической акустической волны в свободном объеме канала с потоком, с учетом потерь на трение и теплопроводность. Акустическая волна задавалась в виде фонового акустического поля. При решении акустической задачи использовались уравнения Навье-Стокса, линеаризованные в частотной области. По результатам численного моделирования производился расчет коэффициента потери акустического давления (TL) на выходе из модельного канала.

Разработанная численная модель распространения акустической волны в свободном объеме канала с потоком состоит из двух областей (рис. 3):

- 1) для области  $\Theta$  моделировалось распространение сжимаемого газа по свободному объему канала;
- 2) для области  $\Psi$  моделировалось распространение гармонической звуковой волны, задаваемой с поверхности, не отражающей границы.

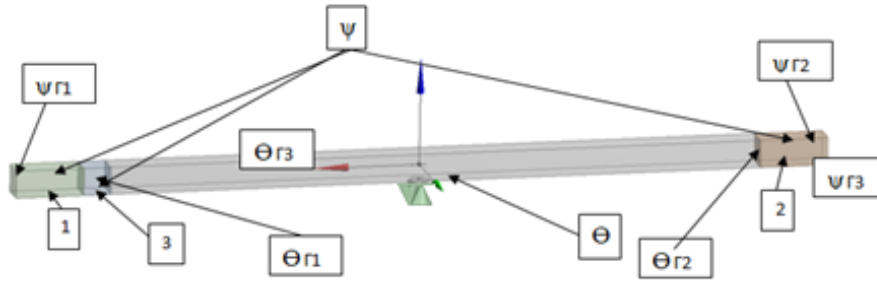


Рис. 3. Общий вид расчетной области канала, где: 1, 2 – идеально согласующий слой (PML) на входе и выходе; 3 – Background Acoustics Field

Расчетные подобласти (1, 2) (PML) представляют собой искусственные слои, добавляемые к вычислительной области моделирования, чтобы обеспечить поглощение входящих и исходящих волн, которые находятся вне основной области моделирования, что позволяет моделировать распространение волн с открытыми границами.

Для расчетной подобласти (3) (Background Acoustics Field) задавалась акустическая волна, как функция фона в конечном объеме, который граничит с идеально согласующим слоем (1) (PML). Благодаря такой компоновке, отраженные волны могут свободно покидать область  $\Theta$ , как по направлению распространения волны и потока, так и против направления.

Математическая модель основывается на законах сохранения массы, импульса и энергии, замкнутая уравнением состояния идеального сжимаемого газа и турбулентности, а также начальными и граничными условиями.

Расчетная сетка использовалась с ячейками, близкими к форме равностороннего тетраэдра, для получения эффективного и точного результата и снижения погрешностей. Максимальный размер элемента определялся как  $N_{max} = 343[m/s]/6[кГц]/10 = 0,0057$  м, минимальный размер элемента принимался  $N_{min} = 0,001$  м. Общее количество элементов составило 140 тысяч. Основными требованиями при измельчении сетки были: 1. Отсутствие резких отличий геометрических размеров соседних ячеек. Гарантия, что соседние ячейки имеют примерно одинаковый размер и форму, что важно для точных расчетов. 2. Линейные размеры соседних ячеек не отличаются более чем в 2 раза. Предотвращение ситуации, когда некоторые ячейки являются значительно крупнее или мельче остальных, что может привести к неточным результатам. 3. Коэффициент потери акустического давления (transmission loss) не изменяется при дальнейшем измельчении конечно-элементной сетки. Отслеживалось, чтобы при увеличении числа ячеек и уменьшении их размера, результаты численного эксперимента остаются стабильными и не меняются значительно.

Все эти требования были учтены при выборе и применении алгоритма измельчения сетки, чтобы обеспечить точность и сходимость численного эксперимента.

## 2. Анализ полученных результатов

По результатам вычислительных экспериментов были построены графики зависимости коэффициента потери акустического давления (TL) от частоты (рис. 4, 5, 8) при трех числах Маха ( $M = 0$ ,  $M = 0,01$  и  $M = 0,05$ ). Поля распределения акустического давления в продольном сечении модельного канала представлены на рисунках 6, 7, 9, 10.

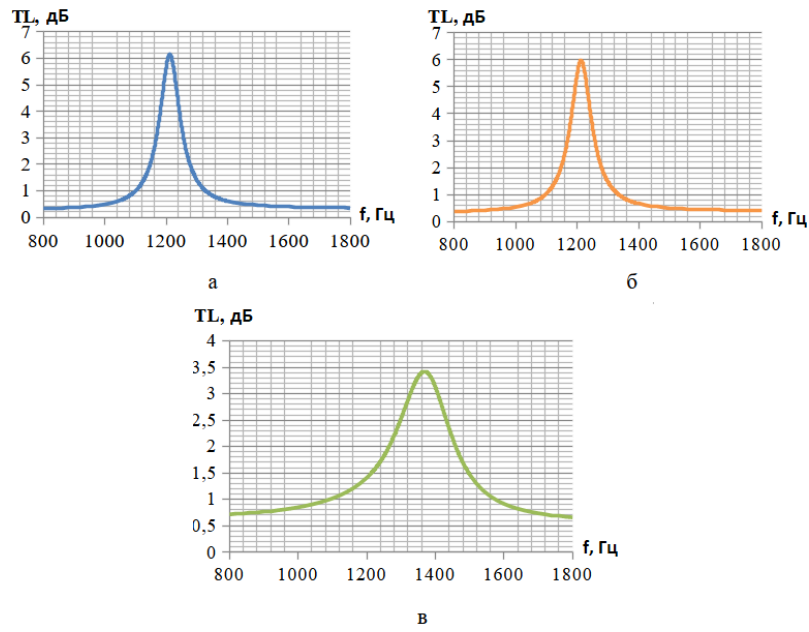


Рис. 4. Зависимости коэффициента потери акустического давления от частоты для конусообразной ячейки, где а)  $M = 0$ ; б)  $M = 0,01$ ; в)  $M = 0,05$

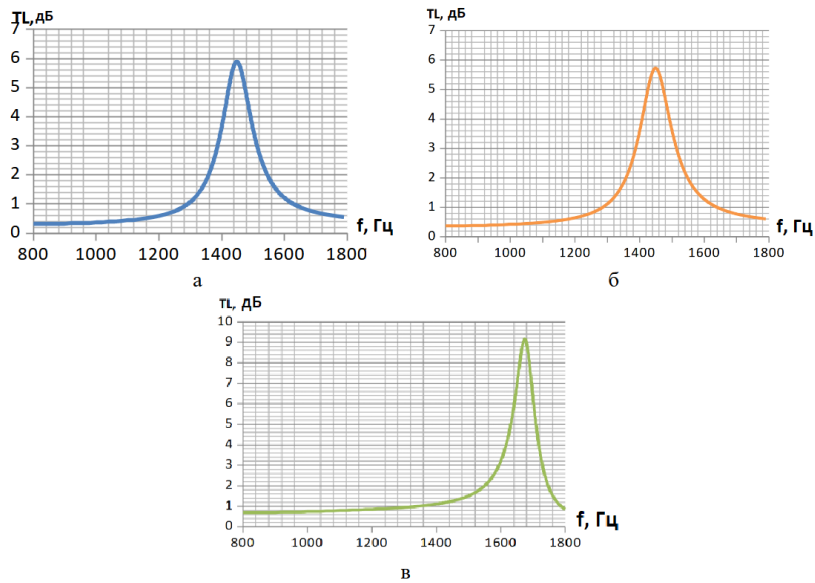


Рис. 5. Зависимости коэффициента потери акустического давления от частоты для перевернутой конусообразной ячейки, где а)  $M = 0$ ; б)  $M = 0,01$ ; в)  $M = 0,05$

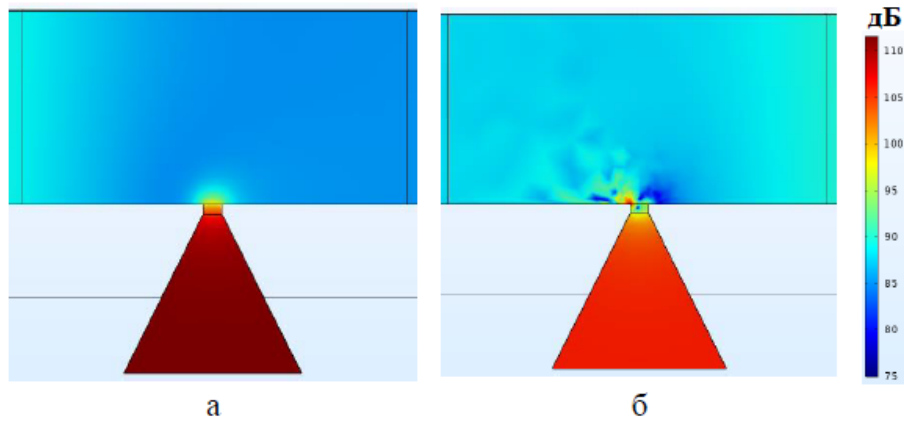


Рис. 6. Поле распределения акустического давления по продольному сечению модельного канала с конусообразной ячейкой при а)  $M = 0$  и  $M=0,01$  для резонансной частоты 1212 Гц и б)  $M=0,05$  для 1368 Гц

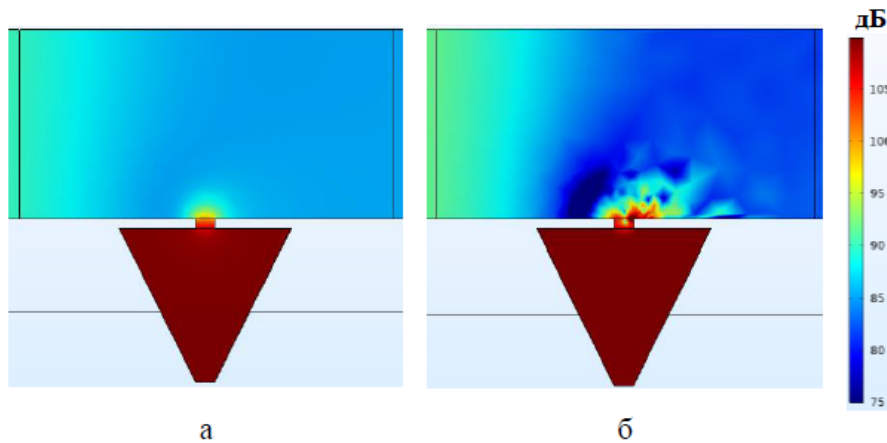


Рис. 7. Поле распределения акустического давления по продольному сечению модельного канала с обратной конусообразной ячейкой при а)  $M = 0$  и  $M=0,01$  для резонансной частоты 1448 Гц и б)  $M=0,05$  для 1674 Гц

Анализ зависимости коэффициента потери акустического давления (TL) от частоты для конусообразной ячейки выявил, что резонансная частота ячейки при  $M = 0$  (без потока) составляет 1212 Гц при  $TL = 6,14$  дБ. При увеличении числа Маха с 0 до 0,01 резонансная частота ячейки составляет 1213 Гц при  $TL = 5,96$  дБ. При скорости потока  $M = 0,05$  резонансная частота ячейки увеличивается на 155 Гц при уменьшении коэффициента потери акустического давления на  $TL = 2,42$  дБ.

Анализ зависимости коэффициента потери акустического давления (TL) от частоты для перевернутой конусообразной ячейки выявил, что резонансная частота ячейки при  $M = 0$  (без потока) составляет 1448 Гц при  $TL = 5,88$  дБ. При увеличении скорости потока с 0 до 0,01 Маха резонансная частота ячейки составляет 1449 Гц при  $TL = 5,72$  дБ. При скорости потока  $M = 0,05$  резонансная частота ячейки увеличивается на 225 Гц с увеличением коэффициента потери акустического давления на  $TL = 3,43$  дБ.

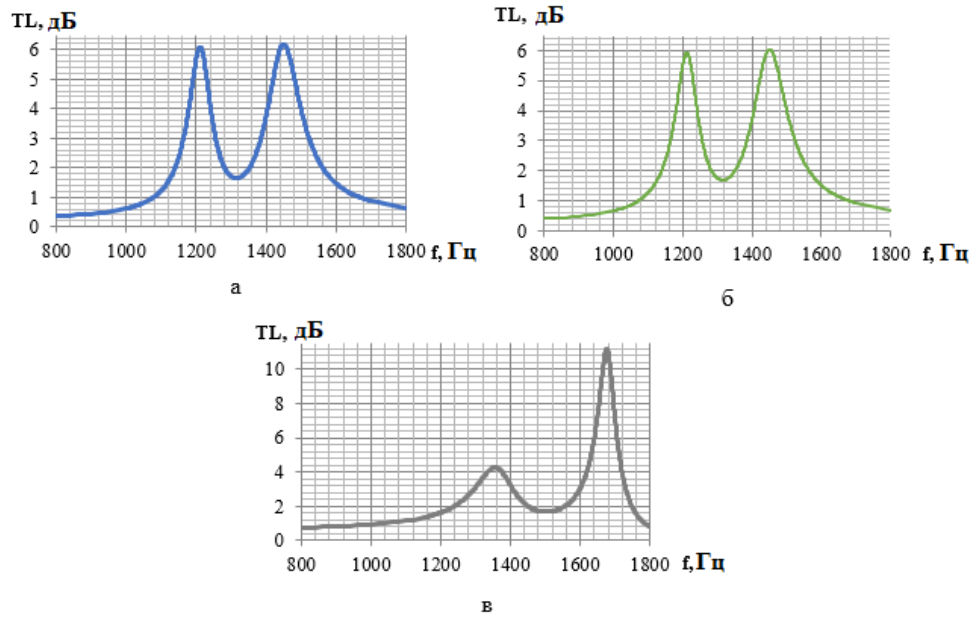


Рис. 8. Зависимости коэффициента потери акустического давления от частоты пары взаимно перевернутых ячеек, где а)  $M = 0$ ; б)  $M = 0,01$ ; в)  $M = 0,05$

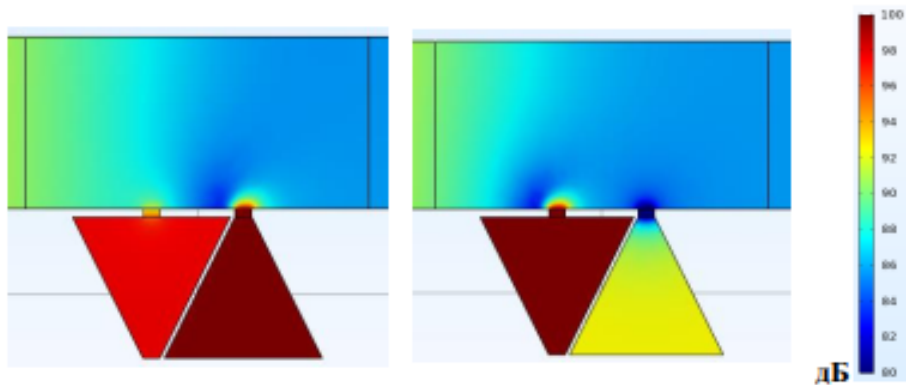


Рис. 9. Поле распределения акустического давления по продольному сечению модельного канала с взаимно перевернутыми конусами при  $M = 0$  и  $M = 0,01$  при резонансной частоте, где а) 1220 Гц, б) 1470 Гц

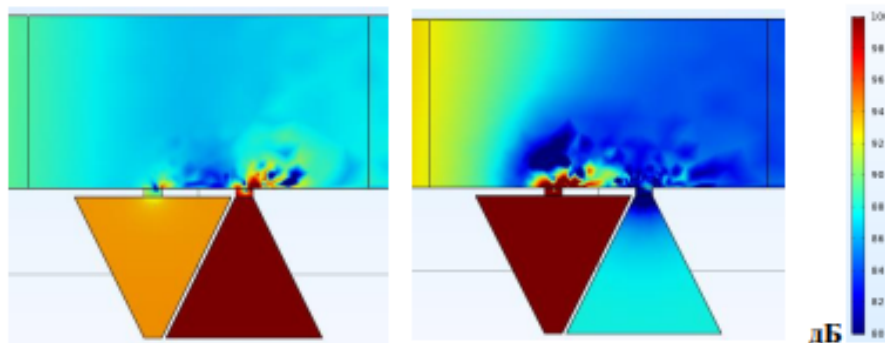


Рис. 10. Поле распределения акустического давления по продольному сечению модельного канала с взаимно перевернутыми конусами при  $M = 0,05$  при резонансной частоте, где а) 1220 Гц, б) 1470 Гц

Анализ полученных результатов показал, что при численном расчете ЗПК, состоящей из взаимно перевернутых конусов, наблюдается два пика, каждый из пиков соответствует резонансной частоте одной из ячеек (конус или перевернутый конус). Обнаружено, что для ЗПК на основе взаимно перевернутых конусов при увеличении числа Маха с 0 до 0,01 не наблюдается значительное изменение зависимости коэффициента потери акустического давления ( $TL$ ) от частоты. При увеличении числа Маха с 0,01 до 0,05 коэффициент падения акустического давления уменьшается на 1,8 дБ с увеличением резонансной частоты на 150 Гц на первой резонансной частоте (коническая ячейка), а для второй резонансной частоты (перевернутая коническая ячейка) происходит увеличение  $TL_{max}$  на 11,5 дБ с увеличением резонансной частоты на 240 Гц. Выявлено, что при совместной работе пары взаимно перевернутых ячеек повышается коэффициент потери акустического давления для перевернутой конусообразной ячейки (второй пик).

По результатам анализа распределения акустических волн по продольным сечениям резонатора было выявлено, что волны, входящие в канал, за счет двойных проходов меняют свою фазу и гасят излучающую. В этом случае происходит взаимодействие резонансной ячейки с основной волной канала, что приводит к образованию четкой граничной линии, направленной в сторону основного звукового потока. В результате такого взаимодействия происходит снижение акустического сопротивления набегающего потока. При наличии потока в районе горловины наблюдается рост акустической эффективности резонатора из-за изменения частоты набегающей волны в пограничном слое.

Проведено сравнение коэффициента потери акустического давления пары взаимно перевернутых конусообразных ячеек и пары сотовых ячеек. На рисунке 9 представлен график зависимости коэффициента потери акустического давления от частоты для пары сотовых ячеек.

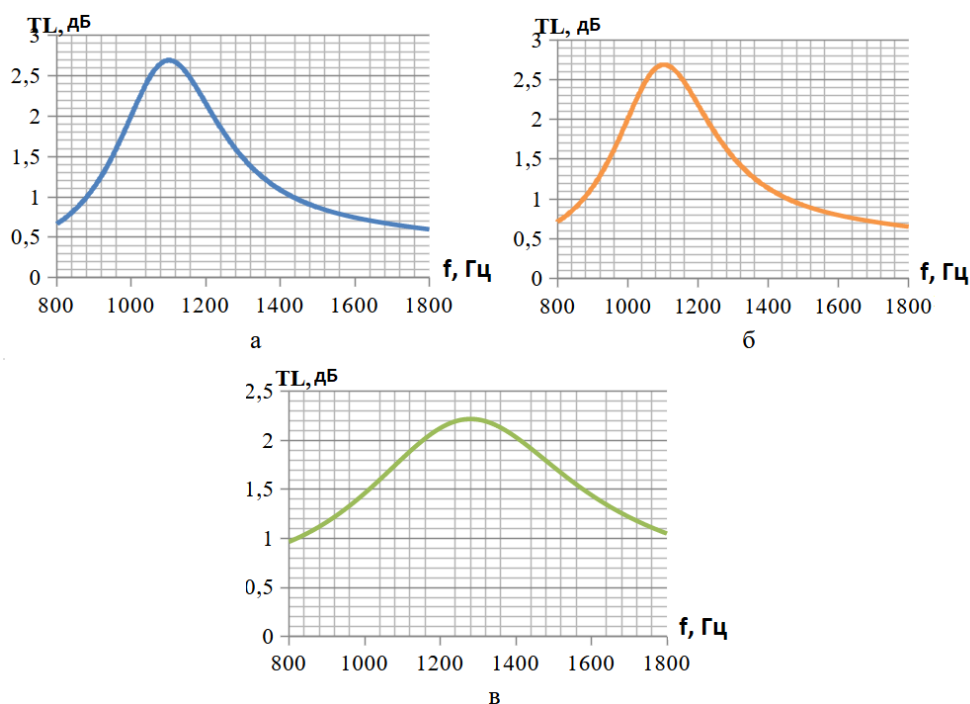


Рис. 11. Зависимости коэффициента потери акустического давления (TL) от частоты для пары сотовых ячеек: а)  $M = 0$ ; б)  $M = 0,01$ ; в)  $M = 0,05$

Анализ зависимости коэффициента потери акустического давления (TL) от частоты для двух сотовых ячеек выявил, что совместная резонансная частота ячеек при  $M = 0$  (без потока) составляет 1102 Гц при  $TL = 2,69$  дБ. При увеличении скорости потока с 0 до 0,01 Маха совместная резонансная частота ячеек остается неизменной 1103 Гц при  $TL = 2,68$  дБ. При скорости потока  $M = 0,05$  совместная резонансная частота ячеек увеличивается на 1770 Гц при уменьшении коэффициента потери акустического давления на  $TL = 0,47$  дБ.

Выявлено, что звукопоглощающие конструкции на основе взаимно перевернутых конусов являются акустически эффективнее по сравнению с ЗПК с сотовыми ячейками.

### Заключение

В рамках выполненных исследований сформулирована физическая и математическая модель по расчету эффективных акустических характеристик ячеек ЗПК (резонаторов Гельмгольца) на основе взаимно перевернутых конусов, учитывающих пограничный слой в районе резонаторов и диссипацию энергии при наличии потока.

По результатам проведенных вычислительных экспериментов выявлены основные механизмы снижения интенсивности акустической волны за счет взаимодействия с взаимно перевернутыми конусообразными резонаторами.

Обнаружено, что при увеличении скорости потока с  $M = 0,01$  до  $M = 0,05$  наблюдается изменение зависимости коэффициента потери акустического давления (TL) от частоты. На первой резонансной частоте при увеличении числа Маха с 0,01 до 0,05 коэффициента потери акустического давления уменьшается на 33% с увеличением резонансной частоты на 13%. На второй резонансной частоте при увеличении числа Маха с 0,01 до 0,05 коэффициента потери акустического давления увеличивается на 45% с увеличением резонансной частоты на 13%.



На следующем этапе работы планируется провести исследования влияния больших скоростей потока, применительных к авиационным конструкциям.

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при поддержке государственного задания (проект No. FSNM-2023-0006).

### Список литературы

1. Jones M.G., Howerton B. M., Ayle E. Evaluation of parallel-element, variable-impedance, broadband acoustic liner concepts // AIAA Paper. – 2012. - 2012-2194.
2. Nark D.M., Jones M. G., Sutliff D. L. Further Development and Assessment of a Broadband Liner Optimization Process // AIAA Paper. – 2016. - 2016-2784.
3. Jones M.G., Watson W.R., Nark D.M., Howerton B.M. Evaluation of a Variable-Impedance Ceramic Matrix Composite Acoustic Liner // AIAA Paper. – 2014. - 2014-3352.
4. Dannemann M, Kucher M, Kunze E, Modler N, Knobloch K, Enghardt L, Sarradj E, Höschler K. Experimental study of advanced Helmholtz resonator liners with increased acoustic performance by utilising material damping effects. Appl Sci 2018;8:1923–4.
5. Xu M, Selamet A, Kim H. Dual Helmholtz resonator. Appl Acoust 2010;71:822–9.
6. Захаров А.Г., Аношкин А.Н., Паньков А.А., Писарев П.В. Акустические резонансные характеристики двух и трехслойных сотовых звукопоглощающих панелей // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2016. – № 46. – С. 144-159.
7. Соболев А.Ф., Ушаков В.Г., Филиппова Р.Д. Звукопоглощающие конструкции гомогенного типа для каналов авиационных двигателей // Акустический журнал. – 2009. – №6 (55). – С. 749-759.
8. Евстигнеев А.А., Ланшин А.И., Почкин Я.С., Солонин В.И., Халецкий Ю.Д. Проблема шума перспективных ТРДД для дальнемагистральных самолетов // Авиационные двигатели. – 2022. – № 2(15). – С. 27-40.
9. Цыплухина Ю.В., Манченко Е.В. Воздействие авиационного шума на здоровье населения // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2016. – № 1-1(7). – С. 356-360.
10. Соболев А.Ф. Полуэмпирическая теория однослойных сотовых звукопоглощающих конструкций с лицевой перфорированной панелью // Акустический журнал. – 2007. – № 6(53). – С. 861-872.
11. Аношкин А.Н., Захаров А.Г., Городкова Н.А., Чурсин В.А. Расчетно-экспериментальные исследования резонансных многослойных звукопоглощающих конструкций // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2015. - №1. – С. 5-20.
12. Писарев П.В., Аношкин А.Н., Ахунзянова К.А. Исследование взаимовлияния ячеек разных форм на нелинейных режимах работы // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2020. - № 60. – С. 72-79.
13. Selamet A., Lee I. Helmholtz resonator with extended neck // J. Acoust. Soc. Am. – 2003. – № 113(4). – pp. 1975-1985.
14. Liu F., Horowitz F.S., Nishida T., Cattafesta L., Sheplak M. A multiple degree of freedom electromechanical Helmholtz resonator // J. Acoust. Soc. Am. – 2007. – № 122(1). – pp. 291-301.
15. Шульдешов Е.М., Краев И.Д., Образцова Е.П. Материалы для звукопоглощающих конструкций авиационных двигателей (обзор) // Труды ВИАМ. – 2021. - №7(101). – С. 59-72.
16. Pisarev P.V., Akhunzianova K.A. Influence of the shape of the sound-absorbing construction cells on their acoustic efficiency in the linear and nonlinear operation modes //

AIP Conference Proceedings : 28th Russian Conference on Mathematical Modelling in Natural Sciences, RuMoNaS 2019, Perm, 02–05 октября 2019 года. Vol. 2216. – Perm: American Institute of Physics Inc., 2020. – P. 050006. – DOI 10.1063/5.0004084.

## References

1. Jones M.G., Howerton B. M., Ayle E. Evaluation of parallel-element, variable-impedance, broadband acoustic liner concepts // AIAA Paper. – 2012. - 2012-2194.
2. Nark D.M., Jones M. G., Sutliff D. L. Further Development and Assessment of a Broadband Liner Optimization Process // AIAA Paper. – 2016. - 2016-2784.
3. Jones M.G., Watson W.R., Nark D.M., Howerton B.M. Evaluation of a Variable-Impedance Ceramic Matrix Composite Acoustic Liner // AIAA Paper. – 2014. - 2014-3352.
4. Dannemann M, Kucher M, Kunze E, Modler N, Knobloch K, Enghardt L, Sarradj E, Höschler K. Experimental study of advanced Helmholtz resonator liners with increased acoustic performance by utilising material damping effects. Appl Sci 2018;8:1923–4.
5. Xu M, Selamat A, Kim H. Dual Helmholtz resonator. Appl Acoust 2010;71:822–9.
6. Zakharov A.G., Anoshkin A.N., Pan'kov A.A., Pisarev P.V. Acoustic resonant characteristics of two - and three-layered cellular sound absorbing panels // PNRPU Aerospace Engineering Bulletin. – 2016. – № 46. – pp. 144-158.
7. Sobolev A.F., Ushakov V.G., Filipova R.D. Homogeneous sound-absorbing structures for aircraft engine ducts // Acoust. Phys. 2009. – № 6(55). – pp. 749-759.
8. Evstigneev A.A., Lanshin A.I., Pochkin YA.S., Solonin V.I., Haleckij YU.D. Problema shuma perspektivnyh TRDD dlya dal'nemagistral'nyh samoletov / // Aviacionnye dvigateli. – 2022. – № 2(15). – p. 27-40.
9. Cypluhina YU.V., Manchenko E.V. Vozdejstvie aviacionnogo shuma na zdorov'e naseleniya // Sovremennye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoj oborony i likvidacii posledstvij chrezvychajnyh situacij. – 2016. – № 1-1(7). – p. 356-360.
10. Sobolev A.F. A semiempirical theory of a one-layer cellular sound-absorbing lining with a perforated face panel // Acoust. Journal. – 2007. - № 6(53). – pp. 762-771.
11. Anoshkin A.N., Zakharov A.G., Gorodkova N.A., Chursin V.A. Computational and experimental studies of resonance sound-absorbing multilayer structures // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2015. – № 1. – pp. 5-20.
12. Pisarev P.V., Anoshkin A.N., Akhuzianova K.A. Research of the different shapes cells mutual influence in non-linear operating modes // Vestnik PNRPU. Aerocosmicheskaya tehnika. – 2020. – № 60. – pp. 72-79.
13. Selamat A., Lee I. Helmholtz resonator with extended neck // J. Acoust. Soc. Am. – 2003. – № 113(4). – pp. 1975-1985.
14. Liu F., Horowitz F.S., Nishida T., Cattafesta L., Sheplak M. A multiple degree of freedom electromechanical Helmholtz resonator // J. Acoust. Soc. Am. – 2007. – № 122(1). – pp. 291-301.
15. Shuldeshov E.M., Kraev I.D., Obratsova E.P. Materials for sound-proof designs of aircraft engines (review) // Trudy VIAM. - 2021. - №7(101). – pp. 59-72.
16. Pisarev P.V., Akhuzianova K.A. Influence of the shape of the sound-absorbing construction cells on their acoustic efficiency in the linear and nonlinear operation modes // AIP Conference Proceedings : 28th Russian Conference on Mathematical Modelling in Natural Sciences, RuMoNaS 2019, Perm, 02–05 октября 2019 года. Vol. 2216. – Perm: American Institute of Physics Inc., 2020. – P. 050006. – DOI 10.1063/5.0004084.

УДК: 534.6  
OECD: 01.03.AA

## Возможность применения метода измерения промышленных предприятий с множественными источниками шума в условиях плотной застройки промышленными предприятиями

Югай Л.А.

Аспирант 3 курса СПбГТИ(ТУ), г. Санкт-Петербург, РФ

### Аннотация

Данная работа посвящена измерению промышленного шума и оценке вклада крупного промышленного предприятия в шумовую обстановку селитебной территории. Метод измерения шума основан на ГОСТ 31297-2005 и использует анализатор шума и вибрации «ЭКОФИЗИКА-110А» и калибратор акустический АК-1000. Измерения проводятся на двух производственных территориях, одна из которых находится в отдалении от значимых производственных источников шума, а другая – в глубине производственной территории. Результаты измерений показывают, что метод определения звуковой мощности предприятия как единого источника корректен, если предприятие находится в отдалении от зоны акустического воздействия сторонних источников шума. В случае высокого уровня фонового шума данный метод использовать не корректно, и необходимо провести дальнейшее изучение данной проблематики.

**Ключевые слова:** измерение УЗД, источники промышленного шума, фоновый шум, производственный шум, метод измерения производственного шума.

### *The possibility of using the measurement method of industrial enterprises with multiple noise sources in conditions of dense construction by industrial enterprises*

Yugay L.A.

3rd year postgraduate student of SPbGTI(TU), St. Petersburg, Russia

### Abstract

This work is devoted to measuring industrial noise and assessing the contribution of a large industrial enterprise to the noise environment of a residential area. The noise measurement method is based on GOST 31297-2005 and uses an 'ECOPHYSICS-110A' noise and vibration analyzer and an AK-1000 acoustic calibrator. Measurements are carried out in two production areas, one of which is located at a distance from significant production noise sources, and the other is in the depths of the production area. The measurement results show that the method of determining the sound power of an enterprise as a single source is correct if the enterprise is located at a distance from the zone of acoustic impact of third-party noise sources. In the case of a high level of background noise, this method is not used correctly, and it is necessary to conduct further study of this problem.

**Keywords:** measurement of UZD, sources of industrial noise, background noise, industrial noise, method of measuring industrial noise.

## Введение

Технический прогресс демонстрирует устойчивую тенденцию к непрерывному росту производительности и эффективности промышленного оборудования, параллельно улучшая его характеристики. Это достигается посредством усовершенствования отдельных элементов оборудования, оптимизации скоростных и силовых параметров рабочих механизмов, что, однако, может приводить к увеличению уровня динамических нагрузок, и, как следствие, к повышению интенсивности звукоизлучения в широком спектре частот [1-3].

В результате, производственные условия становятся более неблагоприятными по шумовому фактору, что требует применения эффективных мер по борьбе с производственным шумом. Это подчеркивает актуальность проблемы борьбы с шумом, которая постоянно требует нахождения новых решений [1,4].

С развитием технологий и ростом осведомленности о вреде шума, все большее значение приобретает контроль уровня шума, создаваемого промышленным оборудованием. Одним из ключевых аспектов в этом процессе является применение адекватных и точных методов измерения шума. Наиболее широко используемым подходом для оценки непостоянного индустриального шума в настоящее время является интегральный метод измерения эквивалентного уровня шума в дБ(А). В настоящее время, оценка шума на производстве обычно включает в себя проведение измерений с использованием шумомера в соответствии со стандартным протоколом. После проведения серии измерений, оператор выполняет необходимые вычисления, анализирует полученные данные о шуме и выносит заключение о приемлемости текущего уровня шума [1,5].

### 1. Комплексный подход к оценке шумового загрязнения

Наиболее эффективный способ оценки уровня шума в городе - это проведение фактических измерений на местности. Прежде чем начать измерения, необходимо определить, где, когда и при каких условиях они будут проводиться. Выбор места для измерения является ключевым фактором в любом исследовании шума. Обычно выбирают перекрестки, где наблюдается наибольшее скопление транспорта и людей. Иногда город делят на квадраты, и измерения проводят в точках пересечения этих квадратов [1, 6-8]. Выбор места измерений определяется целями исследования. Условия и время измерений зависят от того, насколько интенсивно источники шума влияют на окружающую среду. Это может зависеть от времени года, времени суток, погодных условий, производственных процессов и других факторов. Если нужно измерить шум от промышленного предприятия, расположенного среди других промышленных объектов, необходимо исключить все посторонние источники шума, которые могут повлиять на результаты измерений.

В рамках этого исследования был использован ГОСТ 31297-2005, чтобы определить разницу в уровне звуковой мощности между предприятием, которое находится в условиях фонового шума, и предприятием, которое расположено отдельно от других источников шума. Главная цель проверки этого метода – выявление возможности использования его как метода определения УЗД на территориях внутри промышленных предприятий [1, 5, 9]

Цель данной работы: проведение измерений шума с последующей обработкой данных в специализированной программе с целью определения звуковой мощности предприятий как единого источника шума в различных условиях.

## 2. Методология расчетного анализа

Для проведения измерений использовался анализатор шума и вибрации «ЭКОФИЗИКА-110А» и калибратор акустический АК-1000.

В основу метода измерения УЗД был взят ГОСТ 31297-2005. В рамках метода были выбраны 2 производственные территории. Первая территория находится в отдалении от значимых производственных источников шума. Вторая находится в глубине производственной территории.

Согласно данному методу, существует возможность оценки всех источников предприятия как единый источник шума, для этого необходимо провести натурные замеры по периметру предприятия согласно представленной схеме в ГОСТ 31297-2005 и далее на основании полученных натуральных значений УЗД получить звуковую мощность предприятия как единого источника. Для проверки возможности использования данного метода были отобраны производственные территории с известными источниками производственного шума. Одна территория находится в окружении производственных зданий, которые создают фоновый шум. Вторая территория была выбрана вне воздействия сторонних источников звукового воздействия [10-12].

В рамках сравнения был проведен расчет звукового давления в расчетных точках заранее определенных по ГОСТу 31297-2005. Расчет проводили на основании уровня звукового давления в расчетных точках от шумящего промышленного оборудования на площадках и от натуральных протоколов замеров по контуру объектов.

### 2.1. Расчет УЗМ предприятия по оборудованию

На территории площадки № 1 известные следующие ИШ: вентилятор ГОУ – 2 шт., валковая дробилка 400\*500 мм, смеситель – 8 шт., дозатор – 11 шт.

На территории площадки № 2 известные следующие ИШ: мельница классификатор ТРИБОКИНЕТИКА – 4 шт., фильтр рукавный, вентилятор ПТУ-4, грохот АГХ – 6 шт., грохот МТС, измельчитель прессвалковый 600\*200 мм, вентилятор ПТУ-1, фильтр рукавный ПТУ-1, фильтр рукавный ПТУ-3, вентилятор ПТУ-3, дробилка ударная В 5100 SE, грохот Минокс. Характеристика источников шума представлена в таблице 1.

Таблица 1

Шумовые характеристики источников шума на площадках №1 и №2

№ источника шума	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах, со среднегеометрическими частотами, Гц									Наименование источника шума
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
<b>Площадка № 1</b>										
ИШ-1	88	87	78	77	76	76	72	68	62	Вентилятор ГОУ №14210982
ИШ-2	90	90	86	84	81	77	77	76	88	Вентилятор ГОУ №14212561
ИШ-3	88	88	86	82	83	76	77	69	68	Валковая дробилка. 400*500 мм №14208920
ИШ-4	87	86	86	82	79	76	72	69	68	Смеситель №14209126
ИШ-5	87	86	86	83	83	76	73	69	67	Смеситель №14200989
ИШ-6	87	86	84	83	78	76	73	69	66	Смеситель №14200137
ИШ-7	89	87	88	83	78	77	73	72	67	Смеситель №14200138
ИШ-8	84	83	82	80	78	77	73	72	66	Смеситель №14209125
ИШ-9	84	83	82	80	78	75	73	71	65	Смеситель № 14200990
ИШ-10	84	83	84	81	78	75	73	69	65	Смеситель №14200999
ИШ-11	85	83	82	80	78	74	73	69	64	Дозатор №14301203
ИШ-12	87	86	84	81	79	78	73	69	66	Дозатор №14301320
ИШ-13	88	86	84	81	80	79	74	72	67	Дозатор №1431323
ИШ-14	88	86	83	81	80	78	73	72	66	Дозатор №6/н
ИШ-15	88	86	83	81	80	78	73	72	65	Дозатор №6/н
ИШ-16	88	86	84	81	80	78	71	72	65	Дозатор №6/н
ИШ-17	88	86	84	82	81	78	71	67	65	Дозатор №6/н
ИШ-18	88	86	84	82	81	78	71	67	65	Дозатор №6/н
ИШ-19	88	86	84	82	80	78	71	67	65	Дозатор №6/н
ИШ-20	88	86	84	82	80	78	71	67	64	Дозатор №6/н
ИШ-21	88	86	84	82	80	78	71	67	64	Дозатор №6/н
<b>Площадка № 2</b>										
ИШ-1	89	93	90	86	83	81	79	76	75	Мельница классификатор ТРИБОКИНЕТИКА № 14213228
ИШ-2	89	93	90	86	83	81	79	76	75	Мельница классификатор ТРИБОКИНЕТИКА № 14213442

№ источника шума	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах, со среднегеометрическими частотами, Гц									Наименование источника шума
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
ИШ-3	88	93	90	86	83	81	79	76	75	Мельница классификатор ТРИБОКИНЕТИКА № 14213443
ИШ-4	89	93	90	86	83	81	79	76	75	Мельница классификатор ТРИБОКИНЕТИКА №14213587
ИШ-5	89	93	90	86	83	81	79	76	75	Фильтр рукавный №14213410
ИШ-6	89	93	90	86	83	81	79	76	75	Вентилятор ПТУ-4 №6/н
ИШ-7	84	87	86	87	83	86	81	77	73	Грохот. АГХ-113 №14212066
ИШ-8	84	87	86	87	83	86	81	77	73	Грохот. АГХ-113 №14212071
ИШ-9	90	87	86	87	83	86	81	77	73	Грохот. АГХ-113 №14212072
ИШ-10	92	87	86	87	83	86	81	77	73	Грохот МТС № 14211961
ИШ-11	79	82	76	71	69	66	61	61	60	Измельчитель прессвалковый. 600*200 мм №6/н
ИШ-12	82	86	81	79	76	73	71	71	66	Вентилятор ПТУ-1 №6/н
ИШ-13	83	86	82	79	75	73	71	69	66	Фильтр рукавный ПТУ-1 №14213569
ИШ-14	84	87	86	87	83	86	81	77	73	Фильтр рукавный ПТУ-3 №14212980
ИШ-15	84	87	86	87	83	86	81	77	73	Вентилятор ПТУ-3 № 14212981
ИШ-16	93	94	94	90	86	82	80	76	71	Дробилка ударная, В 5100 SE №14212864
ИШ-17	84	87	86	87	83	86	81	77	73	Грохот АГХ № 14212920
ИШ-18	84	87	85	87	83	86	81	77	73	Грохот АГХ №14213097
ИШ-19	84	87	86	87	83	86	81	77	73	Грохот АГХ № 14213098
ИШ-20	84	87	86	87	83	86	81	77	73	Грохот Минокс №14212766

Также для определения звуковой мощности необходимо знать длину и ширину исследуемой территории а также длину и ширину измерительного контура. Для первой

площадки длина территории – 108 м, ширина 20 м, длина контура площадки №1 составила – 117 м, ширина – 27 м, площадь площадки  $S_p$  – 2160 м<sup>2</sup>, площадь измерительного контура  $S_m$  – 3159 м<sup>2</sup>, длина измерительного контура  $l$  – 288 м.

Для второй площадки длина территории составила – 116 м, ширина 20 м; длина контура площадки №2 составила – 125 м, ширина – 29 м, площадь площадки  $S_p$  – 2320 м<sup>2</sup>, площадь измерительного контура  $S_m$  – 3625 м<sup>2</sup>, длина измерительного контура  $l$  – 308 м.

Далее были проведены расчеты суммарного уровня шума в контрольных точках от всех источников. Обработка данных проводилась при помощи лицензированного программного комплекса «АРМ Акустика 3.2.8». Расчеты производятся в соответствии с существующими методиками, справочниками и нормативными документами. Это подтверждено экспертным заключением НИИСФ РААСН и экспертным заключением ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» (г. Санкт-Петербург).

Суммарный уровень звукового давления в контрольной точке определялся логарифмическим суммированием уровней звукового давления, создаваемых в этой точке каждым источником по формуле 1:

$$L_{\text{сум}} = 10 \lg \sum_{i=1}^m 10^{0,1L_i}, \quad (1)$$

где:  $L_i$ , дБ – уровень звукового давления в контрольной точке определенный от одного ИШ.

Результаты расчета уровня звукового давления представлены для площадки № 1 в таблице 2 для площадки № 2 в таблице 3.

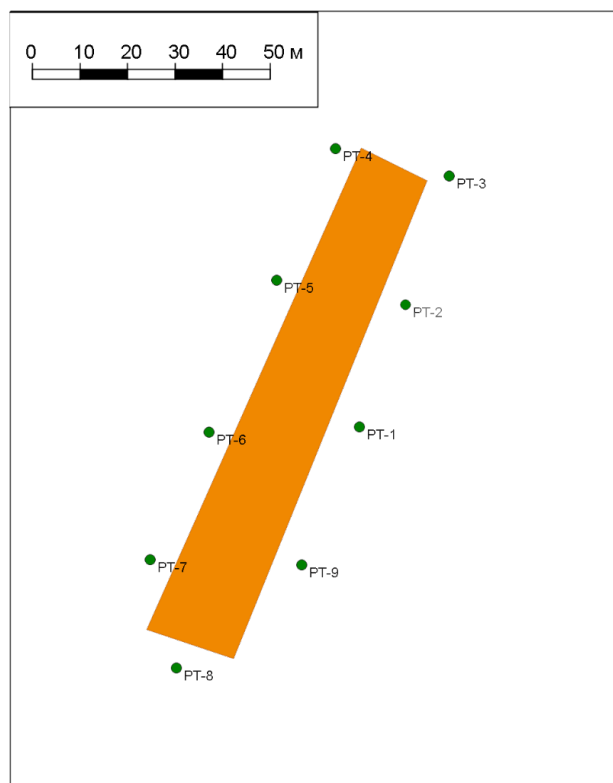


Рис. 1. Схема расположения расчетных точек для площадки №1



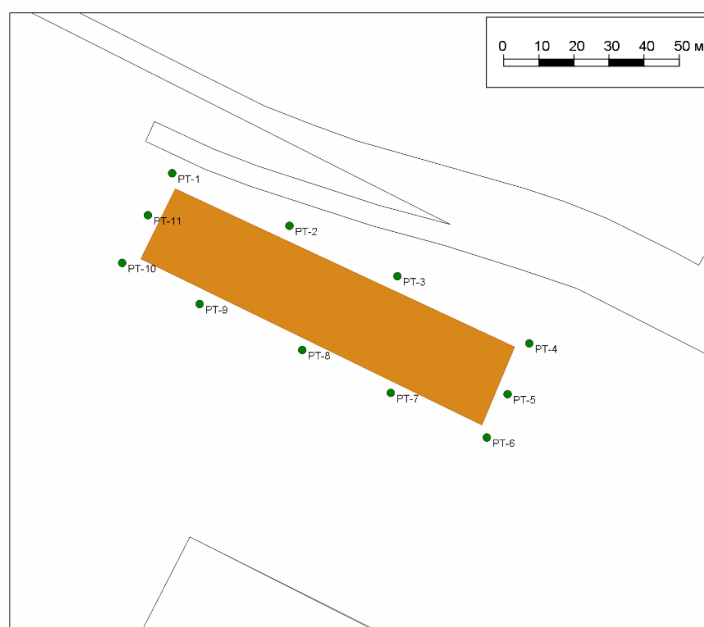


Рис. 2. Схема расположения расчетных точек для площадки №2

Таблица 2

Результаты расчета УЗД и УЗ в РТ для площадки №1

Наименование	Уровни звукового давления (УЗД), дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									$L_{ЭКВ}$ , дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
РТ-1	68,4	67,6	59	51,2	47,6	49,7	47,6	39,1	24	54,1
РТ-2	64,6	64,2	56,4	47,4	45,3	48,7	46,6	37,6	23,3	52,6
РТ-3	67,8	67,4	54,6	45,2	39,5	36,6	35,2	30,7	26,2	46,1
РТ-4	70,7	70	58,4	50,1	44,4	40,5	38,5	34,4	28,1	49,7
РТ-5	72,6	71,7	60,6	52,8	47,1	42,8	40,6	36,6	29,2	52
РТ-6	68,1	67,7	55,2	46	40,4	37,3	35,7	31,2	26	46,6
РТ-7	65,8	66,4	52,9	43	37,3	34,9	33,8	28,9	24,6	44,5
РТ-8	65,1	64,7	58,4	49,3	47,3	51,1	48,3	39,4	20,6	54,6
РТ-9	64,2	63,7	59,3	50,5	48,8	52,4	49,5	40,9	18,2	55,8

Таблица 3

Результаты расчета УЗД и УЗ в РТ для площадки № 2

Наименование	Уровни звукового давления (УЗД), дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									$L_{\text{экв}}$ , дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
РТ-1	71	69,9	57	50,5	45,2	40,8	38,2	34,9	25,3	49,7
РТ-2	69,1	68	55	47,7	42,6	38,7	36,2	32,9	23,2	47,5
РТ-3	71,8	70,7	57,9	51	45,8	41,6	39	36,7	26,3	50,5
РТ-4	67	65,9	52,9	45,3	40,3	36,6	34,1	30,7	20,5	45,3
РТ-5	71,5	70,4	57,6	50,7	45,4	41,3	38,7	35,3	25,3	50,1
РТ-6	71,1	70	57,4	50,3	45,1	41,1	38,4	34,6	24,7	49,8
РТ-7	71,4	70,3	57,5	50,6	45,4	41,3	38,6	34,9	25,1	50
РТ-8	67,3	66,2	53,3	45,8	40,8	37	34,4	30,6	20,4	45,7
РТ-9	70,7	69,6	56,8	50,2	44,9	40,6	37,9	34,3	24,5	49,4
РТ-10	66,9	65,8	52,9	45,3	40,3	36,6	34	30,2	19,9	45,3
РТ-11	72,2	71,1	59	51,8	46,5	42,5	39,8	35,6	25,7	51,1

Далее по полученным расчетам был получен уровень звуковой мощности для каждой территории согласно ГОСТ 31297-2005.

Рассчитывают средний уровень звукового давления на измерительном контуре  $L_p$ , дБ, в каждой октавной полосе по формуле 2:

$$L_p = 10 \lg \frac{1}{N} \sum 10^{0,1 * L_{pi}}. \quad (2)$$

Далее были найдены поправочные коэффициенты  $L_s, L_f, L_m, l_a$ . И найден уровень звуковой мощности от площадок целиком по формуле 3, результаты представлены в таблице 4.

$$L_w = L_p + L_s + L_f + L_m + l_a, \quad (3)$$

где  $L_w$  – октавный (третьоктавный) уровень звуковой мощности предприятия, дБ;  
 $L_p$  – средний октавный (третьоктавный) уровень звукового давления на измерительном контуре, дБ;

$L_s$  – поправка, учитывающая влияние площади измерительной поверхности, дБ;

$L_f$  – ошибка ближнего поля (поправка, учитывающая влияние ближнего звукового поля), дБ;

$L_m$  – поправка, учитывающая влияние направленности микрофона, дБ;

$l_a$  – затухание звука в атмосфере, дБ.

Далее были проведены расчеты звуковой мощности от оборудования по периметру площадок по формулам 2 и 3. Результат расчета УЗМ представлены в таблице 5.

Таблица 4

Поправочные коэффициенты

Наименование площадки	$L_s$	$L_f$	$L_m$	$L_a$								
				31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Площадка №1	25,4	0,28	1,5	0	0	0	0,02	0,05	0,14	0,28	1,79	1,29
Площадка №2	28,3	0,48	1,5	0	0	0	0,03	0,06	0,15	0,3	0,78	1,38

Таблица 5

Результаты расчета УЗМ для площадок

Наименование	Уровни звукового давления (УЗД), дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Площадка № 1										
$\sum L_w$	59,7	58,6	46,0	39,0	33,7	29,7	27,0	23,3	13,4	
$L_s$	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4	
$L_f$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
$L_m$	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
$L_a$	0	0	0	0	0,1	0,1	0,3	0,7	1,3	
Результаты расчета по формуле 3	86,9	85,8	73,2	66,2	61,0	57,0	54,5	51,2	41,9	
Коррекция А	40	26	16	9	3	0	-1	-1	1	
Корректированные УЗД	46,9	59,8	57,2	57,2	58,0	57,0	55,5	52,2	40,9	
$\sum L_w A$ с округлением согласно МУК 4.3.2194-07 п.1.18е	66									
Площадка № 2										
$\sum L_w$	62,5	65,7	53,9	48,2	40,9	39,3	37,1	30,5	19,2	
$L_s$	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	
$L_f$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
$L_m$	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
$L_a$	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,8	1,4	
Ф-ла 3	92,9	96,1	84,3	78,6	71,4	69,9	67,8	61,7	51	
Результаты расчета по формуле 3	40	26	16	9	3	0	-1	-1	1	
Корректированные УЗД	52,9	70,1	68,3	69,6	68,4	69,9	68,8	62,7	50	
$\sum L_w A$ с округлением согласно МУК 4.3.2194-07 п.1.18е	77									

В результате расчетов был получен уровень звуковой мощности каждой площадки по основному шумящему оборудованию на каждой территории:

- Площадка №1 УЗМ – 66 дБА;
- Площадка №2 УЗМ – 77 дБА.

## 2.2. Расчет УЗМ предприятия по протоколам

В рамках исследования были проведены натурные измерения уровня звукового давления в точках представленных на рисунках №1 и №2. Согласно ГОСТ 31297-2005.

В таблицах 6 и 7 представлены результаты измерений в расчетных точках по измерительному контуру вокруг каждой из площадок. Далее аналогичным способом по формуле 2 и 3 были получены значения звуковой мощности предприятия целиком где исходными данными послужили натурные замеры.

Таблица 6

Результаты натурных измерений УЗД и УЗ в РТ площадки №1

Точка измерения	Уровни звукового давления (УЗД), дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									$L_{\text{экв}}$ , дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
РТ-1	78	77	74	71	66	64	61	55	52	70
РТ-2	80	79	76	75	69	65	62	58	53	72
РТ-3	77	77	74	71	66	64	61	56	53	70
РТ-4	76	76	74	72	65	64	61	57	52	71
РТ-5	79	78	75	74	68	65	63	60	57	72
РТ-6	80	78	75	74	68	66	66	58	53	72
РТ-7	79	78	75	73	67	66	63	60	57	72
РТ-8	77	79	75	73	67	64	63	58	53	71
РТ-9	78	78	74	71	66	65	61	59	53	70

Таблица 7

Результаты натурных измерений УЗД и УЗ в РТ площадки №2

Точка измерения	Уровни звукового давления (УЗД), дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									$L_{\text{экв}}$ , дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
РТ-1	63	66	61	58	51	46	41	37	28	54
РТ-2	61	64	59	53	50	43	38	33	26	51
РТ-3	60	66	59	55	51	46	42	33	27	53
РТ-4	62	65	60	58	50	46	43	30	26	54
РТ-5	61	65	59	55	50	46	44	32	27	53
РТ-6	60	64	58	54	50	46	43	33	28	52
РТ-7	61	65	58	55	50	45	41	33	26	52
РТ-8	62	64	59	54	51	44	39	34	25	52
РТ-9	62	64	59	55	51	43	40	34	24	52
РТ-10	61	65	59	54	51	43	39	33	25	52
РТ-11	62	65	61	57	50	46	41	33	26	53

Далее были проведены расчета звуковой мощности исходя из протоколов натурных замеров по периметру площадок по формулам 2 и 3. Поправочные коэффициенты сохраняют свои значения так как измерительный контур и контур

площадок не изменялся. Результат расчета УЗМ от протоколов натуральных замеров представлены в таблице 8.

Таблица 8

Результаты расчета УЗМ для площадок

Наименование	Уровни звукового давления (УЗД), дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Площадка № 1									
$\sum L_w$	77,5	77,0	73,8	72,0	66,2	64,0	61,8	57,3	53,2
$L_s$	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4
$L_f$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
$L_m$	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
$L_a$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,7	1,3
Результаты расчета по формуле 3	104,7	104,2	101,0	99,2	93,5	91,3	89,3	85,2	81,7
Коррекция А	40,0	26,0	16,0	9,0	3,0	0,0	-1,0	-1,0	1,0
Корректированные УЗД	64,7	78,2	85,0	90,2	90,5	91,3	90,3	86,2	80,7
$\sum L_w A$ с округлением согласно МУК 4.3.2194-07 п.1.18е	97								
Площадка № 2									
$\sum L_w$	60,8	64,3	58,8	54,8	50	44,6	41	32,5	25,7
$L_s$	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4
$L_f$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$L_m$	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
$L_a$	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,8	1,4
Ф-ла 3	91,2	94,7	89,2	85,2	80,5	75,2	71,7	63,7	57,5
Результаты расчета по формуле 3	40	26	16	9	3	0	-1	-1	1
Корректированные УЗД	51,2	68,7	73,2	76,2	77,5	75,2	72,7	64,7	56,5
$\sum L_w A$ с округлением согласно МУК 4.3.2194-07 п.1.18е	83								

В результате расчетов был получен уровень звуковой мощности каждой площадки от протоколов натуральных замеров для каждой площадки.

- Площадка №1 УЗМ – 97 дБА;
- Площадка №2 УЗМ – 83 дБА.

### Заключение

В результате исследования можно сделать следующие выводы: В результате расчетов УЗМ для площадки № 1 составил:

- 66 дБА при расчете от источников шума;
- 97 дБА от протоколов замеренных на контуре объекта.

В результате расчетов УЗМ для площадки № 2 составил:

- 77 дБА при расчете от источников шума;
- 83 дБА от протоколов замеренных на контуре объекта.

Результаты по расчетам УЗД на измерительном контуре от оборудования и УЗД на измерительном контуре согласно протоколам натурных измерений в случае отсутствия воздействия сторонних источников шума дают похожий результат, что позволяет нам сделать вывод о корректности данного метода определения УЗМ предприятия как единого источника.

В случае если предприятие находится в зоне акустического воздействия сторонних источников шума данный метод использовать не корректно. Необходимо провести дальнейшее изучение данной проблематики для возможности оценки предприятия в случае высокого уровня фонового шума.

### Список литературы

1. Пономарев А.Л., Уланова Т.С., Молок О.А., Одегов А.А. Метод измерения шума и оценка вклада крупного промышленного предприятия в шумовую обстановку селитебной территории // Здоровье населения и среда обитания. –2022. –Т.30, №12. –С. 59-65.
2. Шашурин А.Е., Чукарин А.Н., Исаев А.Г., Элькин Ю.И. Теоретические исследования процессов возбуждения вибраций и шумообразования при абразивной обработке сварных швов рамных конструкций // Noise Theory and Practice. –2020. –Т.6, №4. –С. 71-80.
3. Элькин Ю.И., Шашурин А.Е., Курченко П.С., Васильева В.К. Шумообразование на рабочих местах операторов специальных металлообрабатывающих станков // Noise Theory and Practice. –2021. –Т.7, №2. –С. 199-207.
4. Рекомендации по измерению и оценке внешнего шума промышленных предприятий / НИИСФ. – М.: Стройиздат, 1989;
5. МУК 4.3.2194-07 "Контроль уровня шума на территории жилой застройки, в жилых и общественных зданиях и помещениях", Роспотребнадзор, Москва – 2007;
6. Защита от шума в градостроительстве//Справочник проектировщика, Г.Л. Осипов, В.Е. Коробков, А.А. Климухин и др.; Под ред. Г.Л. Осипова. – М. Стройиздат, 1993;
7. СП 275.1325800.2016 Конструкции ограждающие жилых и общественных зданий. Правила проектирования звукоизоляции;
8. Пособие к МГСН 2.04-97 Проектирование защиты от транспортного шума и вибрации жилых и общественных зданий;
9. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (утв. главным государственным санитарным врачом РФ 28.01.2021 г.);
10. ГОСТ 31297-2005 (ИСО 8297:1994) Шум. Технический метод определения ровней звуковой мощности промышленных предприятий с множественными источниками шума для оценки уровней звукового давления в окружающей среде.3.1.2 Краткая характеристика источников шума
11. Нестеренко С.В., Ткач Н.А. Анализ существующих методов натурных измерений шума промышленных предприятий // Интернаука 2015. № 5. С.47-49
12. Зикриеев С.С., Солижонов Ж.О. Исследование шумовых характеристик строительной техники и инструмента.// Избранные доклады 68-й университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых 2022. С. 687-691.

## References

1. Ponomarev A.L., Ulanova T.S., Molok O.A., Odegov A.A. Noise measurement method and assessment of the contribution of a large industrial enterprise to the noise environment of a residential area // *Public health and habitat*. 2022. Vol. 30. No. 12. pp. 59-65.
2. Shashurin A.E., Chukarin A.N., Isaev A.G., Elkin Yu.I. Theoretical studies of the processes of vibration excitation and noise generation during abrasive processing of welds of frame structures // *Noise Theory and Practice*. –2020. –T.6, No.4. pp. 71-80.
3. Elkin Yu.I., Shashurin A.E., Kurchenko P.S., Vasilyeva V.K. Noise generation at the workplaces of operators of special metalworking machines // *Noise Theory and Practice*. –2021. –T.7, No. 2. pp. 199-207.
4. Recommendations for measuring and evaluating the external noise of industrial enterprises / NIISF. – M.: Stroyizdat, 1989;
5. MUC 4.3.2194-07 "Noise level control in residential buildings, residential and public buildings and premises", Rospotrebnadzor, Moscow – 2007;
6. Noise protection in urban planning//*The Designer's Handbook*, G.L. Osipov, V.E. Korobkov, A.A. Klimukhin, etc.; Edited by G.L. Osipov. – M. Stroyizdat, 1993;
7. SP 275.1325800.2016 Structures enclosing residential and public buildings. Sound insulation design rules;
8. Manual for MGSN 2.04-97 Design of protection against traffic noise and vibration of residential and public buildings;
9. SanPiN 1.2.3685-21 "Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans" (approved by the Chief State sanitary Doctor of the Russian Federation on 01/28/2021);
10. GOST 31297-2005 (ISO 8297:1994) Noise. A technical method for determining the sound power levels of industrial enterprises with multiple noise sources to assess sound pressure levels in the environment.3.1.2 Brief description of noise sources
11. Nesterenko S.V., Tkach N.A. Analysis of existing methods of full-scale noise measurements of industrial enterprises // *Internauka* 2015. No. 5. pp.47-49
12. Zikriev S.S., Solizhonov J.O. Investigation of noise characteristics of construction machinery and tools.// *Selected reports of the 68th University Scientific and Technical Conference of Students and Young Scientists* 2022. pp. 687-691.

УДК: 534.6.08  
OECD: 1.03. AA

## Оценка эффективности кабины для снижения шума на рабочих местах

Тюрина Н.В.<sup>1</sup>, Воронова А.А.<sup>2\*</sup>, Фиев К.П.<sup>3</sup>  
<sup>1</sup> Д.т.н., профессор <sup>2</sup> Магистрант <sup>3</sup> Ст. преподаватель  
<sup>1,2,3</sup> Кафедра «Экология и производственная безопасность», Балтийский  
государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,  
г. Санкт-Петербург, РФ

### Аннотация

В статье представлены результаты экспериментальных исследований уровней звука на рабочих местах операторов бумагоделательных машин (БДМ) целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК), проанализированы октавные и треть-октавные спектры шума. По результатам анализа третьоктавных спектров шума на рабочих местах операторов сделан вывод о тональном характере шума. Превышение фактических уровней шума на рабочих местах над нормативными составило от 3 дБ до 26 дБ в диапазоне частот от 125 Гц до 8000 Гц. Разработаны рекомендации по снижению шума на рабочих местах в цехах ЦБК. В качестве наиболее эффективного средства защиты от шума предусмотрено устройство звукоизолирующей кабины. Разработаны требования к конструкции кабины, выполнены измерения уровней шума на рабочих местах операторов пультов БДМ после установки кабины. Представлены данные об эффективности звукоизолирующей кабины и звукоизоляции элементов ее конструкции. Эффективность кабины составила 3-41 дБ в диапазоне частот 63-8000 Гц. Применение звукоизолирующей кабины позволило снизить шум на рабочих местах до нормативных значений.

**Ключевые слова:** шум, звук, уровень звукового давления, бумагоделательные машины, рабочие места, звукоизолирующая кабина, шумозащитное мероприятие, эффективность.

### *Evaluation of cabin insertion loss for noise reduction in workplaces*

Tyurina N.V.<sup>1</sup>, Voronova A.A.<sup>2\*</sup>, Fiev K.P.<sup>3</sup>  
<sup>1</sup> DSc, Professor <sup>2</sup> Graduate Student <sup>3</sup> Senior Lecturer  
<sup>1,2,3</sup> Department of Ecology and Industrial Safety, Baltic State Technical University 'VOENMEH',  
St. Petersburg, Russia

### Abstract

Results of experimental study of sound levels at workplaces of operators of papermaking machines of the pulp and paper mill are presented. The octave and third-octave noise spectra of papermaking machines are analyzed. Based on the analysis of the acoustical effects of noise in the workshops noise control recommendations have been developed. Tonal noise is determined based on the one-third octave band analysis of the papermaking machines noise spectrum. Excessive noise levels from 3 dB to 26 dB in the frequency range from 125 Hz to 8000 Hz are found in the workplace. Soundproofed cabin is found as the most effective means of noise protection at the workplaces of operators of papermaking machines. The requirements for the cabin parameters and design have been developed. Noise levels have been measured after installation of the cabin in the papermaking workplace. Sound isolation of cabin structural elements is presented. Insertion loss of the cabin is found in the

---

\*E-mail: vaat27@mail.ru (Воронова А.А.)



range of 3-41 dB in the frequency range 63-8000 Hz. Application of the sound-proofed cabin made it possible to reduce noise in the workplace to the normative limits.

**Keywords:** noise, sound, sound pressure level, paper-making machines, workplaces, soundproofing cabin, noise control measure, insertion loss, effectiveness.

## Введение

Повышенный производственный шум оказывает вредное воздействие на работников, приводя к производственным заболеваниям, ухудшению качества выполняемых задач, замедлению скорости обработки информации и снижению производительности труда [1-3].

Для эффективного контроля производственного шума важно учитывать влияние прямого и отраженного звука, для чего требуется проведение натурных замеров и выявление зон данного влияния. В производственных помещениях наиболее эффективно реализовывать комплекс шумозащитных мероприятий, включающих применение звукопоглощающих материалов для облицовки производственных помещений и снижения отраженного звука, использование акустических экранов и выгородок, применение глушителей, кожухов. Если технологическим процессом предусмотрено дистанционное управление оборудованием эффективным является применение звукоизоляционных кабин.

Если технологическим процессом предусмотрено дистанционное управление оборудованием рекомендуется применение звукоизолирующих кабин, защищающих от воздействия как прямого воздействия источников шума, так и отраженного звука. При проектировании кабин необходимо обеспечивать их высокую звукоизолирующую способность, достаточное звукопоглощение, герметизировать технологические отверстия, применять вибродемпфирование и виброизоляцию [4].

## 1. Уровни шума на рабочих местах операторов бумагоделательных машин

Для анализа акустического воздействия на сотрудников и разработки шумозащитных мероприятий проведены натурные измерения уровней звука (УЗ) и уровней звукового давления (УЗД) в третьоктавных и октавных полосах частот в производственном помещении на рабочих местах операторов, обслуживающих пульта управления бумагоделательных машин (БДМ) целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК).

Измерения в цеху выполнены в пяти точках в непосредственной близости от основных источников шума. На основании анализа полученных экспериментальных данных установлено, что шум является постоянным по временной характеристике и тональным по частотной характеристике. Для выявления тональных составляющих в спектре шума бумагоделательных машин выполнен узкополосный анализ.

Характерные спектры шума бумагоделательных машин представлены на рисунке 1.

По результатам анализа третьоктавных спектров шума на рабочих местах операторов сделан вывод о тональном характере шума.

Результаты измерения шума на рабочих местах в октавных полосах частот приведены в Таблице 1.

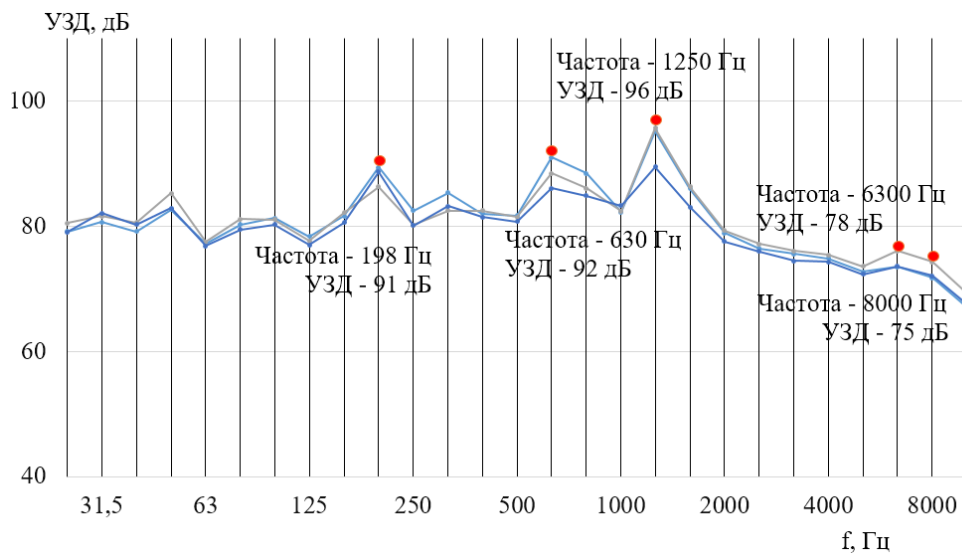


Рис. 1. Треть-октавные спектры шума на рабочих местах операторов бумагоделательных машин

Таблица 1

Измеренные уровни звукового давления и уровни звука на рабочих местах операторов бумагоделательных машин

№ ТИ	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах, Гц									УЗ, дБА	Расстояние до источника шума, м	Примечание
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000			
1	85	85	85	91	92	96	87	79	76	98	2,8 м до БДМ №2	Рабочее место оператора БДМ №2
2	86	87	85	89	90	96	88	80	79	98	2,6 м до БДМ №2	
3	85	85	84	90	88	92	85	79	77	94	4,4 м до БДМ №2	
4	84	85	86	94	89	93	85	83	79	95	3,0 м до БДМ №1	Рабочее место оператора БДМ №1
5	84	85	85	96	89	91	83	80	76	94	5,0 м до БДМ №1	

Выполним сравнение фактических уровней шума с предельно допустимыми на рабочих местах, при этом учтем, что согласно [4] нормативным эквивалентным уровнем звука является 80 дБА, нормативным максимальным уровнем звука – 110 дБА, а согласно [5] нормирование шума на постоянных рабочих местах включает в себя допустимые значения уровней звукового давления в октавных полосах частот. Кроме того, примем поправку минус 5 дБ на тональный характер шума. Результаты сравнения фактических уровней шума на рабочих местах с допустимыми уровнями представлены в таблице 2 и на рисунках 2-3. Наибольшее превышение уровней звука зафиксировано для рабочего места оператора БДМ №2.

Сравнение результатов натурных измерений уровней шума в измерительных точках, расположенных в рабочей зоне операторов, обслуживающих пульта управления бумагоделательных машин (БДМ) целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК), с

нормативными уровнями шума показывает, что в производственном помещении во всех точках измерения уровни шума выше предельно допустимых значений, при этом превышения составляют от 3 дБ до 26 дБ в диапазоне частот от 125 Гц до 8000 Гц, а также до 23 дБ по скорректированному по А уровню звука. Превышения УЗД на частотах 31,5 и 63 Гц не зафиксированы.

Таблица 2

Сравнение уровней шума на рабочих местах с нормативными требованиями

Наименование	Уровни звукового давления*, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука, дБА*	Макс. УЗ, дБА*
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
Оператор БДМ №1											
Наибольшие измеренные значения на рабочих местах	84	85	86	96	89	93	85	83	79	95	97
Предельно допустимые уровни (нормативные значения**)	102	90	82	77	73	70	68	66	64	75	105
Превышение над ПДУ	-	-	4	19	16	23	17	17	15	20	-
Оператор БДМ №2											
Наибольшие измеренные значения на рабочих местах	86	87	85	91	92	96	88	80	79	98	99
Предельно допустимые уровни (нормативные значения**)	102	90	82	77	73	70	68	66	64	75	105
Превышение над ПДУ	-	-	3	14	19	26	20	14	15	23	-

\*допустимые уровни в дБА приняты согласно [5], допустимые уровни в дБ приняты согласно [6];

\*\* допустимые уровни приняты с учетом поправки на тональный характер шума

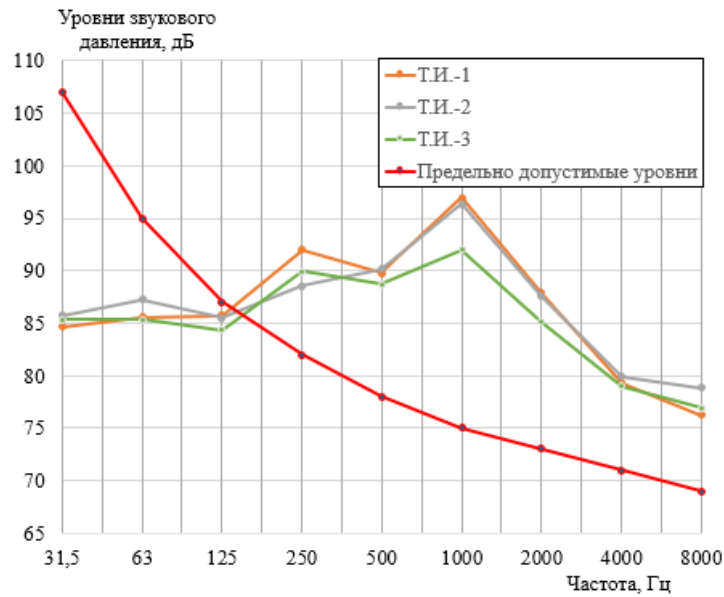


Рис. 2. Уровни звукового давления на рабочем месте оператора БДМ№1

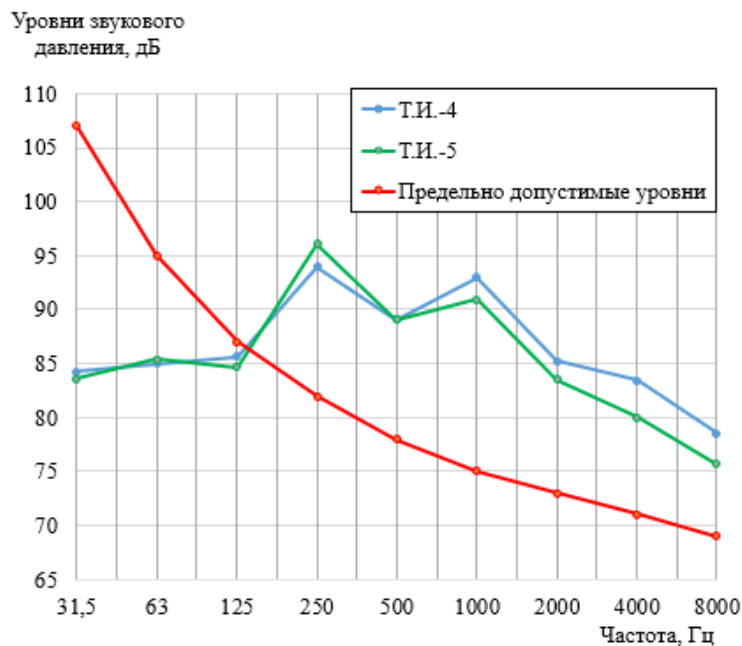


Рис. 3. Уровни звукового давления на рабочем месте оператора БДМ№2

## 2. Шумозащитные мероприятия

Наиболее эффективным способом борьбы с шумом является снижение шума непосредственно в источнике, если это невозможно, реализуется защита от шума на пути распространения между источником и приемником шума или шумозащитные мероприятия на рабочем месте (в приемнике шума).

Учитывая, что работа операторов проводится с пультов управления, для снижения уровней шума на рабочих местах операторов БДМ №1 и БДМ №2 бумагоделательного цеха рекомендованы звукоизоляционные кабины.

Применение звукоизоляционных кабин обеспечивает не только защиту операторов от вредного воздействия шума машин, станков, производственных линий и другого

инженерно-технологического оборудования производственного помещения, но и защищает от таких вредных и опасных производственных факторов как запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны; повышенная влажность; высокая или низкая температура в цехе; общая вибрация; движущиеся машины и механизмы; подъемно-транспортные устройства и перемещаемые грузы. Возможность размещения внутри кабины пультов управления и щитов наблюдения, а также наличие смотровых окон позволяют производить в условиях обеспечения нормативных уровней шума дистанционное управление и наблюдение за технологическим процессом, находясь на своём стационарном рабочем месте, а также обеспечивает конфиденциальность и комфорт.

Требуемое значение эффективности кабины, дБ, определяют следующим образом [7]:

$$L_{\text{тр.каб}} = L_{\text{ш}} - L_{\text{доп}}, \quad \text{дБ (дБА)}, \quad (1)$$

где:  $L_{\text{ш}}$  – уровни звукового давления в октавных полосах частот (уровни звука), создаваемые всеми источниками шума на рабочем месте, дБ (дБА);

$L_{\text{доп}}$  – допустимые уровни звукового давления (уровни звука) на данном рабочем месте, дБ (дБА).

Согласно результатам измерений, на рабочих местах операторов бумагоделательных машин рассматриваемого целлюлозно-бумажного комбината, наибольшее превышение уровней звука над предельно допустимыми уровнями составляет 23 дБА. Требуемое снижение уровня шума составляет 3-26 дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 125-8000 Гц. Выбор параметров кабины производится для обеспечения данных целевых показателей.

В таблице 3 представлен расчет требуемой эффективности кабины на рабочем месте операторов бумагоделательных машин (БДМ) и определение класса кабины в соответствии с [8].

Таблица 3

Требуемые эффективность и звукоизоляция кабин операторов пультов управления БДМ

Рабочее место/параметр	Уровни звукового давления, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Оператор бумагоделательной машины №1	85	86	96	89	93	85	83	79
Предельно допустимые уровни	90	82	77	73	70	68	66	64
Требуемая эффективность кабины	-	4	19	16	23	17	17	15
Оператор бумагоделательной машины №2	87	85	91	92	96	88	80	79
Предельно допустимые уровни	90	82	77	73	70	68	66	64
Требуемая эффективность кабины	-	3	14	19	26	20	14	15

Рабочее место/параметр	Уровни звукового давления, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Изоляция воздушного шума кабиной 4 класса (ГОСТ 12.2.098-84)	0-4	0-9	5-14	10-19	15-24	20-29	20-29	15-24
Изоляция воздушного шума кабиной 3 класса (ГОСТ 12.2.098-84)	5-14	10-19	15-25	20-29	25-34	30-39	30-39	25-34
Изоляция воздушного шума кабиной 2 класса (ГОСТ 12.2.098-84)	15-24	20-29	25-34	30-39	35-44	40-49	40-49	35-44

Для защиты от шума в соответствии с нормативными требованиями [8] необходимо спроектировать и оснастить рабочие места операторов изолирующими кабинами 2 класса.

### 3. Требования к конструкции звукоизолирующей кабины

В соответствие с требованиями нормативных документов и полученными экспериментальными данными, к конструкциям звукоизолирующих кабин выдвигаются следующие требования:

1. Уровень шума в кабине должен соответствовать ПДУ.

2. Высота кабины должна быть не менее 2,5 м. Размеры и форма кабины должны быть определены с учетом габаритных размеров устанавливаемого в ней оборудования и в соответствии с требованиями ГОСТ 12.2.049-80 «Оборудование производственное. Общие эргономические требования».

3. Размеры и расположение окон кабины должны быть выбраны с учетом возможности хорошего обзора оборудования и управления технологическим процессом на соответствующем производственном участке. Необходимо предусмотреть возможность безопасной периодической очистки стекол кабины. Смотровые окна выполняют двойными, стены изготавливают из сборных панелей или кирпича без проемов и отверстий, двери делают массивными, из нескольких слоев материалов с поверхностной массой, равной массе стены. Двери уплотняют по периметру резиновыми прокладками. Стены и потолок кабины изнутри облицовывают звукопоглощающим материалом (ЗПМ).

4. Для вентиляции и поддержания оптимальной температуры внутри кабины она должна быть оборудована системой кондиционирования или соединена с общецеховой системой отопления и вентиляции в соответствии со строительными нормами по отоплению, вентиляции и кондиционированию воздуха. Кондиционеры и вытяжные вентиляторы должны обеспечивать воздухообмен в кабине в соответствии с ГОСТ 12.4.021-75 «Системы вентиляционные. Общие требования».

5. Предельно допустимые уровни вибрации пола, на который устанавливается проектируемая кабина, не должны превышать нормативных значений согласно [4].

6. Внутренние поверхности кабины должны быть облицованы звукопоглощающими материалами или конструкциями. Для звукопоглощающей облицовки рекомендуется выбирать негорючие материалы с коэффициентами звукопоглощения от 0,5 до 0,9 в той области частот, где требуется обеспечение наибольшую изоляцию шума.

7. Освещение и цветовая отделка поверхностей - в соответствии нормативными требованиями.

8. Для быстрого обмена информацией между персоналом, непосредственно обслуживающим технологическое оборудование, и диспетчером кабины должны быть оборудованы переговорными устройствами. В кабине должна быть обеспечена возможность оборудования рабочих мест по ГОСТ 12.2.032-78 «Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования» и ГОСТ 12.2.033-78 «Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования».

9. Места вводов кабелей и трубопроводов через стены кабины должны быть звуко- и виброизолированы. Число отдельных отверстий в стенах и перекрытиях кабины должно быть уменьшено до минимума за счет устройства коллекторов. Заделка их в стены и перекрытия должна осуществляться одновременно с установкой кабины.

10. Кабины из сборных элементов должны иметь минимальное число швов и стыков. Все швы и стыки между элементами ограждения должны быть герметизированы. Герметизация должна обеспечивать установленное значение изоляции шума на весь срок службы кабины.

11. Двери кабины должны иметь уплотняющие прокладки по контуру примыкания к ограждающим конструкциям и иметь самозапирающиеся затворы. Они должны открываться и закрываться свободно, без перекосов и неплотностей.

12. Кабина должна удовлетворять требованиям пожарной безопасности.

13. При условии установки во внутренний объем кабины устройства кондиционирования воздуха, необходимо учесть вклад данного устройства, как источника шума в общую акустическую картину кабины.

14. Для минимизации времени обслуживания БДМ вне кабины рекомендуется оборудовать кабину автоматизированной системой управления рабочим процессом, а также камерами наблюдения с выводом изображения в кабину оператора.

#### **4. Характеристики звукоизолирующей кабины для защиты от шума операторов бумагоделательного цеха**

Для снижения шума бумагоделательного цеха предусмотрена звукоизолирующая кабина следующей конструкции: панели стен представляют собой профилированные стальные листы С20 толщиной 0,7 мм, изготовленные из стали 08ПС, с плитой минераловатной теплоизоляционной на синтетическом связующем (45 мм толщина плиты, плотность – 60 кг/м<sup>3</sup>), установленной между профилированными листами, и мембраной парогидроизоляции, установленной на минераловатную плиту со стороны перфорированного листа.

Монолитный поликарбонат, применяемый в конструкции для обеспечения наблюдения оператором за технологическим процессом, обладает 90%-ным светопропусканием, вдвое легче стекла и по качеству звукоизоляции не уступает шумозащитным панелям.

Кабина оборудована одноблочным мобильным кондиционером и четырьмя светильниками для обеспечения требуемого воздухообмена и освещения.

Звукоизоляция кабины (ЗИ), определенная по результатам натурных замеров, представлена на рисунке 4. Уровни шума на рабочих местах БДМ после установки кабины представлены в таблице 4. Как следует из результатов замеров, после установки кабины в бумагоделательном цехе ликвидировано повышенное действие шума на работников.

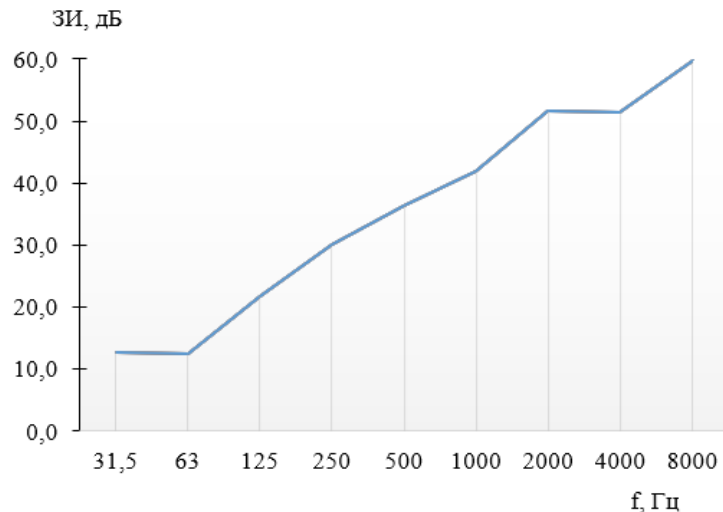


Рис. 4. Звукоизоляция кабины, предусмотренной для снижения шума на рабочем месте оператора БДМ

Таблица 4

Уровни шума на рабочих местах в кабинах, установленных в цехе

Рабочее место/параметр	Уровни звукового давления, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Уровни звукового давления на рабочем месте оператора БДМ1 до установки кабины	85	86	96	89	93	85	83	79
Предельно допустимые уровни	95	87	82	78	75	73	71	69
Уровни звукового давления на рабочем месте оператора БДМ1 после установки кабины	84	78	82	70	62	47	50	38
Уровни звукового давления на рабочем месте оператора БДМ2 до установки кабины	87	85	91	92	96	88	80	79
Предельно допустимые уровни	95	87	82	78	75	73	71	69
Уровни звукового давления на рабочем месте оператора БДМ2 после установки кабины	84	77	80	73	65	50	47	38

### Заключение

Согласно результатам натурных замеров до применения шумозащитных мероприятий превышение уровней шума на рабочих местах операторов бумагоделательных машин над допустимыми уровнями составило 3-26 дБ в диапазоне частот от 125 Гц до 8000 Гц, до 23 дБ по скорректированному по А уровню звука. Предложена конструкция звукоизолирующей кабины для защиты рабочих мест от шума. Акустическая эффективность кабины составила 3-41 дБ в диапазоне частот 63-8000 Гц. Натурные замеры шума после установки кабины показали, что ее конструкция обладает достаточными звукоизолирующими качествами для обеспечения нормативных уровней шума на рабочем месте операторов бумагоделательной машины.



### Список литературы

1. Тюрина Н.В. Проблема воздействия повышенного шума на рабочих местах в Российской Федерации и зарубежом / Тюрина Н.В., Тищенко А.С., Куклин Д.А. //Сборник докладов VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации», Санкт-Петербург, Россия, 2017, с.447-450.
2. Тюрина Н.В. Experience of estimation and reduction of noise and vibration of industrial enterprises of Russia// Тюрина Н.В., Васильев А.В., Санников В.А. Akustika, 2019, т. 32, с. 247-250.
3. Panshina V. Hearing protection of workers from occupational noise / Panshina V., Petrova N. // Proceedings of 22nd International Congress on Sound and Vibration, Florence. – Italy. – 2015.
4. Иванов Н.И., Шашурин А.Е. Учебное пособие «Защита от шума и вибрации», издание второе - дополненное и переработанное / – СПб.: Печатный Цех, 2019. - 284с.
5. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: СанПиН 1.2.3685-21: утв. главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 28.01.2021 – Москва: Минюст России, 2021. – 949 с.
6. СП 51.13330.2011 «Защита от шума». Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003»
7. СП 254.1325800.2016 Здания и территории. Правила проектирования защиты от производственного шума.
8. ГОСТ 12.2.098-84 Кабины звукоизолирующие. Общие требования.

### References

1. Tyurina N.V. The problem of exposure to increased noise in workplaces in the Russian Federation and abroad / Tyurina N.V., Tishchenko A.S., Kuklin D.A. //Collection of reports of the VI All-Russian scientific and practical conference with international participation “Protection from increased noise and vibration”, St. Petersburg, Russia, 2017, pp. 447-450.
2. Tyurina N.V. Experience of estimation and reduction of noise and vibration of industrial enterprises of Russia // Tyurina N.V., Vasiliev A.V., Sannikov V.A. Akustika, 2019, vol. 32, pp. 247-250.
3. Panshina V. Hearing protection of workers from occupational noise / Panshina V., Petrova N. // Proceedings of 22nd International Congress on Sound and Vibration, Florence. – Italy. – 2015.
4. Ivanov N.I., Shashurin A.E. Textbook 'Protection from noise and vibration', second edition - expanded and revised / – St. Petersburg: Printing Shop. – 2019. – 284 p.
5. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors to humans: SanPiN 1.2.3685-21: approved. Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation 01/28/2021 – Moscow: Ministry of Justice of Russia, 2021. – 949 p.
6. SP 51.13330.2011 Protection from noise. Updated edition of SNiP 23-03-2003
7. SP 254.1325800.2016 Buildings and territories. Rules for designing protection against industrial noise
8. GOST 12.2.098-84 Soundproof cabins. General requirements

УДК: 534.6.08  
ОЕСД: 1.03. АА

## Расчет акустической эффективности кабин, устанавливаемых в помещениях

Воронова А.А.<sup>1\*</sup>, Иванов Н.И.<sup>2</sup>, Тюрина Н.В.<sup>3</sup>

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

<sup>1,2,3</sup> Кафедра «Экология и производственная безопасность», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

### Аннотация

Звукоизолирующая кабина может располагаться как в помещении, так и являться неотъемлемой частью транспортных машин. Звукоизолирующие кабины операторов, машинистов и водителей предназначены для управления и наблюдения за производственным процессом и при этом обеспечивают защиту работников от повышенного шума. В статье приведен новый метод расчета акустической эффективности кабин, устанавливаемых в производственных помещениях. Акустическая эффективность кабины определяется как разность уровней звукового давления (УЗД) и уровней звука (УЗ) при работающих источниках шума на рабочем месте в отсутствие кабины и при её установке. В предложенном методе расчета учтены приведенная звукоизоляция панелей кабины, среднее звукопоглощение в кабине, эквивалентная площадь звукопоглощения, площадь элементов кабины, а также степень отклонения звукового поля в помещении от диффузного. Представлены данные о фактической звукоизоляции панелей кабины, позволяющие выполнить расчет эффективности кабины по предложенной формуле.

**Ключевые слова:** шум, уровень звукового давления, стационарная шумозащитная кабина, акустическая эффективность, звукопоглощение, расчет снижения шума.

### *Calculation of the acoustic efficiency of cabins installed indoors*

Voronova A.A.<sup>1\*</sup>, Ivanov N.I.<sup>2</sup>, Tyurina N.V.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Graduate Student <sup>2,3</sup> DSc, Professor

<sup>1,2,3</sup> Department of Ecology and Industrial Safety, Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia

### Abstract

Sound-proofed cabin can be a part of a vehicles both may be located indoors proving noise control in industrial premises. Sound-proofed cabins at workplace of operators and drivers are designed to control and monitor the production processes and at the same time protect workers from increased noise levels. A new method for calculating the acoustical efficiency (insertion loss) of cabins installed indoors is presented in the article. The acoustical efficiency of cabins is defined as the difference between sound pressure levels (SPL) and sound levels (SL) with operating noise sources at the workplace in the absence of a cabin and when the cabin is installed. The proposed calculation method takes into account the sound insulation of the cabin panels, the average sound absorption of the cabin, the equivalent sound absorption, the area of the cabin elements, as well as the degree of deviation of the sound field in the room from the diffuse one. The cabin panels sound reduction

---

\*E-mail: vaat27@mail.ru (Воронова А.А.)

obtained experimentally is presented, which make it possible to calculate the efficiency of the cabin according to the proposed formula.

**Keywords:** noise, sound pressure level, sound-proofed cabins, insertion loss, sound insulation, efficiency, sound absorption, calculation method.

## Введение

Стационарные кабины, устанавливаемые для защиты от повышенного шума внешних источников, являются сложной шумозащитной конструкцией, в которой звуковая энергия преобразуется в результате отражения и поглощения звука, возникновения резонансных явлений, звукоизлучения и др [1, 2]. Кабина выполняет функции акустического фильтра.

Звуковое поле в производственных помещениях диффузное, поэтому в новом методе расчета принимается допущение о том, что звуковая энергия на ограждениях кабины распределена равномерно и вклад составляющих звука, проникающего в кабину, зависит от звукоизолирующих и звукопоглощающих свойств ограждающих конструкций (стен, потолка, окон и др.). Для достижения требуемого эффекта снижения шума необходимо стремиться к тому, чтобы звукоизоляция всех элементов ограждения кабины была примерно одинаковой. Кроме составляющей шума, проникающего через различные ограждения воздушным путём, внутри кабины также происходит отражение звука от внутренних элементов кабины. Таким образом, суммарное звуковое поле образуется двумя составляющими: проникающим звуком (который зависит от звукоизолирующих свойств кабины) и отраженным (который зависит от звукопоглощения в кабине) [3, 4].

## 1. Вывод формулы для расчета акустической эффективности кабины

Упрощенная расчетная схема звукоизолирующей кабины в производственном помещении показана на рис. 1.

Расчетная формула выведена с использованием следующих допущений:

- звуковое поле в производственном помещении, где устанавливается звукоизолирующая кабина (ЗИК), диффузное;
- звук равномерно распределяется на всех внешних ограждениях кабины;
- звуковое поле в кабине квазидиффузное.

Для вывода формулы расчета эффективности снижения шума звукоизолирующей кабиной воспользуемся методом последовательного преобразования звуковых полей [5, 6].

Акустическая эффективность звукоизолирующей кабины в помещении рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta L_{\text{каб}}^{\text{пом}} = 10 \lg \frac{I_{\text{РТ}}^{\delta/\kappa}}{I_{\text{РТ}}^{c/\kappa}}, \text{ дБ}, \quad (1)$$

где:  $I_{\text{РТ}}^{\delta/\kappa}$  – интенсивность звука в расчетной точке (РТ) без кабины, Вт/м<sup>2</sup>;

$I_{\text{РТ}}^{c/\kappa}$  – интенсивность звука в РТ при установленной кабине, Вт/м<sup>2</sup>.

Найдем числитель в (1), предполагая, что звук попадает в РТ двумя путями: прямым от ИШ и отраженным от ограждающих поверхностей помещения.

Интенсивность звука в расчетной точке при отсутствии кабины рассчитывается следующим образом:

$$I_{\text{РТ}}^{\delta/\kappa} = W_{\text{ист}} \left[ \frac{\chi_{\text{ист}}}{2\pi r^2} + \frac{4}{\Psi_{\text{пом}} B_{\text{пом}}} \right], \quad (2)$$

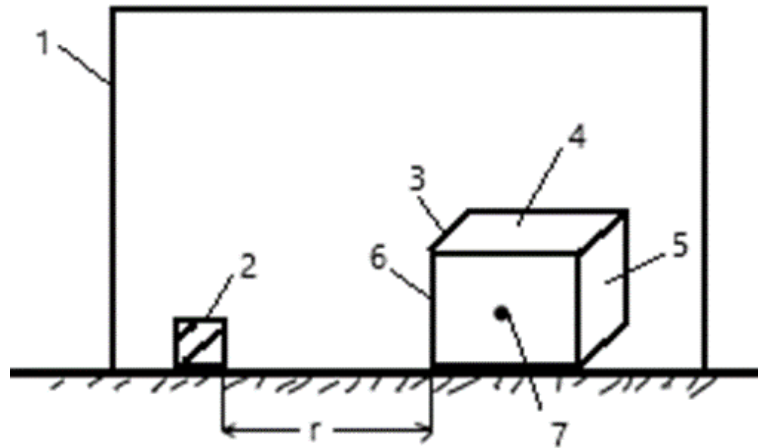


Рис. 1. Расчетная схема ЗИК: 1 – производственное помещение; 2 – источник шума (ИШ); 3 – звукоизолирующая кабина; 4-6 – ограждения кабины с различной звукоизоляцией; 7 – расчетная точка (рабочее место)

где:  $W_{\text{ист}}$  – акустическая мощность источника шума (ИШ), Вт;

$\chi_{\text{ист}}$  – коэффициент, определяемый в зависимости от отношения максимального размера ИШ к расстоянию до РТ;

$\Psi_{\text{пом}}$  – коэффициент, показывающий степень отклонения звукового поля в помещении от диффузного;

$V_{\text{пом}}$  – акустическая постоянная помещения,  $\text{м}^3$ .

Найдем значение знаменателя в формуле (1) путем нескольких преобразований. Интенсивность падающего на установленную кабину звука  $I_{\text{пад}}$  можно принять равной интенсивности звука в расчетной точке при отсутствии кабины, рассчитываемой по формуле (2).

Звуковая мощность, излучаемая элементами установленной кабины, определяется следующим образом:

$$W_{\text{каб}} = I_{\text{пад}} \bar{\tau}_{\text{каб}} S_{\text{каб}}, \quad (3)$$

где:  $\bar{\tau}_{\text{каб}}$  – приведенная звукопроводность кабины;

$S_{\text{каб}}$  – суммарная площадь ограждений кабины, через которые звук проникает в кабину,  $\text{м}^2$ .

Интенсивность звука в РТ при установленной кабине:

$$I_{\text{РТ}}^{\text{с/к}} = \frac{4W_{\text{каб}}(1 - \bar{\alpha}_{\text{каб}})}{\Psi_{\text{каб}} A_{\text{каб}}}, \quad \text{Вт/м}^2, \quad (4)$$

где:  $\bar{\alpha}_{\text{каб}}$  – среднее значение коэффициента звукопоглощения в кабине;

$\Psi_{\text{каб}}$  – коэффициент, показывающий степень отклонения звукового поля в кабине от диффузного;

$A_{\text{каб}}$  – эквивалентная площадь звукопоглощения в кабине,  $\text{м}^2$ .

Подставив (3) в (4), получим:

$$I_{\text{РТ}}^{\text{с/к}} = \frac{W_{\text{ист}} \left[ \frac{\chi_{\text{ист}}}{2\pi r^2} + \frac{4}{\Psi_{\text{пом}} V_{\text{пом}}} \right] \bar{\tau}_{\text{каб}} S_{\text{каб}} 4(1 - \bar{\alpha}_{\text{каб}})}{\Psi_{\text{каб}} A_{\text{каб}}}, \quad (5)$$

Подставим (2) и (5) в (1):

$$\Delta L_{\text{каб}} = 10lg \frac{W_{\text{ист}} \left[ \frac{\chi_{\text{ист}}}{2\pi r^2} + \frac{4}{\Psi_{\text{пом}} B_{\text{пом}}} \right] \Psi_{\text{каб}} A_{\text{каб}}}{W_{\text{ист}} \left[ \frac{\chi_{\text{ист}}}{2\pi r^2} + \frac{4}{\Psi_{\text{пом}} B_{\text{пом}}} \right] \bar{\tau}_{\text{каб}} S_{\text{каб}} 4(1 - \bar{\alpha}_{\text{каб}})}, \quad (6)$$

После преобразований и логарифмирования определим эффективность звукоизолирующей кабины:

$$\Delta L_{\text{каб}} = 10lg \frac{A_{\text{каб}}}{S_{\text{каб}}} + 10lg \Psi_{\text{каб}} + 10lg \frac{1}{\bar{\tau}_{\text{каб}}} - 10lg(1 - \bar{\alpha}_{\text{каб}}) - 10lg 4, \text{ дБ}, \quad (7)$$

Учитывая известное соотношение ЗИ =  $10lg \frac{1}{\bar{\tau}_{\text{каб}}}$ , третий член формулы может быть заменен приведенной звукоизоляцией кабины  $\bar{\text{ЗИ}}_{\text{каб}}$ , равной:

$$\bar{\text{ЗИ}}_{\text{каб}} = 10lg \frac{\sum_{i=0}^n S_{\text{каб}_i}}{\sum_{i=0}^n S_{\text{каб}_i} 10^{-0,1 \text{ЗИ}_{\text{каб}_i}}}, \text{ дБ}, \quad (8)$$

где:  $S_{\text{каб}_i}$  – площадь  $i$ -го ограждения кабины,  $\text{м}^2$ ;

$n$  – число ограждений кабины;

$\text{ЗИ}_{\text{каб}_i}$  – звукоизоляция  $i$ -го элемента кабины, дБ.

С учетом  $10lg 4 = 6$  дБ, а также (8) формула акустической эффективности кабины, установленной в помещении:

$$\Delta L_{\text{каб}} = 10lg \frac{A_{\text{каб}}}{S_{\text{каб}}} + 10lg \Psi_{\text{каб}} + 10lg \frac{\sum_{i=0}^n S_{\text{каб}_i}}{\sum_{i=0}^n S_{\text{каб}_i} 10^{-0,1 \text{ЗИ}_{\text{каб}_i}}} - 10lg(1 - \bar{\alpha}_{\text{каб}}) - 6, \text{ дБ} \quad (9)$$

## 2. Применение метода расчета эффективности кабин, устанавливаемых в производственных помещениях

Для анализа достоверности разработанного метода расчета эффективности звукоизолирующей кабины проведены экспериментальные исследования, в результате которых получены данные, сведенные в таблицу 1. В составе натуральных измерений определены звукоизоляция отдельных элементов кабины, а также время реверберации [7, 8]. На основании измеренного времени реверберации определен коэффициент звукопоглощения в помещении (в кабине)  $\alpha_{\text{пом}}$  по следующей формуле:

$$\alpha_{\text{пом}}^f = \frac{0,16V}{S_{\text{пом}} T_{\text{пом}}^f}, \quad (10)$$

где:  $V$  – объем помещения,  $\text{м}^3$ ;  $S_{\text{пом}}$  – площадь ограждающих поверхностей,  $\text{м}^2$ .

Результаты расчета эффективности кабины ( $\Delta L_{\text{каб}}$ ) приведены в таблице 1. Сравнение расчетной эффективности кабины с результатами замеров показало высокую сходимость.

Таблица 1

Расчет акустической эффективности стационарной кабины

Исходные данные для расчета	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
$A_{\text{каб}} = \sum \alpha_i^f S_i$	4,7	2,4	7,1	9,1	8,7	5,7
$S_{\text{каб}}$	43,4	43,4	43,4	43,4	43,4	43,4
$B_{\text{каб}}$	5,9	2,9	9,2	12,3	12,2	7,7
$\Psi_{\text{каб}}$	0,2	0,06	0,2	0,3	0,3	0,2
Время реверберации, Т, с	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3
$\bar{\alpha}_{\text{каб}}$	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3
$10 \lg \frac{A_{\text{каб}}}{S_{\text{каб}}}$	-9,6	-12,5	-7,8	-6,8	-6,9	-8,8
$10 \lg \Psi_{\text{каб}}$	-8,6	-11,6	-6,7	-5,4	-7,5	-7,4
$10 \lg(1 - \bar{\alpha}_{\text{каб}})$	-0,4	-0,2	-0,7	-1,1	-0,9	-0,6
$10 \lg \frac{\sum_{i=0}^n S_{\text{каб}i}}{\sum_{i=0}^n S_{\text{каб}i} 10^{-0,1 \text{ЗИ}_{\text{каб}i}}}$	16,1	26,8	35,1	39,3	50,1	49,6
$\Delta L_{\text{каб}}$ (ф-ла 10)	7	4	15	22	32	27

### Заключение

1. Предложен новый метод расчета акустической эффективности звукоизолирующей кабины, в котором учтены приведенная звукоизоляция панелей кабины, среднее звукопоглощение в кабине, эквивалентная площадь звукопоглощения, площадь элементов кабины, а также степень отклонения звукового поля в помещении от диффузного.

2. Выполнены натурные замеры звукоизоляции и эффективности опытной кабины, в которой были получены необходимые данные для расчета и апробации формулы.

3. Результаты расчетов акустической эффективности кабины по разработанной формуле показали высокую сходимость с результатами экспериментов.

### Список литературы

1. Иванов Н.И., Шашурин А.Е. Учебное пособие «Защита от шума и вибрации», издание второе - дополненное и переработанное / – СПб.: Печатный Цех, 2019. - 284с.
2. Борьба с шумом на производстве: Справочник / Под общ. ред. Е.Я. Юдина. М.: Машиностроение, 1985.
3. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: Учебник / Н.И. Иванов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Логос, 2013. — 432 с.
4. Акустика: Учебник для вузов / Ш.Я. Вахитов, Ю.А.Ковалгин, А.А. Фадеев. Ю.П. Щевьев / Под ред. Ю.А.Ковалгина. М.: Горячая линия–Телеком, 2009.
5. Шашурин А.Е., Иванов Н.И., Тюрина Н.В., Курченко П.С. Использование метода преобразования звуковых полей для расчета эффективности шумозащитных конструкций // Noise Theory and Practice, 2020, №6 (4) – С. 128-134.
6. Ivanov N., Kurtsev G., Shashurin A. The method of sequential transformation of the sound fields Akustika. 2021. Т. 39. С. 143-149.
7. Боголепов И.И. Промышленная звукоизоляция: Л.: Судостроение, 1986.

8. Звукоизоляция и звукопоглощение: Учебн. пособие / Под ред. Г.Л. Осипова, В.Н. Бобылева. М.: АСТ, 2004.

### References

1. Ivanov N.I., Shashurin A.E. Textbook 'Protection from noise and vibration', second edition - expanded and revised / – St. Petersburg: Printing Shop. – 2019. – 284 p.
2. Noise control in industry: Handbook/ Ed. Yudin E.Ya.. М.: Mechanical Engineering, 1985.
3. Engineering acoustics. Theory and practice of noise control: Textbook / N.I. Ivanov. – 3rd ed.– М.: Logos, 2013. – 432 p.
4. Acoustics: Textbook for universities / Sh.Ya. Vakhitov, Yu.A. Kovalgin, A.A. Fadeev, Yu.P. Shchevyev / Ed. Yu.A. Kovalgina. М.: Hotline-Telecom, 2009.
5. Shashurin A.E., Ivanov N.I., Tyurina N.V., Kurchenko P.S. Using the method of transforming sound fields to calculate the effectiveness of noise protection structures // Noise Theory and Practice, 2020, No. 6 (4) – p p. 128-134.
6. Ivanov N., Kurtsev G., Shashurin A. The method of sequential transformation of the sound fields Akustika. 2021. T. 39. C. 143-149.
7. Bogolepov I.I. Industrial sound insulation: Leningrad: Sudostroenie, 1986.
8. Sound insulation and sound absorption: Textbook / Ed. G.L. Osipov, V.N. Bobylev. М.: AST, 2004.



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

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

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

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

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

**Ректор БГТУ:** Иванов Константин Михайлович, доктор технических наук, профессор.

### Кафедра "Экология и производственная безопасность"

Иванов Николай Игоревич — профессор кафедры "Экология и производственная безопасность" Балтийского государственного технического университета "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова, председатель диссертационного совета, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации. Автор свыше 400 научных трудов, в том числе около 10 учебников, справочников и монографий. Основные результаты научных исследований докладывал на международных конгрессах в Австралии, Австрии, Венгрии, Германии, Дании, Италии, Канаде, Китае, Нидерландах, Польше, Португалии, США, Финляндии, Швейцарии, Швеции и других странах.

Кафедра подготавливает специалистов по направлениям:

**Бакалавр** - Безопасность технологических процессов и производств

**Магистр** - Инженерная защита окружающей среды

**Диссертационный совет Д 212.010.01**

01.04.06 - Акустика

05.26.01 - Охрана труда (в машиностроении)

В диссертационном совете по специальности "Акустика" защищено 15 кандидатских диссертаций, 4 докторских, по специальности "Охрана труда" — 2 кандидатских и 2 докторских диссертаций.

Одной из ценностей кафедры является Международная акустическая библиотека им. Сэра Джеймса Лайтхила, которая была образована в 1998 году и насчитывает свыше 5000 единиц хранения в виде журналов, книг, справочников, трудов конгресса.





## Общество с ограниченной ответственностью "Институт акустических конструкций"

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

Организационная структура предприятия:

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

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

*"Наша компания обладает мощными научным и проектным подразделениями с современными технической и интеллектуальной базой, позволяющими выполнять проекты по шумозащите любой сложности от идеи до воплощения. В своей деятельности мы опираемся на лучшие традиции, сочетая их с передовыми технологиями и стараемся сделать наш окружающий мир тише."*

**Александр Шашурин**  
Генеральный директор

# 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