

ISSN 2412-8627

Vol. 7 No. 4

(12+)

# Noise

## Theory and Practice

Scientific Journal



IV  
2021

Acoustic Design Institute

# Редакционная коллегия

## Главный редактор

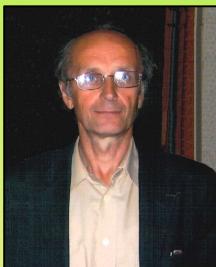
Иванов Николай Игоревич



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

## Заместитель главного редактора

Курцев Геннадий Михайлович



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

## Члены редакционной коллегии

Дроздова Людмила Филипповна



Кандидат технических наук, профессор кафедры "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 землеройно-транспортных 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. Пистоя ( 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 )

# Редакционная коллегия

2

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)

Тюрина Наталья Васильевна



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

Рассошенко Юлия Сергеевна



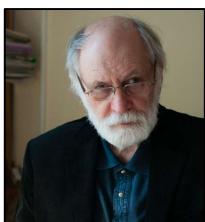
Кандидат технических наук, доцент кафедры "Экология и производственная безопасность" Балтийского государственного технического университета "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова (г. Санкт-Петербург, РФ)

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)

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)

# Editorial Board

3

## Editor-in-chief

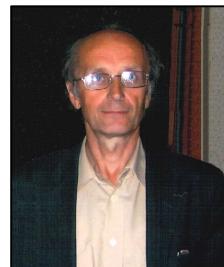
Nickolay Ivanov



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

## Deputy Editor-in-Chief

Gennadiy Kurzhev



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

## Members of the Editorial Board

Lyudmila Drozdova



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

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)

# Editorial Board

4

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)

Natalya Tyurina



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

Iuliia Rassoshenko



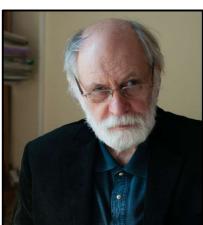
Ph.D. of Engineering Science, Senior Researcher of the Scientific Research Unit, Assistant Professor of the Department of Ecology and Industrial Safety of the Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov (St. Petersburg, Russia)

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)

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)

Научный журнал

Том 7 №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,  
ул. Бумажная, д.17, лит. А,  
пом. 436-1

+7 (812) 495-77-97

[www.noisetp.com](http://www.noisetp.com)

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

**Ответственный секретарь**

Никитенко А.А..

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

**Свидетельство**

ЭЛ № ФС 77-74057

## Содержание

**Montano W.A., Gushiken E.I.**

АНГЛ

Один год тщательного мониторинга с июля 2020 года во время пандемии COVID-19 в одном районе в Лиме, Перу

стр. 7-18

**Дроздова Л.Ф., Манохин В.Я.,  
Головина Е.И. Манохин М.В.**

РУС

Анализ влияния шума на операторов в литейном цехе  
стр. 19-25

**Казаков Л.И.**

РУС

Ячеекные модели концентрированных эмульсий сферических капель

стр. 26-36

**Шашурина А.Е., Курченко П.С.,  
Гогуадзе М.Г., Разаков Ж.П.**

РУС

Расчет шумозащитных ограждений для снижения шума операторов металлообрабатывающих станков

стр. 37-45

Scientific Journal

Vol. 7 No. 4

The founder

Limited liability company 'Acoustic Design Institute' (LLC 'ADI')  
in cooperation with Baltic State Technical University 'VOENMEH'  
named after D. F. Ustinov

**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**

17 building 'A' Bumazhnaya str.,  
office 436-1

+7 (812) 495-77-97

[www.noisetp.com](http://www.noisetp.com)

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

**Executive Secretary**

Nikitenko Anna

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

**The certificate of registration**

ЭЛ № ФС 77-74057

## Contents

**Montano W.A., Gushiken E.I.**

ENG

One year of sound monitoring  
since July 2020 during COVID-19 pandemic  
at one neighborhood in Lima, Peru

p. 7-18

**Drozdova L.F., Manokhin V.Ya.,  
Golovina E.I., Manokhin M.V.**

RUS

Analysis of the impact of noise on the operators  
in the foundry

p. 19-25

**Kazakov L.I.**

RUS

Cellular models of concentrated emulsions  
of spherical drops

p. 26-36

**Shashurin A.E., Kurchenko P.S.,  
Goguadze M.G., Razakov Zh.P.**

RUS

Calculation of noise barriers to reduce the noise  
of operators of metalworking machines

p. 37-45

UDC: 534

OECD: 01.03.AA

## One year of sound monitoring since July 2020 during COVID-19 pandemic at one neighborhood in Lima, Peru

Montano W.A.<sup>1\*</sup>, Gushiken E.I.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Technical Director, Gualeguaychu, Argentina

<sup>2</sup> Manager, Lima, Peru

<sup>1,2</sup> ARQUICUST Acoustic in situ Measurements Laboratory

### **Abstract**

In Lima City, it is not possible to know the sound levels previous to the COVID-19 because there is no governmental sound monitoring network. A private noise monitoring has been conducted since July 2020 at one neighborhood in this city, and, consequently, the changes in the soundscape produced by different sound levels that were a concern of the successive quarantines and lockdown due to COVID-19 have been registered. In the residential area under analysis, one of the noise sources comes from the circulation of cars and buses; the other one is produced by aircraft night overflights. The emergence of the virus new variants had forced the authorities to implement different social confinement orders prohibiting people's mobility; therefore, it was possible to measure the lowest possible sound levels ever. This paper analyzes in one neighborhood in Lima, Peru, the environmental sound levels since July 2020 during different periods due to the COVID-19.

**Keywords:** acoustics, sound monitoring, COVID-19, soundscape, aircraft noise, environmental sound levels, statistics.

### **Один год тщательного мониторинга с июля 2020 года во время пандемии COVID-19 в одном районе в Лиме, Перу**

Монтано В.А., Гушикен Е.И.

<sup>1</sup> Технический директор, г. Гуалегуайчу, Аргентина

<sup>2</sup> Управляющий, г. Лима, Перу

<sup>1,2</sup> Лаборатория натурных акустических измерений ARQUICUST

### **Аннотация**

В Лиме отсутствуют данные об уровнях звука до COVID-19, поскольку в городе отсутствует государственная сеть мониторинга звука. С июля 2020 года в одном из районов города проводится частный мониторинг шума. Были зарегистрированы изменения в звуковом ландшафте, которые были вызваны последовательными карантинами и блокировками из-за COVID-19. В анализируемом жилом районе один из источников шума исходит от движения автомобилей и автобусов; другой-от ночных полетов самолетов. Появление новых вариантов вируса вынудило власти ввести различные постановления о социальном ограничении, запрещающие мобильность людей; поэтому стало возможным измерить максимально низкий уровень шума, когда-либо существовавший. В этой статье анализируется уровень шума окружающей среды с июля 2020 года в одном районе Лимы, Перу в разные периоды COVID-19.

**Ключевые слова:** акустика, мониторинг звука, COVID-19, звуковой ландшафт, авиационный шум, уровни шума окружающей среды, статистика.

---

\*E-mail: wmontano@arquicust.com (Montano W.A.)

## Introduction

The emergence and rapid spread in 2020 of the SARS-CoV-2 (*Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2*) around the world, and now in 2021 its new variants surprised everyone equally. As of July 28<sup>th</sup>, 2021, unfortunately, Peru is at the top of the toll death worldwide per one million population (the US is at fifth place) [1] [2]; therefore, it is for this reason that health prevention policies are maintained throughout Peru, and specifically in Lima City there is a nighttime curfew, restriction of traffic on the streets in daytime, and a ban on circulation of private vehicles on Sundays, all of these to reduce and prevent the coronavirus spreading, which resulted in an overall reduction of the urban sound levels.

In 2020 the authorities of each country were forced to impose different public health measures to prevent contagions. The immediate international airports' shutdown was the first action taken, and to prevent the people movement to ensure their quarantine, the temporary closure of all nonessential activities and ban of vehicles circulation in streets disrupted traffic patterns; all of these were decisive for a radical change in the soundscape perception because the amount of background noise in cities has fallen substantially. It is now an emerging topic of paramount importance to register this unique soundscape motivated by an observable effect on urban sound levels.

The general lockdown around the world had a relevant impact on the cities' soundscape, associated with people's confinement and the closure of nonessential activities such as in-person education, leisure activities, tourism, etc. Worldwide acousticians had the opportunity to measure the atypical soundscape due to COVID-19-related sound levels reductions, and others have taken different initiatives to track the soundscape changes by means of questionnaires to citizens, perception, sound recordings, etc., to try and attain subjective data. Among dozens of articles about the sound levels decreasing due to COVID-19 lockdowns, it is possible to mention a few of them about: the noise from port in Ljubljana, Slovenia [3]; noise from music festival areas in Montreal, Canada [4]; aircraft noise in Lima, Peru [5]; in large cities of Italy [6] or Stockholm, Sweden [7]; global seismic noise [8]; in quiet residential areas in Tokyo, Japan [9]; and so on. Also, taxonomy and some method of sound levels evaluation for this unusual situation have been proposed from Spain by Ascencio et al. [10].

Because the present research does not have external funding, this article is limited to analyzing the soundscape changes at one neighborhood in Magdalena del Mar, one of the 43 Lima districts, produced by traffic noises during daytime and evening time and by airplane noises on night hours, from July 2020 to June 2021, and how the background environmental sound changed through the time span under analysis, accompanying the different phases of social confinement to prevent the virus dissemination.

## 1. Materials and methods

### 1.1. Defining the interval timewise to analyze the measurements by period

The soundscape analysis presented in this article covers four distinguishable selected timewise periods:

- Period 1: From July 1<sup>st</sup> to October 31<sup>st</sup>, 2020, COVID-19 first-wave partial reopening.
- Period 2: From November 1<sup>st</sup> (when the Lima international airport was opened) to December 31<sup>st</sup>, 2020.
- Period 3: From January 1<sup>st</sup> to February 28<sup>th</sup>, 2021, COVID-19 second-wave.
- Period 4: From March 1<sup>st</sup> to June 30<sup>th</sup>, 2021, flight restriction from Peru due to new variants and several partial closing/opening of nonessential activities.

The authors have been presented at '8<sup>th</sup> All-Russian Research to Practice Conference'

a complete analysis of the Lima soundscape registered before and during the first phase of the COVID-19 outbreak from March 1<sup>st</sup> to June 30<sup>th</sup>, 2020, which was published as an article in [3], but the location of the monitoring station since July 2020 onwards is different, therefore the results presented here cannot be directly compared with those.

### 1.2. Sound monitoring station location and description

The authors' office is in a neighborhood in Magdalena del Mar, one of Lima's City districts, and because of the surrounding urbanization is under the flight pass-by of airplanes which take off from Lima International Airport at 7.75 km from the monitoring location, they decided to measure the aircraft noise impact using their own noise monitoring station, which is on a fourth-floor rooftop, and this spot is in the middle of a block far away from any avenue ( $12^{\circ}05'24"S-77^{\circ}03'50"O$ ). This position (see Figure 1) is important because the city background noise is low enough on nighttime to measure properly the noise from passing airplanes flying to the west-south toward the Pacific Ocean to leave Lima City.

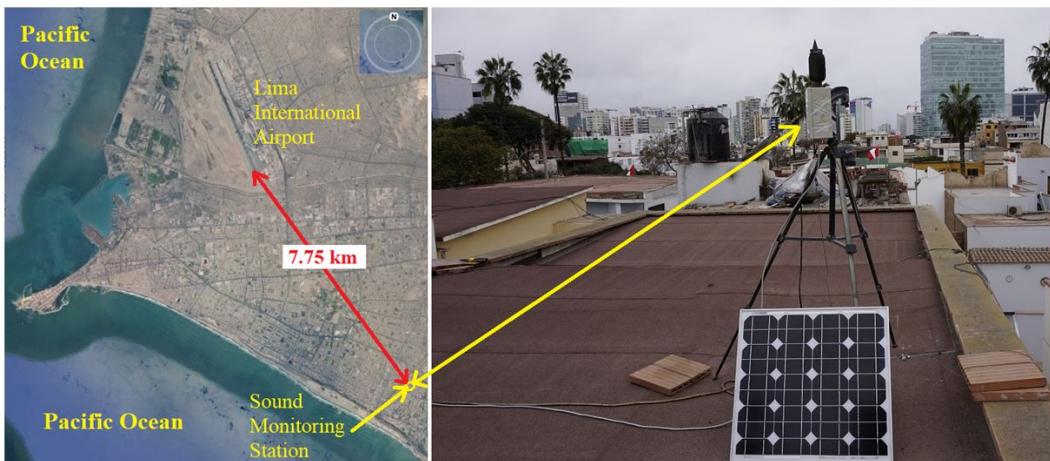


Fig. 1. Picture of Lima's airport and the monitoring station location

While the monitoring station is located to the south-east of the Lima airport runway, even so, it is within the aircraft noise footprint. Considering that this location is at 1.45 km from the Pacific Ocean, therefore, the marine inversion layer has an important effect on sound waves propagation: '*When planes fly above an inversion layer the aircraft noise reaching the ground is spread out farther at a lower intensity, when the aircraft is below the inversion layer the overall sound will be greater and spread over a farther distance*' [11].

The sound monitoring station being used is a TA120 noise sensor manufactured by CESVA® from Barcelona [12], the instrument comprises a Class 1 sound level meter that records the  $L_{Aeq,1s}$  and transmits it every second to NoisePlarform® cloud located in Spain, that allows to download the data in csv format.

### 1.3. Metrics and sound descriptors

To correlate the results of the sound levels registered in this survey with similar data from European studies, the day-evening-night  $L_{den}$  noise indicator as is defined in ISO 1996-1:2016 [13] is used in this article. To processes the data, modular programming was used and all functions were written into .NET framework computer language to use the large math library available on the Internet.

### 1.3.1. Sound levels metrics

The TA20 monitoring station uses the A and C-weighting curve defined in IEC 61672-1:2013 [14]. For  $L_{den}$  calculation of the day-evening-night noise indicator, equation 1 is used with the penalties as defined in Directive 2002/49/EC [15].

$$L_{den} = 10 \cdot \lg \frac{1}{24} \left( 12 \cdot 10^{\frac{L_{day}}{10}} + 4 \cdot 10^{\frac{L_{evening}+5}{10}} + 8 \cdot 10^{\frac{L_{night}+10}{10}} \right), dBA \quad (1)$$

The reference time intervals chosen to calculate the  $L_{den}$  are the following [15]:

- $L_{Day,12h}$  (or  $L_D$ ) is the continuous equivalent sound level from 06.00 h to 18.00 h,
- $L_{Evening,4h}$  (or  $L_E$ ) is the continuous equivalent sound level from 18.00 h to 22.00 h,
- $L_{Night,8h}$  (or  $L_N$ ) is the continuous equivalent sound level from 22.00 h to 06.00 h.

### 1.3.2. Statistical functions

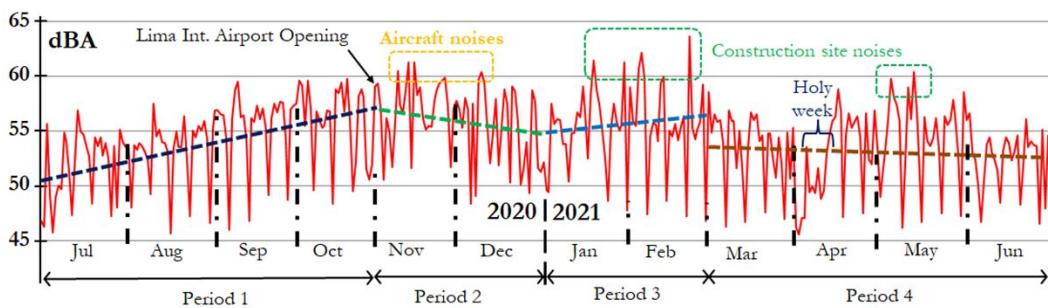
The statistical function used for this article are the following: (i) Percentile sound levels, they are not normalized descriptors yet, but there is an agreement about their meaning:  $L_{10}$ , 10% percentile level which describes the contribution of emergent sound events;  $L_{90}$ , 90% percentile level, used to estimate the background noise; (ii) trend, it is useful for extracting an underlying pattern of environmental sound level behavior in a time-history which would otherwise be partly or nearly completely hidden by the sound levels fluctuation; (iii) boxplot, it is a significant tool to conduct special analysis, where the boxes indicate the sound levels range in which the middle 50% of all sound levels registered are placed, into the box the solid lines indicate the median and the dashed lines the mean value, all points (above and below) are considered outliers that are further away than 1.5 times from the interquartile sound levels values; (iv) range, is the difference between the max and min sound levels.

### 1.3.3. Soundscape concept

For this article, the term ‘soundscape’ is used to describe a subjective acoustic environment perception as defined by the Canadian composer and acoustician Murray Schafer in the 1970s: ‘*psychoacoustic concept in which a soundscape is an acoustic environment as perceived and analyzed by humans*’ [16], and it is not used like ISO metric [17].

## 2. Soundscape after the economic opening on July 1<sup>st</sup>, 2020

The Peruvian government decreed on July 1<sup>st</sup>, 2020, a controlled opening to non-essential activities applying several public health procedures to ensure social distancing and to reduce the possibility of people meetings or family reunions. Figure 2 shows the  $L_{Aeq,24h}$  time-history (red line) from July 1<sup>st</sup>, 2020, to June 30<sup>th</sup>, 2021, in which is identified the four timewise periods previously indicated (that were marked by the advance of the COVID-19 and its new variants in 2021) from spreading, with their long-term trend (dashed lines).



*Fig. 2.  $L_{Aeq,24h}$  sound levels evolution from July 2020 to June 2021 [red line], and the statistical trend by each time period under analysis [dashed lines] (dB re 20  $\mu Pa$ )*

### **2.1. Period 1: Lima soundscape from July 1<sup>st</sup> to October 31<sup>st</sup>, 2020**

The state of emergency was partially lifted on July 1<sup>st</sup>, 2020, however all educational institutions remained closed (also some nonessential activities), and social life showed a gradual tendency ‘to return to normal,’ it is likely that the life patterns of people did not change significantly from those during the mandatory quarantine. The soundscape after this ‘abnormal’ opening (first-wave partial reopening) after the total quarantine and general lockdown, was really atypical because ‘the opening’ didn’t include those such as in-person education as well as leisure events.

Building construction and industrial activities started gradually, public passenger transport services were increased as the numbers of people were authorized to circulate in the street increased, and the authorities in some days had to backtrack on decisions by imposing momentary restrictions on people’s mobility in order to ensure an adequate social distancing among people. In Figure 2 for this period 1, it is observed that the  $L_{Aeq,24h}$  long-term trend (blue dashed line), regarding over the span of four months the opening to some non-essential activities, increased by 6.3 dBA.

Some important facts to highlight on the part of Lima’s authorities are that they imposed a restriction on circulation of buses and other public transportation on Sundays to ensure social distancing (it was requested for everyone to self-restraint at home) and reduce the possibility of people meetings or family reunions, then it is possible to see in Figure 2 a regular pattern due to those sanitary decision: The sound levels leap down regularly, meaning a noiseless soundscape perception on Sundays.

### **2.2. Period 2: Lima soundscape from November 1<sup>st</sup> to December 31<sup>st</sup>, 2020**

On November 1<sup>st</sup>, 2020, the Lima international airport has been partially opened only to commercial flights (internationals and nationals) but not for tourism proposes. It is interesting to observe in Figure 2 that the  $L_{Aeq,24h}$  long-term trend (green dashed line) for this period 2, shows a decreasing of 3.5 dBA, albeit the fact that there were aircraft flights every day; therefore, this overall reduction of the  $L_{Aeq,24h}$  is due to the fact that the authorities imposed several measures of partial closures and openings to gradually reduce people’s mobility by cars/buses throughout the city, which resulted in a consequent diminishing of the environmental noise. A few spikes were produced by some night aircraft overflights which are highlighted in the orange square. The most strict confinement order was given for Christmas Eve and New Year’s night, family reunions were not allowed for more than ten people, and as a results of these, the  $L_{Aeq,24h}$  of those days was lower than 50 dBA.

### **2.3. Period 3: Lima soundscape from January 1<sup>st</sup> to February 28<sup>th</sup>, 2021**

In Peru the year 2021 started with the COVID-19 second wave, and then Peruvian authorities were forced to restrict people's mobility even more. January 2021 began with a confinement order which was tightened between January 15<sup>th</sup> and 31<sup>st</sup>, 2021 because people were reluctant to self-restraint at home. Despite this, the number of contagions continued to rise, the quarantine measure was extended to February 2021, reinforcing controls to prevent people from circulation in the streets on Sundays, introducing a ban on the circulation of buses and private cars.

In Figure 2 for this period 3, it is observed that the  $L_{Aeq,24h}$  long-term trend (light-blue dashed line) increased around 1.2 dBA. As a result of the street construction works carried out around the block where the monitoring station is located, anomalous noise events have resulted in an erratic behavioral pattern (see in Figure 2 the green square); therefore, it is possible to be sure that the increase in the noise levels are due to the aforementioned works in this time span.

### **2.4. Period 4: Lima soundscape from March 1<sup>st</sup> to June 30<sup>th</sup>, 2021**

Many US and European airports were temporarily closed to flights from Peru due to the resurgence of COVID-19 in this country. At this fact, the fewer night flights, the lower the noise, and taking into account that during the days prior to and during the entire Holy Week there was an almost total ban on people's mobility (to reduce the spread of the COVID-19 variants), very low noise levels were achieved within this time span. In Figure 2 for this period 4, it is observed that the  $L_{Aeq,24h}$  long-term trend (dark-orange dashed line) displays a gradual decay of the sound levels around 1.2 dBA. In 3.2 a further analysis will be presented.

## **3. Analysis of sound levels measurements**

The evaluation that provides the more noticeable information is the soundscape comparison between period 1 vs. period 4, basically because during March-June 2021, the Peruvian economy was almost entirely open (except for in-person classes and leisure activities) and the Lima international airport was operating but not for tourism; and despite all this, the noise levels were lower than those of the July-October 2020 interval.

### **3.1. Soundscape evaluation using percentile sound levels**

Since January 2021, the Peruvian government have imposed a strict curfew between 20.00 h and 06.00 h (in April it was prolonged from 22.00 h to 04.00 h), which resulted in a low background sound levels during nighttime, providing a soundscape perception as never before imagined. Figure 3 shows the  $L_{90}$  sound levels evolution as follow: Daytime background represented by the  $L_{90,Day}$  (blue line), being the 90<sup>th</sup> percentile level calculated for daytime hours (from 06:00 h to 18:00 h); nighttime background represented by the  $L_{90,Night}$  (red line), being the 90<sup>th</sup> percentile level calculated for nighttime hours (from 22:00 h to 06:00 h). The  $L_{90,Evening}$  is not presented here because it has a random behavior, consequently it does not offer conclusive information.

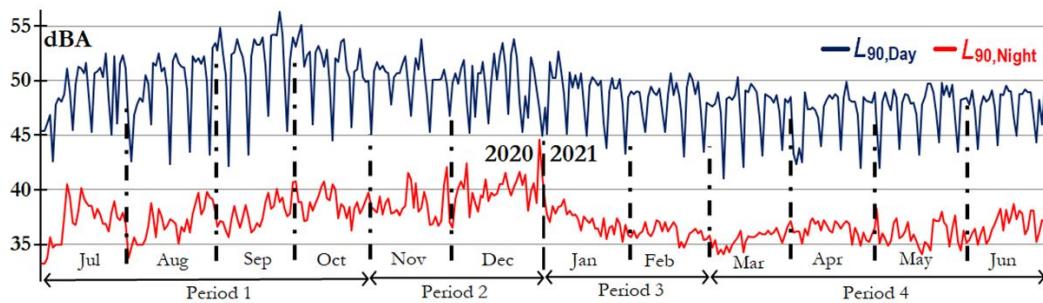


Fig. 3.  $L_{90,D}$  and  $L_{90,N}$  sound levels evolution from July 2020 to June 2021 (dB re 20  $\mu\text{Pa}$ )

With respect to daytime background sound levels evolution, it is noteworthy that they have a fluctuating behavior (for period 1 among 42.2 dBA and 56.3 dBA and for period 4 among 41 dBA to 50.3 dBA). Despite the sound levels decreased on Sundays and increased again on Mondays, a gradual diminution over time can be determined since January 1<sup>st</sup>.

The  $L_{90,N}$  sound levels evolution increased close to 5 dBA considering period 1 and period 2 together. On the contrary, since January to June 2021 the  $L_{90,N}$  sound levels have fallen and the  $L_{90,N}$  shows a median pattern around of  $36.5 \pm 2.3$  dBA, being this as a consequence of the elimination of some night flights besides the ban on circulation in streets and strict curfew. The nighttime background sound levels were low as never before.

### 3.2. $L_D$ , $L_E$ and $L_N$ boxplots comparison of each period under analysis

The boxplot is a significant tool to conduct special analysis, some examples of the use of this statistical function for this unusual environmental situation (marked by the COVID-19-related sound levels variation) are presented in [18] [19]. Figure 4 shows the sound levels averaged by  $L_D$ ,  $L_E$  and  $L_N$  of each period under analysis (from July 1<sup>st</sup>, 2020, to June 30<sup>th</sup>, 2021) distributed by means of a boxplot.

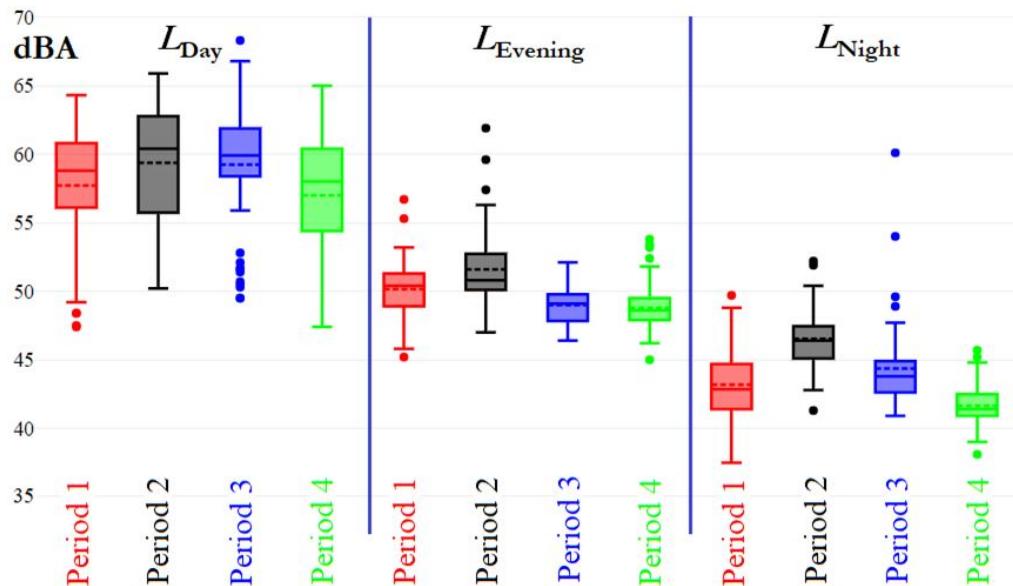


Fig. 4.  $L_D$ ,  $L_E$  and  $L_N$  boxplots ordered by period under analysis from July 1<sup>st</sup>, 2020, to June 30<sup>th</sup>, 2021 (dB re 20  $\mu\text{Pa}$ )

In Figure 4 it is observed the following:

- **The daytime levels ( $L_{Day}$ )**, whereas period 1 and period 4 have almost the same range ( $\pm 0.5$  dBA), the 50% of the sound levels in period 4 (with the economy very nearly open and the Lima airport operating) are more distributed than period 1 (with the economy partially closed and the Lima international airport under lockdown). For period 2 the sound levels are more distributed than period 1. For period 3 the sound levels are concentrated around 60 dBA, but this was a consequence of noise from construction activities on surrounded streets where the sound monitoring station is installed.

- **The evening time levels ( $L_{Evening}$ )**, for all periods the quartiles Q1 and Q3, which are ‘close’ to each other the 50% of their sound levels are highly concentrated around 50 dBA ( $\pm 2.5$  dBA), this is because people had to be at their homes before the curfew, so the traffic noise levels due to cars and buses were high.

- **The nighttime levels ( $L_{Night}$ )**, in period 1 during the first-wave partial reopening, the range of  $L_N$  levels is 12.2 dBA and its median is  $42.9 \pm 1.6$  dBA. On the contrary, in period 4 (although the night aircraft overflights) the range of  $L_N$  levels is 7.2 dBA and its median is  $41.4 \pm 0.8$  dBA, meaning that they are lower and highly concentrated than in period 1 when the Lima airport was under lockdown.

#### 4. Summary of sound levels measurements registered during one year

##### 4.1. $L_{den}$ sound levels comparison among periods under analysis

In order to understand the COVID-19-related sound levels reduction in this Lima City district, due to different confinement orders, lockdown and curfew, Table 1 summarizes straightforward the  $L_D$ ,  $L_E$ ,  $L_N$  sound levels of each period and their corresponding  $L_{den}$  noise indicator calculated by means of Eq. 1.

*Table 1*

$L_{den}$  noise indicator comparison for each period under analysis from July 1<sup>st</sup>, 2020, to June 30<sup>th</sup>, 2021 (dB re 20  $\mu Pa$ )

Period	$L_D$	$L_E$	$L_N$	$L_{den}$
Period 1: July 1 <sup>st</sup> to October 31 <sup>st</sup> , 2020. ‘Abnormal’ opening and limited de-escalation	59.0	50.6	43.9	57.3
Period 2: November 1 <sup>st</sup> to December 31 <sup>st</sup> , 2020. Airport opening (not for tourism)	61.1	52.8	47.1	59.7
Period 3: January 1 <sup>st</sup> to February 28 <sup>th</sup> , 2021. New curfew order and partials lockdowns	61.1	49.2	46.8	59.2
Period 4: March 1 <sup>st</sup> to June 30 <sup>th</sup> , 2021. Flight restriction from Peru due to new strains + strict night curfew	58.3	49.0	42.1	56.4

In Table 1 it is interesting to note that:

- In period 2 the  $L_D$ ,  $L_E$  and  $L_N$  are higher than in period 1, because more people in streets were allowed to circulate due to de-escalation and more nonessential activities were partially open, besides the Lima International airport was opened.

- In period 3 the  $L_D$  was equal than period 2, despite the restriction on circulation, but it was as a consequence of the construction noises (it was commented above).

- In period 4 the sound levels are 1 dBA lower (with the economy very nearly open and the Lima airport operating) compared to period 1 (with the economy partially closed and the Lima international airport under lockdown).

- In period 4 the  $L_N$  is 5 dBA lower than in period 2, due to the strict nighttime curfew. It has to keep in mind, also, that the quantity of flights in period 4 are much higher than in period 2, and yet despite this, the sound level is lower; therefore, the noise levels were produced by cars/busses traffic.

- In period 4 the  $L_D$  and  $L_E$  are 3 dBA lower than period 2, basically as a consequence of the health policies about restriction on circulation in streets, not because ‘there is less movement of people.’

#### 4.2. $L_{den}$ of one year of sound monitoring during the COVID-19

As previously mentioned, the results of this monitoring can be correlated with European studies, Table 2 summarizes the  $L_{den}$  results by Equation 1, averaged by each semester and annually from July 1<sup>st</sup>, 2020, to June 30<sup>th</sup>, 2021.

Table 2

$L_{den}$  noise indicator summary from July 1<sup>st</sup>, 2020, to June 30<sup>th</sup>, 2021 (dB re 20  $\mu Pa$ )

Interval time	$L_D$	$L_E$	$L_N$	$L_{den}$
July 1 <sup>st</sup> to December 31 <sup>st</sup> , 2020 (first semester)	60.0	51.5	45.3	58.4
January 1 <sup>st</sup> to June 30 <sup>th</sup> , 2021 (second semester)	59.6	49.1	44.1	57.7
July 1 <sup>st</sup> , 2020 to June 30 <sup>th</sup> , 2021	59.8	50.4	44.7	58.0

#### 5. A suggestion to make about the special soundscape derived from people’s mobility restriction: ‘Car-free Sunday’ after the pandemic is overcome

Important health policies decisions have been implemented by Lima’s authorities to note on Sundays (which is still maintained today), a temporary scenario defined by (i) a restriction on circulation in the avenues of buses/private cars from 07.00 h to 13.00 h, and (ii) people self-restrain at home, all of this in order to reduce outdoor people’s mobility and preventing the COVID-19 spreading. Whereby, the soundscape on Sundays is healthier; therefore, it is important to analyze the unique opportunity that these policies offer temporarily. Figure 5 shows a comparison of daytime [06.00 h–18.00 h] sound levels between weekdays (red box) and Sundays (light-blue box) from July 1<sup>st</sup>, 2020, to June 30<sup>th</sup>, 2021.

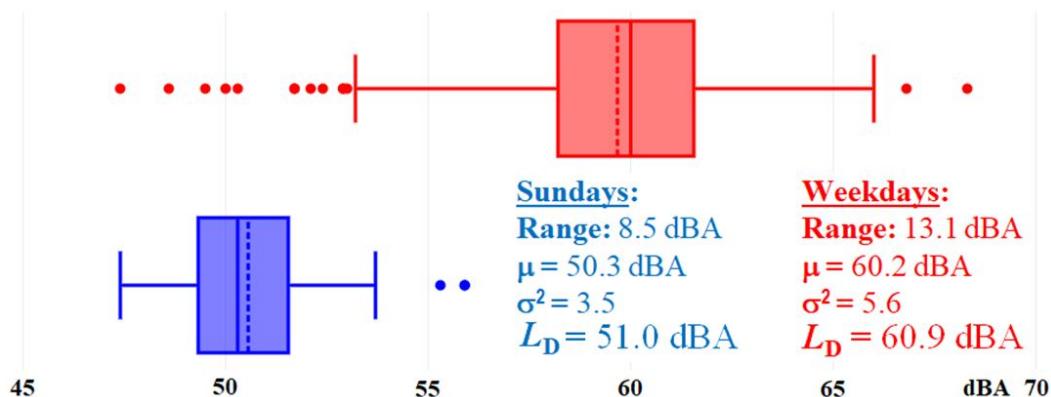


Fig. 5.  $L_D$  Sundays vs  $L_D$  weekdays from July 1<sup>st</sup>, 2020, to June 30<sup>th</sup>, 2021 (dB re 20  $\mu Pa$ )

For the weekdays’ boxplot, the holidays are not considered as data for the analysis. In Fig. 5 it is observed that 50% of the sound levels on Sundays are more concentrated at

lower values than on weekdays. The  $L_D$  Sundays are 10 dBA fewer, which means at least 500% off acoustic energy under the environmental scenario described above concurrently during the COVID-19 pandemic. At this point, a forthcoming suggestion to make to the governmental authorities by the authors is having a ‘Car-free Sundays’ after the pandemic is overcome, to minimize the risk on people of having noisy soundscape on a day that it supposes should be quiet.

## Conclusions

In this paper the authors have presented the measurements results of the sound levels in this location with the sound pressure level of the Magdalena del Mar as a whole. Unlike the case of Lima City, the results shown here are only an example of this neighborhood (and those which are under the aircraft footprint of Lima international airport) and are not intended to be generalized since differences in behavioral patterns are likely to occur in other areas of Lima City, depending on the attributes of the people living there and the surrounding environment. Rather, it is easy to imagine that each city neighborhood has its own unique behavior and that it is not easy to generalize the results from a specific one to others, but it is considered necessary to accumulate examples from various locations to gain insight.

The noise levels that were registered during the COVID-19 at this residential neighborhood in Lima City, seems to be quite different with those reported in other large cities, mainly because there was no gradual lockdown de-escalation in Peru, on the contrary, the activities and people’s mobility increased but applying a strong traffic circulation restriction in the streets, then, this is why in June 2021 the night noise level is lower than in July 2020, although in 2021 there is much more commercial activity than a year ago, also taking into account that the Lima airport now is currently open: This may seem like a paradox, but it is certainly not.

It has to be noted that the traffic restriction measures and the strict nighttime curfew are the key to retain the noise level low during nighttime hours; therefore, aircraft overflight noise is one of the components of environmental noise, but it is not a sound source capable of raising sound levels averaged at night; perhaps overflights that occur at dawn, when people are in the most sensitive sleeping period, can be considered a nuisance.

The sound levels immediately after the lifting of the quarantine in July 2020 was high, perhaps it was due to people needing to leave their homes after four months of mandatory confinement, and also maybe rather unusual behavior of people to reorganize their activities under the atypical social situation signed by the COVID-19 outbreak. The sound levels during the four periods under analysis have fluctuated as a function of several factors; one of them was defined by cars and buses circulation because as the streets and avenues were empty, they circulated at high speed.

The COVID-19 outbreak has changed the way of life sending everyone to confinement for months. The Worldwide acousticians have been able to register a distinct soundscape during the lockdown, being this exceptional situation a historic fact which will be important to keep the sound monitoring survey going into the future for further comprehension of what the SARS-CoV-2 had done on urban sound issues.

Unfortunately: (i) the results obtained in this survey cannot be directly correlated with sound monitoring carried out in other cities of the world, because the ‘random’ measures of temporary closures and openings taken by the Peruvian authorities have caused the sound levels to vary ‘disorderly,’ i.e., it is not possible to analyze the long-term trend sound evolution, but only for undersized periods of time; (ii) it was not possible to conduct a subjective investigation, such as questionnaires, because it is forbidden to talk to people anywhere (closed or even open spaces) yet.

Sharing to Peruvian authorities the information on healthy environmental sound levels that the authors had registered is still in debt because the actual governmental priorities are to put under control the COVID-19 outbreak, so when the time it comes, the authors would communicate their findings about the soundscape which took place in this Lima district (as a private research with no external funding), in order to develop some possible environmental and health policies about the impact of aircraft noise in this residential neighborhood.

Finally, a suggestion to make is ‘Car-free Sundays,’ because it has been objectively demonstrated with sound measurements of this survey that the soundscape on Sundays is really healthy due to a restraint on circulation in streets; then, establishing a vehicle circulation restriction on Sundays morning after the pandemic is overcome should be an environmental policy not only for Lima City but also (why not) a worldwide policy.

This work was made by the authors during their free time and both monitoring and reporting don't have any external financial/funding support; this article is part of a particular interest in research and is a *corporate social responsibility* of ARQUICUST (the authors' company). The authors declare there are no conflicts of interest.

### Acknowledgements

The authors want to thank Anna Nikitenko, editors and reviewers of the Scientific Journal ‘Noise Theory and Practice’; also to thank and acknowledge Marçal Serra Joan, Jordi Casamajo and Joan Casamajo from CESVA.

### References

1. WHO (2021) «Global data-Peru», World Health Organization, available at: <https://covid19.who.int/region/amro/country/pe>, (accessed July 28, 2021).
2. Statista (2021) «Coronavirus (COVID-19) deaths worldwide per one million population as of July 28, 2021, by country», Global No.1 Business Data Platform, available at: <https://www.statista.com/statistics/1104709/coronavirus-deaths-worldwide-per-million-inhabitants/>, (accessed July 28, 2021).
3. Ćurović, Jeramb, Murovec, Novaković, Rupnik, Prezelj (2021), «Impact of COVID-19 on environmental noise emitted from the port», Elsevier. Science of the Total Environment 756-144147, available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144147>
4. Steele, D.; Guastavino, C. (2021), «Quieted City Sounds during the COVID-19 Pandemic in Montreal», Int. J. Environ. Res. Public Health 2021, 18, 5877, available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph18115877>
5. Montano, W.A.; Gushiken, E.I. (2021), «COVID-19 and soundscape changes due to the lockdown. The case of Lima, Peru», AKUSTIKA 49, 2021. – pp. 48-55, available at: <http://doi.org/10.36336/akustika20213946>
6. Bartalucci, C.; Bellomini, R.; Luzzi, S.; Pulella, P.; Torelli G. (2021) «A survey on the soundscape perception before and during the COVID-19 pandemic in Italy», De Gruyter. Noise Mapp. 2021; 8:65–88, available at: <https://doi.org/10.1515/noise-2021-0005>
7. Rumpler, R.; Venkataraman, S.; Göransson, P. (2021) «An observation of the impact of CoViD-19 recommendation measures monitored through urban noise levels in central Stockholm, Sweden», Elsevier. Sustainable Cities and Society 63 (2020) 102469, available at: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102469>

8. Lecocq, T. et al. (2020) «Global quieting of high-frequency seismic noise due to COVID-19 pandemic lockdown measures», *Science* 11 Sep 2020, Vol. 369, Issue 6509, pp. 1338-1343, available at: <https://doi.org/10.1126/science.abd2438>
9. Sakagami, K. (2020) «A note on the acoustic environment in a usually quiet residential area after the ‘state of emergency’ declaration due to COVID-19 pandemic in Japan was lifted: Supplementary survey results in post-emergency situations», De Gruyter. *Noise Map.* 7(1), 192–198, available at: <https://doi.org/10.1515/noise-2020-0016>
10. Asensio, C., Aumond, P., Can, A., Gasc, L., Lercher, P., Wunderli, J.-M., Lavandier, C., de Arcas, G., Ribeiro, C., Muñoz, P., Licitra, G. (2020), «A taxonomy proposal for the assessment of the changes in soundscape resulting from the Covid-19 lockdown», *Int. J. Environ. Res. Public Health* 17(12), 4205, available at: <https://doi:10.3390/ijerph17124205>
11. Murray, S. (2015) «Meteorological effects change sound propagation», *Doors to arrival. Research, analysis and comments on the FAA’s SoCal NextGen metroplex project and environmental assessment*, available at: <http://doorstoarrival.com/meteorological-effects-change-sound-propagation/>, (accessed July 21, 2021).
12. CESVA (2021) «TA120 Noise measuring sensor for Smart Solutions», CESVA instruments SLU, available at: <https://www.cesva.com/en/products/sensors-terminals/TA120/>, (accessed July 21, 2021).
13. ISO (2016) «ISO 1996-1 Acoustics. Description, measurement and assessment of environmental noise - Part 1: Basic quantities and assessment procedures», ISO. Geneva, Switzerland.
14. IEC (2013) «IEC 61672-1:2013. Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications», IEC. Geneva, Switzerland.
15. EU (2002) «Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise», EUR-Lex Official Journal. Brussels, Europe, available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32002L0049> (accessed July 21, 2021).
16. Schafer, M.R. (1977) «The Soundscape: Our sonic environment and the tuning of the world», Rochester, Vt. Destiny books, available at: [https://quote.ucsd.edu/sed/files/2014/01/schafer\\_1.pdf](https://quote.ucsd.edu/sed/files/2014/01/schafer_1.pdf).
17. ISO (2014) «ISO 12913-1:2014 Acoustics – Soundscape – Part 1: Definition and conceptual framework», ISO. Geneva, Switzerland.
18. Rey-Gozalo G, Barrigón-Morillas JM (2016) «Analysis of Sampling Methodologies for Noise Pollution Assessment and the Impact on the Population», International journal of environmental research and public health, available at: [https://openi.nlm.nih.gov/detailedresult?img=PMC4881115\\_ijerph-13-00490-g003&query=&req=4](https://openi.nlm.nih.gov/detailedresult?img=PMC4881115_ijerph-13-00490-g003&query=&req=4), (accessed July 21, 2021).
19. Alsina-Pagès, R.A.; Bergadà, P.; Martínez-Suquía, C. (2021) «Changes in the soundscape of Girona during the COVID lockdown», *JASA* 149(3416), available at: <https://doi.org/10.1121/10.0004986>

УДК: 534.23; 504:351.77

OECD: 01.03.AA

## Анализ влияния шума на операторов в литейном цехе

Дроздова Л.Ф.<sup>1</sup>, Манохин В.Я.<sup>2</sup>, Головина Е.И.<sup>3</sup>, Манохин М.В.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> К.т.н., профессор кафедры «Экология и производственная безопасность»,  
БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

<sup>2</sup>Д.т.н., профессор, <sup>3</sup>К.т.н., зам. декана по уч. работе, ст. преподаватель, <sup>4</sup>К.т.н., доцент  
<sup>2,3,4</sup> Кафедра «Техносферная и пожарная безопасность», ФГБОУ ВО «Воронежский  
государственный технический университет», г. Воронеж, РФ

### Аннотация

Комплексная оценка воздействия шума в литейном цехе является основной целью работы.

По результатам анализа представлены основные неблагополучные участки с превышением допустимого уровня шума – участки выбивных решеток и участки очистки литья. Предложены рекомендации по выбору технических мероприятий, включающих рациональное размещение оборудования, режим их работы, установку акустических экранов и звукоизолирующих перегородок у незащищенных рабочих мест, а также рациональный подбор эквивалентной площади звукопоглощения помещения цеха, которые позволяют решить задачу создания безопасных условий производства.

Исследовано улучшение условий труда операторов литейного цеха за счет снижения шума на их рабочих местах: увеличение звукопоглощения в самом корпусе дробеструйной камеры и установка шумозащитных экранирующих конструкций для ограждения участков с наиболее интенсивным шумом.

**Ключевые слова:** шум, вибрация, литейное производство, дробеструйный участок, шумозащитные экранирующие конструкции, звукопоглощение.

### *Analysis of the impact of noise on the operators in the foundry*

*Drozdova L. F.<sup>1</sup>, Manokhin V. Ya.<sup>2</sup>, Golovina E. I.<sup>3</sup>, Manokhin M. V.<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> *PhD, professor of the Department "Ecology and Industrial Safety", BSTU "VOENMEH"  
named after D. F. Ustinov, St. Petersburg, Russia*

<sup>2</sup> *DSc, professor, <sup>3</sup> PhD, deputy Dean for Academic Affairs, senior lecturer, <sup>4</sup> PhD, associate professor  
<sup>2,3,4</sup> The Department of Technosphere and Fire Safety, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia*

### *Abstract*

*A comprehensive assessment of the impact of noise in the foundry is the main goal of the work.*

*Based on the analysis results, the main unsuccessful areas with an excess of the permissible noise level are presented - areas of knock-out gratings and areas of casting cleaning. Recommendations are proposed for the selection of technical measures, including the rational placement of equipment, their mode of operation, the installation of acoustic screens and sound-insulating partitions at unprotected workplaces, as well as a rational selection of the equivalent sound absorption area of the workshop premises, which will solve the problem of creating safe production conditions.*

*The improvement of the working conditions of foundry shop operators by reducing noise at their workplaces is studied: an increase in sound absorption in the body of the shot blasting chamber itself and the installation of noise-proof shielding structures for fencing areas with the most intense noise.*

**Keywords:** *noise, vibration, foundry, shot blasting, noise protection shielding structures, sound absorption.*

## Введение

Работа посвящена комплексной оценке воздействия пыли, шума и вибрации на обслуживающий персонал литейного производства. Сложность технологии, наличие вредных факторов производства в рабочей зоне операторов негативно сказывается на качестве воздушной среды литейного цеха, что приводит к нарушению требований санитарно-гигиенических норм. Специальное оборудование, которое находится в литейном цехе, дополнительно выделяет в воздух рабочих зон большой объем тепла. Накопление излишков тепла в свою очередь приводит к изменениям микроклимата внутри производственных помещений литейных цехов.

Улучшение качества изделий литья, долговечность и надежность продукции производства в большей степени зависят от чистоты поверхностей. В промышленных процессах наиболее распространены такие способы обработки, как: дробеструйный, дробемётный и дробемётно-дробеструйный в дробеметных барабанах и камерах. Это оборудование относится к группе наиболее экологически неблагополучного: большое количество выделяемой пыли, наличие дроби, подаваемой под давлением, которые сопровождаются высокими уровнями излучаемого шума и ростом вибрационной активности. Следует отметить, технически сложным являются приведение шума и вибрации до нормативных величин. Вредное воздействие шума и вибрации на организм человека проявляются в различном виде, это и шумовая (неврит слухового нерва) и вибрационная болезни, и повышение утомляемости, и снижение производительности и качества труда. А в настоящее время шумовая и вибрационная болезни в литейном производстве занимают второе и третье место в списке профессиональных заболеваний [1].

В литейном производстве причиной наибольшего числа профессиональных заболеваний является воздействие чрезмерного шума от используемого оборудования на операторов литейного цеха. Наиболее высокий коэффициент заболеваемости невритом слухового органа в литейных цехах приходится на профессии обрубщиков, формовщиков, стерженщиков, плавильщиков и чистильщиков литья, работающих с дробеструйным оборудованием.

### 1. Характеристики шума на участках литейных цехов

Одной из задач настоящего исследования является анализ экспериментальных характеристик шума в рабочей зоне литейного производства при выполнении различных операций.

Результаты исследований показали, что параметры шума основных видов литейного производства не соответствуют допустимым нормам шума на рабочих местах. Наибольшие превышения допустимых уровней звука [2] отмечаются на рабочих местах (по уровням звукового давления): стержневые и формовочные встряхивающие машины - на 12-23 дБ, выбивные решетки - на 17-26 дБ, обрубоочно-очистное оборудование - на 16-27 дБ [3].

Спектры шума от основного оборудования литейного цеха, являются широкополосными. При этом звуковое поле в рабочих зонах цеха неоднородно в связи с тем, что основные источники шума имеют различные мощности и характеры спектра. Машины с ударным режимом работы излучают непостоянный шум с максимальным уровнем звуковой мощности в области средних и высоких частот, которые наиболее чувствительны и опасны для человека.

В таблице приведены значения индекса загрязнения по шумовому фактору Кш для различных участков литейного производства, полученные расчетным путем на основе эмпирических данных. Как видно из таблицы наибольшее воздействие от шумового

фактора отмечается на участках формовщиков, выбивальщиков форм, обрубщиков и чистильщиков литья [3].

Таблица 1

Значение индекса загрязнения по шумовому фактору на участках литейных цехов с различным характером производства

Участок цеха	Значения $K_{ш}$ по шумовому фактору в цехах с характером производства		
	Массовым	Серийным	Мелкосерийным
Шихтовый	0,22	0,16	0,11
Плавильно-заливочный	0,79	0,38	0,22
Смесеприготовительный	0,71	0,35	0,23
Стержневой	0,45	0,19	0,35
Формовочный	1,43	0,79	0,53
Выбивной	2,74	2,13	1,27
Обрубоочно-очистной	2,67	2,46	1,66
Цветного литья	-	0,22	-
Литья гильз	-	0,47	-
Кокильный	-	-	0,82
Среднее значение по цеху	1,29	0,80	0,65

Небольшой уровень автоматизации и механизации процессов литейных цехов серийного производства позволяет выбрать более рациональное и, как правило, изолированное расположение оборудования, создающего повышенные уровни шума. Следует отметить, что в этих цехах работа оборудования происходит циклично и, соответственно, эквивалентные уровни шума будут иметь меньшие значения. Особенно это можно наблюдать в литейном цехе, работающем в ступенчатом режиме. Выбивные решетки работают в третью смену, когда происходит только выбивка отливок из форм. Поэтому актуальным является разработка рекомендаций по снижению шума в литейном цехе за счет обоснованного выбора технических мероприятий, включающих рациональное размещение оборудования, режим их работы, установку акустических экранов и звукоизолирующих перегородок у незащищенных рабочих мест, а также рациональный подбор эквивалентной площади звукопоглощения помещения цеха за счет увеличения площади звукопоглощающей облицовки стен цеха и применения штучных звукопоглотителей [4].

## 2. Источники шума дробеструйных камер и пути его снижения

Одной из основных задач настоящего исследования являлось выделение основных источников излучаемого шума на очистных участках, имеющих наибольший индекс загрязнения по шумовому фактору  $K_{ш}$ , в частности в дробеструйной камере.

Одним из самых распространенных методов обработки поверхности металлических деталей является дробеструйная или пескоструйная зачистка. Данная технологическая операция проводится в дробеструйной камере и позволяет качественно отшлифовать литье.

Комплексный подход по снижению уровня шума и пыли, излучаемых в процессе дробеструйной очистки, включающий: определение основных излучающих шум источников, оценку формирующегося звукового поля в камере, учет звукоизоляции

стенок камеры, выбор материалов, обеспечивающих снижение шума, а также установка шумозащитных конструкций позволяет последовательно решить задачу создания безопасных условий производства [5].

На рисунке 1 представлена разработанная авторами схема дробеструйной камеры в шумозагашенном исполнении.

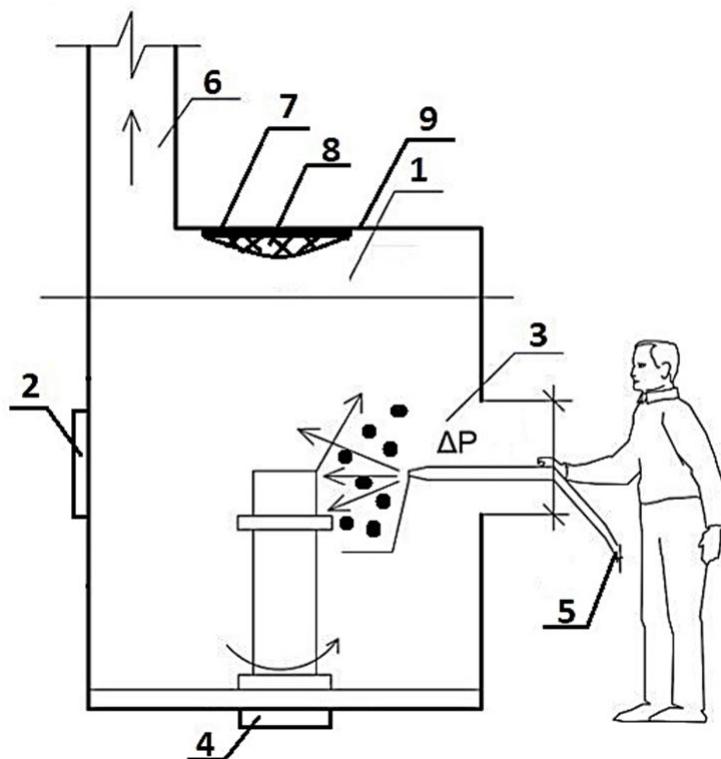


Рис. 1. Схема дробеструйной камеры литейного производства:

- 1 – дробеструйная камера; 2 – загрузочный сектор очищаемых деталей; 3 – окно подачи дробеструйного аппарата; 4 – технологическое отверстие для удаления дроби;
- 5 – магистраль сжатого воздуха; 6 – воздуховод с циклоном; 7 – ВДМ (виброремфирующий материал); 8 – ЗПМ (звукопоглощающий материал);
- 9 – конструкционный материал.

Процесс дробеструйной очистки функционирует в односменном режиме с незначительными по времени технологическими перерывами. Дробеструйную очистку отливок производят в камерах, представляющих собой закрытую металлическую конструкцию размером 2000 x 2000 x 2500 мм, внутренняя обшивка камеры выполнена из стального листа толщиной 3 мм и покрыта ВДМ (резиной) толщиной 10 мм, на резину нанесен звукопоглощающий материал толщиной 30 мм. В верхней части камера подсоединяется посредством патрубка диаметром 630 мм к местной вытяжной вентиляции, которая содержит циклон ЦН-11 для удаления пыли [6].

Как показали исследования, дробь диаметром в среднем до 2 мм потоком сжатого воздуха со скоростью 30 м/с направляется через окно подачи на поверхность изделия. Принцип действия простого нагнетательного дробеструйного аппарата основан на работе герметически закрытого резервуара, в котором находится дробь под давлением сжатого воздуха. Под действием силы тяжести и давления сжатого воздуха, дробь подается в камеру. При этом происходит излучение шума повышенной интенсивности.

Основное воздействие на формирование звукового поля в дробеструйной камере оказывает шумоизлучение струи подаваемого под давлением сжатого воздуха, то

есть аэродинамический шум. Для снижения аэродинамического шума используются различные звукопоглощающие элементы с криволинейными каналами. Снижение аэродинамического шума возможно также путем улучшения аэродинамических характеристик машин.

Авторами предложены технические мероприятия по снижению уровней шума за счет оптимального подбора звукоизолирующих и звукопоглощающих элементов корпусов дробеструйной установки. Перечисленные мероприятия обеспечивают снижение уровней шума внутри установки и снижают шум вне корпуса дробеструйной установки.

Экспериментальные исследования коэффициентов поглощения большого количества облицовочных материалов в октавных полосах спектра звуковых частот, представленные в работе [7], позволили создать базу данных, необходимых для проектирования камер дробе- и пескоструйной обработки. Методика инженерного расчета акустических характеристик литейного оборудования дала возможность создать систему автоматизированного проектирования дробе- и пескоструйных установок, минимизированных по уровню шума за счет подбора оптимального сочетания толщины стен и марок облицовочного материала.

Авторами предложено сохранить в обеструйной камере толщину конструкционного материала, равной 3 мм, имеющийся слой приклеенной резины толщиной 10 мм оставить, как дополнительную звукоизоляцию стенок камеры. Кроме того, резиновая прослойка будет выполнять роль вибродемпфирования. Дополнительно на внутреннюю поверхность камеры предлагалось нанести звукопоглощающий материал.

Эффективность применения звукопоглощающих материалов тесно связана с толщиной основного материала корпуса и тем, насколько он герметичен. Анализ коэффициентов звукопоглощения различных материалов показал, что наибольшей эффективностью обладают минеральные ваты и войлок (кроме низких частот). Было предложено использовать в качестве ЗПМ звукопоглощающие базальтовые маты (БЗМ) толщиной 30 мм, представляющие собой изделия, изготовленные из рыхлого слоя холстов базальтовых супертонких волокон в оболочке из стеклянной ткани. Коэффициент звукопоглощения таких материалов в средне-высокочастотном диапазоне колеблется от 0,5 до 0,88.

Проведенный предварительный расчет снижения шума на рабочем месте оператора при использовании предлагаемых мероприятий показал о невозможности ожидаемого шума достичь требований санитарных норм. В результате выполнения указанных выше мероприятий уровень шума на рабочем месте оператора дробеструйной обработки вне камеры может быть снижен не более, чем на 8-10 дБ в нормируемом диапазоне частот.

Для минимизации уровня шума необходимы правильные технологические мероприятия по внедрению дистанционного управления и работа по герметизации и изоляции оборудования, что позволяет сократить шумовое загрязнение сразу в источнике его образования [8].

Авторы также предлагают установить шумозащитные экранирующие конструкции и оградить участки рабочих мест с наиболее интенсивным шумом, что позволит увеличить диссиацию и сформировать звуковую защиту для более благоприятного акустического поля в литейном цехе, и в частности и на рабочем месте оператора дробеструйной камеры. [9]

Кроме того, уже отмечалось, что в литейных цехах цикличная работа оборудования влияет на значение эквивалентных уровней шума на рабочем месте оператора дробеструйного процесса, которые будут иметь меньшие значения.

Так как, несмотря на предложенные мероприятия достичь нормативных

значений по показателям имеющегося шума в настоящий момент без изменения конструкции дробеструйной камеры технически невозможно, то для оператора может быть предложено использование средства индивидуальной защиты – защитный шлем с противошумовыми наушниками [10].

### **Заключение**

В работе представлен анализ влияния шума на операторов литейного производства и исследовано улучшение условий труда операторов литейного цеха за счет снижения шума на их рабочих местах. Рассмотренная тема является важной социально-экономической, экологической и научно-технической проблемой. К основным результатам можно отнести следующие выводы:

1. Определены участки литейного производства с превышением допустимого уровня шума – участки выбивных решеток и участки очистки литья методом дробеструйной обработки.
2. Установлено превышение уровней шума на рабочих местах операторов камер пескоструйной и дробеструйной обработки по сравнению с нормативными значениями на 4-18 дБ.
3. Авторами предлагаются рекомендации по снижению шума на рабочем месте оператора дробеструйной камеры за счет снижения шума в самой камере и установки шумозащитных экранирующих конструкций для ограждения участков с наиболее интенсивным шумом.

### **Список литературы**

1. Орехова Л. И. Экологические проблемы литейного производства / А.И. Орехова // Экология производства. – 2005. – № 1. – С. 2–3.
2. 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах», раздела III «Шум на рабочих местах».
3. Лазаренко А.М., Хорева С.А., Мельниченко В.В. Оценка влияния шума на работающих в литейном производстве / Литье и металлургия. № 3(62), 201. С 194-195.
4. Капустянский А.М. Методы снижения шума при проектировании и эксплуатации дробеструйных и пескоструйных установок, дис. ... кандидата технических наук: 05.26.01 / Капустянский А.М. Ростов-на-дону, 2001. – 181 с.
5. Пачурин Г. В. Влияние комплексного воздействия вредных факторов литейного производства на уровень профессионального риска / Г. В. Пачурин, А. А. Филиппов // XXI век. Техносферная безопасность. – 2017. – № 2 – С. 10–17.
6. Головина Е.И. Улучшение условий труда за счет снижения запыленности от дробеструйного участка литейного производства: дис. ... кандидата технических наук: 05.26.01 / Е.И. Головина. Ростов-на-дону, 2020. – 111 с.
7. Дроздова Л.Ф., Чеботарева Е.Ю., Кудаев А.В. Обзор современных компрессорных установок и материалов для снижения их шума. NOISE Theory and Practice. Vol. 4, №2, 2018. с. 11-20.
8. Новиков В. П. Автоматизация литейного производства: в 2 ч. / В. П. Новиков. – М. : МГИУ, 2006. – Ч. 1 : Управление литейными процессами. – 292 с.
9. Трухов Ю. А. Технология литейного производства: литье в песчаные формы / А. П. Трухов, Ю. А. Сорокин, М. Ю. Ершов ; под ред. А. П. Трухова. – М. : Академия, 2005. – 524 с.

10. Соловьева О.С., Элькин Ю.И. Защита жилой застройки от шума стройплощадок NOISE Theory and Practice. Vol. 6, №3, 2020. с. 7-15.

## References

1. Orekhova LI Ecological problems of foundry production / AI Orekhova // Ecology of production. - 2005. - No. 1. - P. 2-3.
2. 2.2.4.3359-16 "Sanitary and Epidemiological Requirements for Physical Factors at Workplaces", Section III "Noise at Workplaces".
3. A.M. Lazarenko, S.A. Khoreva, V.V. Melnichenko Assessment of the impact of noise on workers in the foundry / Casting and metallurgy. No. 3 (62), 201. P 194-195.
4. Kapustyansky A.M. Methods for noise reduction in the design and operation of shot blasting and sandblasting installations, dis. ... candidate of technical sciences: 05.26.01 / Kapustyanskiy A.M. Rostov-on-Don, 2001. - 181 p.
5. Pachurin GV Influence of the complex impact of harmful factors of foundry production on the level of professional risk / GV Pachurin, AA Filippov // XXI century. Technosphere safety. - 2017. - No. 2 - P. 10-17.
6. Golovina E.I. Improving working conditions by reducing dust from the shot blasting section of the foundry: dis. ... candidate of technical sciences: 05.26.01 / E.I. Golovina. Rostov-on-Don, 2020. - 111 p.
7. Drozdova L.F., Chebotareva E.Yu., Kudaev A.V. An overview of modern compressor units and materials to reduce their noise. NOISE Theory and Practice. Vol. 4, No. 2, 2018. p. 11-20.
8. Novikov VP Automation of foundry production: in 2 hours / VP Novikov. - M.: MGU, 2006. - Part 1: Management of foundry processes. - 292 p.
9. Trukhov Yu. A. Technology of foundry production: casting in sand forms / A. P. Trukhov, Yu. A. Sorokin, M. Yu. Ershov; ed. A.P. Trukhova. - M.: Academy, 2005. - 524 p.
10. Solovieva OS, Elkin Yu.I. Protecting residential buildings from construction site noise NOISE Theory and Practice. Vol. 6, No. 3, 2020. p. 7-15.

УДК: 534.138

OECD: 01.03.AA

## Ячеечные модели концентрированных эмульсий сферических капель

Казаков Л.И.

К.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, г. Владивосток, РФ

### Аннотация

Рассмотрены в линейном приближении гармонические вынужденные колебания вязких капель в вязкой несжимаемой жидкости в условиях стесненного обтекания в ячеичной монодисперсной модели эмульсии под действием переменных массовых сил, сил поверхностного натяжения и осцилляций вмещающей жидкости. Учтены только вязкие потери. Изучено поведение пробной капли в ячейке с жесткой невесомой сферической оболочкой. На этой основе путем поочередного задания эвристических граничных условий Квашнина, Хаппеля и Кувабары на воображаемой сферической поверхности ячейки получены решения для этих трех вариантов эмульсии. Найдены низко- и высокочастотные приближения. Последние справедливы для всех четырех разновидностей эмульсий. При малой концентрации из них следуют разные частные случаи движения одиночной капли в жидкости, например, формулы Рыбчинского-Адамара, Кёнига и другие. Для произвольных концентраций капель получены общие формулы для комплексной плотности вариантов моделей эмульсий при распространении в них звуковых колебаний.

**Ключевые слова:** концентрированные эмульсии, гармонические колебания, вязкие потери, ячеечные модели, граничные условия, комплексная плотность.

### *Cellular models of concentrated emulsions of spherical drops*

Kazakov L.I.

PhD, leading researcher, Pacific Oceanological Institute named after V. I. Il'ichev FEB RAS, Vladivostok, Russia

### *Abstract*

*Harmonic forced oscillations of viscous droplets in a viscous incompressible liquid under conditions of constrained flow in a monodisperse cell model of an emulsion under the action of variable mass forces, surface tension forces, and oscillations of external liquid are considered in a linear approximation. Only viscous losses are taken into account. The behavior of a test drop in a cell with a rigid weightless spherical shell is studied. On this basis, by alternately setting the heuristic boundary conditions of Kvashnin, Happel, and Kuvabara on an imaginary spherical cell surface, solutions for these three emulsion variants are obtained. Low-and high-frequency approximations are found. The latter are true for all four types of emulsions. At a low concentration, they are followed by various special cases of the movement of a single drop in a liquid, for example, the Rybchinsky-Hadamard, Koenig, and others formulas. For arbitrary droplet concentrations, general formulas are obtained for the complex density of variants of emulsion models when sound vibrations propagate in them.*

**Keywords:** concentrated emulsions, harmonic oscillations, viscous losses, cell models, boundary conditions, complex density.

## Введение

Большинство известных теоретических работ по распространению звука в дисперсных средах (например, [1–4]) относится к средам с малыми объемными концентрациями взвешенных частиц, не превышающими нескольких процентов, когда большие расстояния между частицами позволяют считать их обособленными и невзаимодействующими друг с другом. Эксперимент обычно подтверждает теорию при концентрации частиц до 9%. Далее происходит резкое их расхождение [2]. Однако работ, исследующих концентрированные дисперсные среды, гораздо меньше (например, [5–9]).

Наиболее адекватной моделью для описания дисперсных сред произвольных концентраций является ячечная модель. Но она имеет крупные недостатки: 1) применимость лишь к монодисперсным средам, когда все включения одинаковы по размерам, форме и свойствам; 2) упорядоченность структуры, не характерная для реальных сред; 3) неопределенность требуемых граничных условий на поверхности ячейки, которые неизвестно как задавать. Обычно используют следующие найденные эвристическим путем граничные условия: жесткая оболочка ячейки [10, с.152, 518]; условие Квашнина [11, с.154]; условие Хаппеля [10, с.447]; условие Кувабары [10, с.450].

Рассмотрим поступательные гармонические колебания капли в окружении подвижной жесткой оболочки, либо других таких же капель, под действием переменных массовых сил, сил поверхностного натяжения и осцилляций внешней жидкости. Обе жидкости будем считать вязкими, несжимаемыми и ограничимся линейным приближением уравнения Навье–Стокса. Капиллярное давление предположим настолько большим, что при колебаниях капля сохраняет сферическую форму. Будем учитывать только вязкие потери энергии, пренебрегая тепловыми. Сначала решим задачу о колебаниях капли, помещенной в центр жесткой сферической оболочки. Затем будут исследованы колебания собственно ячеичных моделей монодисперсной системы капель [10] при трех указанных выше вариантах граничных условий на поверхности ячейки.

### 1. Жесткая оболочка ячейки

Исходные уравнения гармонических колебаний в записи для внешней жидкости имеют вид (опускаемый временной множитель  $-e^{-i\omega t}$ ) [12, с.73]:

$$-i\omega\rho\vec{\nu} = \rho\vec{F} - \nabla P + \eta\Delta\vec{\nu}, \quad \operatorname{div}\vec{\nu} = 0, \quad (1.1)$$

где  $\omega$  – циклическая частота;  $\rho$  и  $\eta$  – плотность и вязкость жидкости;  $P$  – комплексная амплитуда давления;  $\vec{\nu}$  и  $\vec{F}$  – амплитуды, соответственно, колебательной скорости и внешней силы, действующей на единицу массы жидкости. В аналогичных уравнениях для внутренней области величины, характеризующие свойства и движение жидкости в капле, снабдим штрихами.

Обозначим амплитуды колебательных скоростей капли как целого и жесткой оболочки относительно неподвижной системы координат, соответственно, через  $\vec{U}$  и  $\vec{V}$ , считая  $\vec{V}$  заданной. Векторы  $\vec{U}$ ,  $\vec{V}$  и  $\vec{F}$  будем полагать направленными вдоль полярной оси сферической системы координат, начало которой совмещено с центром колеблющейся капли. Такая система отсчета неинерциальна, поэтому в ней следует учесть действие массовых сил инерции, записав

$$\vec{F} = -\frac{d\vec{U}}{dt} + \vec{G} = i\omega\vec{U} + \vec{G}, \quad (1.2)$$

где  $\vec{G}$  – ускорение от возможных "обычных" массовых сил.

В принятой системе координат на внутренней поверхности оболочки радиуса  $R_1$  и на поверхности капли радиуса  $R$  должны выполняться следующие кинематические и динамические граничные условия:

$$\begin{aligned} \nu_r(R_1, \theta) &= (V - U) \cos \theta, & \nu_\theta(R_1, \theta) &= (U - V) \sin \theta, \\ \nu_r(R, \theta) &= \nu'_r(R, \theta) = 0, & \nu_\theta(R, \theta) &= \nu'_\theta(R, \theta), \\ -P(R, \theta) + 2\eta \left( \frac{\partial \nu_r}{\partial r} \right)_{r=R} - \frac{2}{R}(A + B\nu_0) \cos \theta &= -P'(R, \theta) + 2\eta' \left( \frac{\partial \nu'_r}{\partial r} \right)_{r=R}, \\ \eta \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \nu_r}{\partial \theta} + \frac{\partial \nu_\theta}{\partial r} - \frac{\nu_\theta}{r} \right)_{r=R} - \frac{1}{R}(A + B\nu_0) \sin \theta &= \eta' \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \nu'_r}{\partial \theta} + \frac{\partial \nu'_\theta}{\partial r} - \frac{\nu'_\theta}{r} \right)_{r=R}, \end{aligned} \quad (1.3)$$

где  $\theta$  - полярный угол. Здесь первая пара условий означает, что оболочка с прилегающей к ней жидкостью движется относительно капли со скоростью  $(\vec{V} - \vec{U})$ . Следующие два требования - это обращение в нуль нормальных и равенство тангенциальных скоростей жидкостей на поверхности неподвижной в целом и недеформируемой капли. В динамических граничных условиях величина  $A + B\nu_0$  характеризует переменную вдоль границы раздела жидкостей часть поверхностного натяжения  $\alpha(\theta)$  согласно соотношению

$$\alpha(\theta) = \alpha_0 + (A + B\nu_0) \cos \theta, \quad \alpha_0 = \text{const}, \quad (1.4)$$

где  $\nu_0 = \nu_\theta(R, \pi/2)$  - тангенциальная скорость жидкостей на экваторе капли; значения величин  $A$  и  $B$  должны быть найдены отдельно, при рассмотрении конкретного механизма изменения поверхностного натяжения. При этом может оказаться, что  $A = 0$ , а  $B \neq 0$ , как, например, в случае заряженных жидкокометаллических капель в растворе электролита в отсутствие электрического поля [7].

Учитывая осесимметричность задачи, решение уравнений движения (1.1), удовлетворяющее граничным условиям (1.3), будем искать в виде [13, с.397]

$$\begin{aligned} \nu_r &= f(r) \cos \theta, & \nu_\theta &= \varphi(r) \sin \theta, & P &= \eta \left[ \psi(r) + \frac{\rho F}{\eta} r \right] \cos \theta, \\ \nu'_r &= f'(r) \cos \theta, & \nu'_\theta &= \varphi'(r) \sin \theta, & P' &= \eta' \left[ \psi'(r) + \frac{\rho' F}{\eta'} r \right] \cos \theta, \end{aligned} \quad (1.5)$$

где

$$F = i\omega U + G. \quad (1.6)$$

Подстановка этих выражений в уравнение (1.1) приведет к системе дифференциальных уравнений относительно функций  $f(r), \varphi(r), \psi(r)$ , решив которую найдем [7]:

$$\begin{aligned} f(r) &= C_1 \frac{i\kappa r - 1}{(i\kappa r)^3} e^{i\kappa r} + C_2 \frac{i\kappa r + 1}{(i\kappa r)^3} e^{-i\kappa r} + b_1 \frac{R^3}{r^3} + b_2, \\ \varphi(r) &= -\frac{C_1}{2} \frac{1 - i\kappa r + (i\kappa r)^2}{(i\kappa r)^3} e^{i\kappa r} + \frac{C_2}{2} \frac{1 + i\kappa r + (i\kappa r)^2}{(i\kappa r)^3} e^{-i\kappa r} + b_1 \frac{R^3}{2r^3} - b_2, \\ \psi(r) &= b_1 \frac{(i\kappa)^2 R^3}{2r^2} - b_2 (i\kappa)^2 r, \end{aligned} \quad (1.7)$$

где  $C_{1,2}, b_{1,2}$  - неопределенные постоянные;  $\kappa = \sqrt{\frac{i\omega\rho}{\eta}} = (1+i)\sqrt{\frac{\omega\rho}{2\eta}}$  - волновое число сдвиговых волн внешней жидкости.

В формулах (1.7) для функций  $f'(r), \varphi'(r), \psi'(r)$  следует положить  $b'_1 = 0, C'_1 = C'_2$ , чтобы устранить расходимости в начале координат. В результате получим:

$$\begin{aligned} f'(r) &= \frac{2C'_1}{(\kappa' r)^3} (\sin \kappa' r - \kappa' r \cos \kappa' r) + b'_2, \\ \varphi'(r) &= \frac{C'_1}{(\kappa' r)^3} \{ [1 - (\kappa' r)^2] \sin \kappa' r - \kappa' r \cos \kappa' r \} - b'_2, \\ \psi'(r) &= -b'_2 (i\kappa')^2 r, \end{aligned} \quad (1.8)$$

где  $\kappa' = \sqrt{\frac{i\omega\rho'}{\eta'}} = (1+i)\sqrt{\frac{\omega\rho'}{2\eta'}}$  - волновое число сдвиговых волн жидкости капли.

Подставив выражения (1.5), (1.7), (1.8) в граничные условия (1.3), придем к системе из восьми уравнений относительно неопределенных постоянных  $C_1, C_2, b_1, b_2, C'_1, b'_2$  и искомых скоростей  $U$  и  $\nu_0$ , которую упростим до системы двух уравнений относительно  $C_1$  и  $C_2$ :

$$[2\eta D(y) + 3\eta'_*] w(-y) \frac{C_1}{y^3} - [2\eta D(-y) + 3\eta'_*] w(y) \frac{C_2}{y^3} = \frac{2}{3}A + (2\eta + 3\eta'_*)b_1, \quad (1.9)$$

$$w(-z) \frac{C_1}{y^3} - w(z) \frac{C_2}{y^3} = b_1, \quad (1.10)$$

где

$$D(y) = \frac{1 - y + \frac{y^2}{2} - \frac{y^3}{6}}{1 - y + \frac{y^2}{3}},$$

$$3\eta'_* = 3\eta'Q(x) + B,$$

$$Q(x) = \frac{(6 - x^2)x \cos x - (6 - 3x^2) \sin x}{3[(3 - x^2) \sin x - 3x \cos x]},$$

$$w(y) = \left(1 + y + \frac{y^2}{3}\right) e^{-y}, \quad (1.11)$$

$$b_1 = \frac{2(\rho' - \rho)FR^2}{3\eta y^2}, \quad (1.12)$$

$$x = \kappa'R, \quad y = i\kappa R, \quad z = i\kappa R_1. \quad (1.13)$$

Решение системы уравнений (1.9), (1.10) дает:

$$\frac{C_{1,2}}{y^3} = \frac{\{2\eta[w(\pm z) - D(\mp y)w(\pm y)] + 3\eta'_*[w(\pm z) - w(\pm y)]\}b_1 + \frac{2}{3}w(\pm z)A}{2\eta[D(y)w(z)w(-y) - D(-y)w(-z)w(y)] + 3\eta'_*[w(z)w(-y) - w(-z)w(y)]}, \quad (1.14)$$

где в числителе верхние знаки при аргументах  $y$  и  $z$  функций  $w$  и  $D$  относятся к  $C_1$ , а нижние - к  $C_2$ .

Зная  $b_1, C_1, C_2$  найдем значения остальных неизвестных и в первую очередь скоростей

$$\nu_0 = -\frac{3}{2} \left[ w(-y) \frac{C_1}{y^3} - w(y) \frac{C_2}{y^3} - b_1 \right], \quad (1.15)$$

$$U = -\frac{C_1}{y^3} [(1-y)e^y - (1-z)e^z\xi^3] + \frac{C_2}{y^3} [(1+y)e^{-y} - (1+z)e^{-z}\xi^3] + (1-\xi^3)b_1 + V, \quad (1.16)$$

где

$$\xi = \frac{R}{R_1}. \quad (1.17)$$

## 2. Ячеичные модели эмульсий

Представим эмульсию из одинаковых капель в виде упорядоченной структуры ячеек типа гексагональной плотнейшей упаковки. Каждая капля находится в центре элементарной ячейки в окружении вмещающей жидкости. Гидродинамическое и тепловое взаимодействие капли с соседними каплями осуществляется через воображаемую внешнюю границу ячейки, приближенно аппроксимируемую сферической поверхностью радиуса  $R_1$ . Этот радиус выбирают так, чтобы величина  $\xi^3$  совпадала с объемной концентрацией капель в эмульсии. Таким образом, свойства эмульсии определяет поведение пробной капли в ячейке.

Задача о движении капли в ячеичной модели аналогична рассмотренной задаче о ячейке с жесткой оболочкой. Разница лишь в задании иных граничных условий на поверхности ячейки. Как это сделать точно неизвестно, хотя бы потому, что не определена и сама граница. А она, конечно, много сложнее, чем приближенно замещающая ее простая сферическая поверхность. Поэтому задание точных условий вряд ли возможно и приходится пробовать разные более или менее правдоподобные варианты для сферической поверхности ячейки. На поверхности же капли граничные условия остаются прежними. Будем считать, что в полюсах ячейки (при  $\theta = 0, \pi$ ) скорость внешней жидкости задана и равна  $V$  в неподвижной системе координат. Тогда единственным граничным условием, подлежащим замене, оказывается условие для тангенциальной скорости жидкости на границе ячейки.

Сначала предположим, что на поверхности ячейки выполняется условие **Квашнина**

$$\frac{\partial \nu_\theta}{\partial r} = 0, \quad \text{или} \quad \left. \frac{d\varphi}{dr} \right|_{r=R_1} = 0, \quad (2.1)$$

т.е. минимум тангенциальной скорости по радиальной координате. По-видимому, это имеет место, по крайней мере, в двенадцати точках сферической поверхности ячейки - там, где она соприкасается с ближайшими соседними ячейками. Дифференцируя функцию  $\varphi(r)$  из (1.7), убедимся, что условие (2.1) может быть записано в виде

$$w_1(-z) \frac{C_1}{y^3} - w_1(z) \frac{C_2}{y^3} = b_1, \quad (2.2)$$

где

$$w_1(z) = \left[ 1 + z + \frac{z^2}{3} + \frac{z^2}{3}(1+z) \right] e^{-z}. \quad (2.3)$$

Формула (2.2) заменяет аналогичное выражение (1.10) и совместно с уравнением (1.9) позволяет определить постоянные  $C_1$  и  $C_2$  формулами (1.14) с той только разницей, что в них  $w(z)$  нужно заменить на  $w_1(z)$  по формуле (2.3). Дальнейшие вычисления проводятся так же, как и в случае с жесткой оболочкой.

Рассмотрим теперь условие **Хаппеля**. Оно состоит в требовании, чтобы на границе ячейки обращались в нуль касательные напряжения

$$\sigma_{\theta r} = \eta \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \nu_r}{\partial \theta} + \frac{\partial \nu_\theta}{\partial r} - \frac{\nu_\theta}{r} \right) \Big|_{r=R_1} = 0,$$

или

$$\left. \frac{d\varphi}{dr} \right|_{r=R_1} - \frac{f(R_1) + \varphi(R_1)}{R_1} = 0. \quad (2.4)$$

Используя соотношения (1.7), представим (2.4) в виде

$$w_2(-z) \frac{C_1}{y^3} - w_2(z) \frac{C_2}{y^3} = b_1, \quad (2.5)$$

где

$$w_2(z) = \left[ 1 + z + \frac{z^2}{3} + \frac{z^2}{6}(1+z) \right] e^{-z}. \quad (2.6)$$

Сравнивая выражения (2.5) и (1.10), видим, что теперь в формулах (1.14) для  $C_1$  и  $C_2$  нужно заменить  $w(z)$  на  $w_2(z)$  по формуле (2.6).

Условие **Кувабары** постулирует отсутствие завихренности течения на границе ячейки  $\text{rot } \vec{\nu}(R_1, \theta) = 0$ , или

$$\left( \frac{\partial \nu_\theta}{\partial r} + \frac{\nu_\theta}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \nu_r}{\partial \theta} \right) \Big|_{r=R_1} = 0.$$

Отсюда по (1.7) найдем:

$$\frac{d\varphi}{dr} \Big|_{r=R_1} + \frac{f(R_1) + \varphi(R_1)}{R_1} = 0$$

и

$$C_1(1-z)e^z = C_2(1+z)e^{-z}.$$

Это заменяет уравнение (1.10). Выражения для  $C_1$  и  $C_2$  в данном случае можно получить из формул (1.14), если в них вместо  $w(z)$  подставить

$$w_3(z) = (1+z)e^{-z},$$

а в числителях считать  $w(y) = w(-y) = 0$ .

Низкочастотные приближения для скоростей  $U$  и  $\nu_0$ , справедливые при

$$\frac{|y^2|}{2} = \frac{\omega \rho R^2}{2\eta} \ll 1, \quad \frac{|z^2|}{6} = \frac{\omega \rho R_1^2}{6\eta} \ll 1,$$

получены в виде

$$U = \frac{\frac{2(\rho'-\rho)R^2F}{3\eta} [\eta\varphi_n(\xi) + \eta'_*\varphi'_n(\xi)] - \frac{2}{3}A\alpha_n(\xi)}{2\eta\psi_n(\xi) + 3\eta'_*\psi'_n(\xi)} + V, \quad (2.7)$$

$$\nu_0 = \frac{\frac{(\rho'-\rho)R^2F}{3}\alpha_n(\xi) - A\psi'_n(\xi)}{2\eta\psi_n(\xi) + 3\eta'_*\psi'_n(\xi)}, \quad n = 0, 1, 2, 3. \quad (2.8)$$

Здесь индекс  $n = 0$  относится к ячейке с жесткой оболочкой,  $n = 1, 2, 3$  – к вариантам ячеичной модели в том порядке, как они рассмотрены выше. Функции аргумента  $\xi$  имеют вид:

$$\begin{aligned}
\varphi_0(\xi) &= 1 - \frac{3}{2}\xi + \frac{3}{2}\xi^5 - \xi^6, \quad \varphi'_0(\xi) = 1 - \frac{9}{4}\xi + \frac{5}{2}\xi^3 - \frac{9}{4}\xi^5 + \xi^6, \\
\psi_0(\xi) &= 1 + \frac{3}{2}\xi^5, \quad \psi'_0(\xi) = 1 - \xi^5, \quad \alpha_0(\xi) = 1 - \frac{5}{2}\xi^3 + \frac{3}{2}\xi^5; \\
\varphi_1(\xi) &= 1 - \frac{9}{8}\xi - \frac{3}{8}\xi^5 + \frac{1}{2}\xi^6, \quad \varphi'_1(\xi) = 1 - \frac{27}{16}\xi + \frac{5}{8}\xi^3 + \frac{9}{16}\xi^5 - \frac{1}{2}\xi^6, \\
\psi_1(\xi) &= 1 - \frac{3}{8}\xi^5, \quad \psi'_1(\xi) = 1 + \frac{1}{4}\xi^5, \quad \alpha_1(\xi) = 1 - \frac{5}{8}\xi^3 - \frac{3}{8}\xi^5; \\
\varphi_2(\xi) &= 1 - \xi - \xi^5 + \xi^6, \quad \varphi'_2(\xi) = 1 - \frac{3}{2}\xi + \frac{3}{2}\xi^5 - \xi^6, \\
\psi_2(\xi) &= 1 - \xi^5, \quad \psi'_2(\xi) = 1 + \frac{2}{3}\xi^5, \quad \alpha_2(\xi) = 1 - \xi^5; \\
\varphi_3(\xi) &= 1 - \frac{6}{5}\xi + \frac{1}{5}\xi^6, \quad \varphi'_3(\xi) = 1 - \frac{9}{5}\xi + \xi^3 - \frac{1}{5}\xi^6, \\
\psi_3(\xi) &= 1, \quad \psi'_3(\xi) = 1, \quad \alpha_3(\xi) = 1 - \xi^3;
\end{aligned}$$

Отмеченные выражения совпадают с известными результатами предшествующих работ по стационарным течениям в ячеичных моделях [10, с. 155, 156, 449]. Эти функции связаны соотношением

$$3\varphi_n(\xi)\psi'_n(\xi) = 2\varphi'_n(\xi)\psi_n(\xi) + \alpha_n^2(\xi), \quad (2.9)$$

которое выводится следующим образом. Зададим величину  $A$  такой, чтобы числитель формулы (2.8) обратился в нуль, т.е. чтобы поверхность капли оказалась заторможенной. Такая капля будет неотличима от твердой сферы, и колебательную скорость ее центра масс  $U$  можно вычислить по формуле (2.7), либо подставив в нее заданное значение  $A$ , либо положив формально  $\eta'_* = \infty$ . Из равенства полученных таким образом выражений для  $U$  следует соотношение (2.9). В его справедливости легко убедиться и непосредственной проверкой. Кроме того, имеет место равенство

$$2\psi_n(\xi) + 3\psi'_n(\xi) = 5.$$

Высокочастотные приближения для скоростей  $U$  и  $\nu_0$  справедливы при выполнении условия

$$|z| = \sqrt{\frac{\omega\rho}{\eta}}R_1 \geq \frac{3\sqrt{2}(1 - \ln\xi)}{1 - \xi},$$

даются следующими едиными для рассмотренных 4-х моделей стесненного обтекания капель формулами:

$$U = \frac{\frac{2(\rho' - \rho)R^2G}{3\eta} [\eta S(y) + \eta'_* S'(y)] - \frac{2}{3}A(1 - y) + V \left(1 - y + \frac{y^2}{3}\right) [2\eta D(y) + 3\eta'_*]}{2\eta T(y) + 3\eta'_* T'(y)}, \quad (2.10)$$

$$\nu_0 = \frac{\frac{(\rho' - \rho)R^2G}{3}(1 - y) - AT'(y) - \frac{\eta(1-\gamma)}{2\gamma}(1 - y)y^2V}{2\eta T(y) + 3\eta'_* T'(y)}, \quad (2.11)$$

где

$$\begin{aligned}
S(y) &= (1 - \xi^3) \left(1 - \frac{y}{3}\right) + \frac{2\xi^3}{y} \left(1 - \frac{1}{y}\right), \quad S'(y) = 1 - \xi^3 + \frac{3\xi^3}{y} \left(1 - \frac{1}{y}\right), \\
T(y) &= \left[1 - \frac{(1-\gamma)\xi^3}{\gamma}\right] (1 - y) + [1 - (1 - \gamma)\xi^3] \left(1 - \frac{y}{3}\right) \frac{y^2}{2\gamma}, \\
T'(y) &= \left[1 - \frac{(1-\gamma)\xi^3}{\gamma}\right] (1 - y) + [1 - (1 - \gamma)\xi^3] \frac{y^2}{3\gamma}, \\
\gamma &= \frac{3\rho}{2\rho' + \rho},
\end{aligned}$$

причем имеет место соотношение

$$3S(y)T'(y) = 2S'(y)T(y) + (1-y)^2,$$

являющееся высокочастотным аналогом формулы (2.9).

Поверим приближения предельными переходами. При  $\xi \rightarrow 0$  из (2.10) следует:

$$U = \frac{\frac{2(\rho' - \rho)R^2G}{3\eta} [\eta(1 - \frac{y}{3}) + \eta'_*] - \frac{2}{3}A(1-y) + V\left(1-y+\frac{y^2}{3}\right)[2\eta D(y) + 3\eta'_*]}{2\eta\left(1-y+\frac{y^2}{2\gamma}-\frac{y^3}{6\gamma}\right) + 3\eta'_*\left(1-y+\frac{y^2}{3\gamma}\right)}, \quad (2.12)$$

Эта формула содержит разные частные случаи движения одиночной капли в жидкости. Так, для движения в покоящейся жидкости ( $V = 0$ ) с постоянной скоростью ( $\omega, |y| \rightarrow 0$ ) в поле силы тяжести ( $G = g$ ) получим

$$U = \frac{2(\rho' - \rho)gR^2}{9\eta} \frac{3\eta + 3\eta' + B}{2\eta + 3\eta' + B} - \frac{2A/3}{2\eta + 3\eta' + B},$$

Если поверхность капли свободна от электрических зарядов, поверхностно-активных веществ и т.п., т.е. когда  $\alpha(\theta) = \alpha_0 = \text{const}$  и, следовательно,  $A = 0, B = 0$ , то это выражение переходит в известную формулу Рыбчинского–Адамара [12, с. 100]. При  $G = 0, A = 0, |\eta'_*| \gg \eta$  из (2.12) следует:

$$\frac{U}{V} = \frac{1-y+\frac{y^2}{3}}{1-y+\frac{y^2}{3\gamma}}.$$

Это известная формула Кёнига (W.König, 1891 г.), полученная также в [1]. Она служит основой акустических теорий разбавленных суспензий.

Для маловязких капель, когда  $|\eta'_*| \ll \eta, G = 0, A = 0$  по (2.12) получим:

$$\frac{U}{V} = \frac{1-y+\frac{y^2}{2}-\frac{y^3}{6}}{1-y+\frac{y^2}{2\gamma}-\frac{y^3}{6\gamma}}.$$

Как и в предыдущем случае, отношение амплитуд скоростей близко к единице при  $|y| \ll 1$  и стремится к  $\gamma$  при  $|y| \gg 1$ . Так, для газового пузырька в воде в поле звуковой волны достаточно высокой частоты  $U/V \approx 3$ .

С помощью (2.12) (при  $A = 0, V = 0$ ) найдем силу сопротивления движению капли [14]:

$$F_{res} = -6\pi\eta RU \frac{2\eta\left(1-y+\frac{y^2}{6}-\frac{y^3}{18}\right) + 3\eta'_*\left(1-y+\frac{y^2}{9}\right)}{3\eta\left(1-\frac{y}{3}\right) + 3\eta'_*}.$$

Отсюда получим частные формулы для силы сопротивления движению в неподвижной на бесконечности жидкости капли, твердой сферы, газового пузырька [12]. Так, для твердой сферы ( $\eta' \rightarrow \infty$ ) имеем

$$F_{res} = -6\pi\eta RU \left(1-y+\frac{y^2}{9}\right), \quad y^2 = -\frac{i\omega\rho R^2}{\eta},$$

что переходит в формулу Стокса при  $\omega \rightarrow 0$ , а при  $\eta \rightarrow 0$  дает:

$$F_{res} = -\frac{2}{3}\pi R^3\rho(-i\omega U) = -\frac{2}{3}\pi R^3\rho \frac{dU}{dt},$$

что выражает известный результат: присоединенная масса идеальной жидкости для осциллирующей сферы равна половине массы жидкости, вытесненной сферой.

Когда плотности жидкостей в эмульсии разнятся, колебательные скорости  $U$  и  $V$  не совпадают, т.е. капля движется относительно вмещающей жидкости. При этом за счет вязкостей обеих жидкостей происходит частотнозависимая диссиляция механической энергии. Для звуковой волны, длина которой значительно превышает размеры элементарной ячейки, эмульсия предстает "микронеоднородной" средой с эффективной комплексной плотностью [7,8]:

$$\tilde{\rho}(\omega) = \tilde{\rho}_1(\omega) + i\tilde{\rho}_2(\omega) = \rho \left( 1 + \frac{\rho' - \rho}{\rho} \xi^3 \frac{U}{V} \right).$$

Отношения скоростей (при  $G = 0, A = 0$ ) представим в виде

$$\frac{U}{V} = \frac{1}{1 - iq_n}, n = 0, 1, 2, 3.$$

Для четырех рассмотренных выше вариантов ячеичных моделей эмульсий получены полные выражения функций  $q_n$ . Случай жесткой оболочки подробно рассмотрен в работе [8]. Для собственно ячеистых моделей имеем: при условии **Квашнина**

$$q_1 = \frac{2(\rho' - \rho)\omega R^2}{9\eta} \cdot \frac{3\eta \left\{ -\frac{4}{3}z\xi + \left[ z\left(1-\xi+\frac{4}{3}\xi^2\right) + \frac{z^3}{3}\left(1-\frac{2}{3}\xi-\xi^3+\frac{2}{3}\xi^4\right) \right] ch[z(1-\xi)] - \right.}{2\eta \left\{ \left[ z(1-\xi) + \frac{z^3}{6}(2-4\xi+3\xi^2-\xi^3) + \frac{z^5}{6}\xi^2(1-\frac{2}{3}\xi) \right] ch[z(1-\xi)] - \right.} \\ \cdots \frac{-\left[ 1-\frac{4}{3}\xi+\frac{2z^2}{3}\left(1-\frac{\xi}{2}-\xi^3+\xi^4\right) - \frac{z^4}{9}(\xi-\xi^4) \right] sh[z(1-\xi)] + 3\eta'_* \left\{ -2z\xi + \left[ z(1-\xi+2\xi^2) + \right. \right.}{-\left[ 1+z^2\left(\frac{2}{3}-\xi+\frac{\xi^2}{2}\right) - \frac{z^4}{6}\xi(2-2\xi+\xi^2) - \frac{z^6}{18}\xi^3 \right] sh[z(1-\xi)] + 3\eta'_* \left\{ z(1-\xi)+\frac{z^3}{3}(1-\xi)^2 + \right.} \\ \cdots \frac{\left. + \frac{z^3}{3}(1-\xi^3) \right] ch[z(1-\xi)] - \left[ 1-2\xi+\frac{z^2}{3}(2+3\xi^2-2\xi^3) \right] sh[z(1-\xi)] \left. \right\} + 3\eta'_* \left\{ \left. + \frac{z^5}{9}\xi^2 \right] ch[z(1-\xi)] - \left[ 1+\frac{z^2}{3}(2-3\xi+\xi^2) - \frac{z^4}{9}\xi(3-2\xi) \right] sh[z(1-\xi)] \right\};$$

при условии **Хаппеля**

$$q_2 = \frac{2(\rho' - \rho)\omega R^2}{9\eta} \cdot \frac{3\eta \left\{ -\frac{4}{3}z\xi + \left[ z\left(1-\frac{2}{3}\xi+\xi^2\right) + \frac{z^3}{6}\left(1-\xi-\xi^3+\xi^4\right) \right] ch[z(1-\xi)] - \right.}{2\eta \left\{ \left[ z(1-\xi) + \frac{z^3}{6}(1-\xi)^3 + \frac{z^5}{12}\xi^2(1-\xi) \right] ch[z(1-\xi)] - \left[ 1+\frac{z^2}{2}(1-\xi)^2 - \right. \right.} \\ \cdots \frac{-\left[ 1-\xi+\frac{z^2}{2}\left(1-\frac{2}{3}\xi+\frac{2}{3}\xi^2-\xi^3\right) - \frac{z^4}{18}\xi(1-\xi^3) \right] sh[z(1-\xi)] + 3\eta'_* \left\{ -2z\xi + \left[ z(1-\frac{1}{2}\xi+\frac{3}{2}\xi^2) + \right. \right.}{-\frac{z^4}{6}\left(1-\frac{3}{2}\xi+\xi^2\right) - \frac{z^6}{36}\xi^3 sh[z(1-\xi)] + 3\eta'_* \left\{ \left. z(1-\xi)+\frac{z^3}{6}(1-3\xi+2\xi^2) + \frac{z^5}{18}\xi^2 \right] ch[z(1-\xi)] - \right.} \\ \cdots \frac{\left. + \frac{z^3}{6}(1-\xi^3) \right] ch[z(1-\xi)] - \left[ 1-\frac{3}{2}\xi+\frac{z^2}{2}(1+\xi^2-\xi^3) \right] sh[z(1-\xi)] \left. \right\} + 3\eta'_* \left\{ \left. -\left[ 1+\frac{z^2}{6}(3-6\xi+2\xi^2) - \frac{z^4}{6}\xi(1-\xi) \right] sh[z(1-\xi)] \right\};$$

при условии **Кувабары**

$$q_3 = \frac{2(\rho' - \rho)\omega R^2}{9\eta} \cdot \frac{3}{z^2} \cdot \frac{2\eta \left\{ \left[ -z\xi(1-\xi) + \frac{z^3}{6}(3-\xi)(1-\xi^3) \right] ch[z(1-\xi)] - \right.}{2\eta \left\{ \left[ z(1-\xi) + \frac{z^3}{6}(3\xi^2-\xi^3) \right] ch[z(1-\xi)] - \left[ 1-\frac{z^2}{2}(2\xi-\xi^2) - \right. \right.} \\ \cdots \frac{-\left[ -\xi+\frac{z^2}{2}(1+2\xi^2-\xi^3) - \frac{z^4}{6}\xi(1-\xi^3) \right] sh[z(1-\xi)] + 3\eta'_* \left\{ \left[ -z\xi(1-\xi) + \right. \right.}{-\frac{z^4}{6}\xi^3 sh[z(1-\xi)] + 3\eta'_* \left\{ \left. z(1-\xi)+\frac{z^3}{3}\xi^2 \right] ch[z(1-\xi)] - \right.} \\ \cdots \frac{\left. + \frac{z^3}{3}(1-\xi^3) \right] ch[z(1-\xi)] - \left[ -\xi+\frac{z^2}{3}(1+3\xi^2-\xi^3) \right] sh[z(1-\xi)] \left. \right\} + 3\eta'_* \left\{ \left. -\left[ 1+\frac{z^2}{3}\xi(\xi-3) \right] sh[z(1-\xi)] \right\}.$$

Учет силовых факторов  $G$  и  $A$  возможен, но громоздок.

## Заключение

Приведены основные расчеты акустических характеристик ячеичных моделей эмульсий сферических капель произвольных концентраций. Рассмотрены четыре варианта известных граничных условий на поверхности ячейки. Получены низко- и высокочастотные приближения для характерных скоростей капли при гармонических колебаниях под действием массовых сил, переменных сил поверхностного натяжения и осцилляций вмещающей жидкости. К трем вариантам эмульсий даны полные формулы для расчета их комплексных эффективных плотностей в звуковом поле. Частные случаи этих формул для супензий имеются в работе [9].

Поскольку многие жидкости имеют близкие значения плотностей, т.е.  $\rho' \approx \rho$  то вязкие звуковые потери в таких эмульсиях могут оказаться незначительными, что потребует учета и тепловых потерь, не зависящих от гидродинамических граничных условий на поверхности ячейки. Для расчета тепловых потерь необходимо использовать результаты работы [15], кратко изложенные в [8]. При этом комплексной будет также эффективная сжимаемость эмульсии.

## Список литературы

1. Рытов С.М., Владимирский В.В., Галанин М.Д. Распространение звука в дисперсных системах // ЖЭТФ. 1938. Т. 8. № 5. С. 614-621.
2. Urick R.J. The absorption of sound in suspensions of irregular particles // J. Acoust. Soc. Amer. 1948. V. 20. № 3. P. 283-289.
3. Epstein P.S., Carhart R.R. The absorption of sound in suspensions and emulsions. Water fog in air // J. Acoust. Soc. Amer. 1953. V. 25. № 3. P. 553-565.
4. Ратинская И.А. О затухании звука в эмульсиях // Акуст. журн. 1962. Т. 8. № 2. С. 210-215.
5. Нестеров В.С. Вязко-инерционная дисперсия и затухание звука в супензии высокой концентрации // Акуст. журн. 1959. Т. 5. № 3. С. 337-344.
6. Федотовский В.С., Орлов А.И., Лунина С.В., Пильщикова Е.А. Комплексная плотность супензий в колебательно-волновых процессах // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 2. С. 173-178.
7. Казаков Л.И. Динамика капель в электрокапиллярных акустических преобразователях: Дис. ... к.ф.-м.н. Владивосток, 1985. 114 с.
8. Казаков Л.И. О распространении звука в дисперсных средах // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 3. С. 330-341.
9. Казаков Л.И. Ячеичные модели супензий сферических частиц при разных граничных условиях // NOISE Theory and Practice. 2019. Т. 5. № 4. С. 27-40.
10. Хаппель Дж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса / Пер. с англ. под ред. Буевича Ю. А. М.: Мир, 1976. 630 с.
11. Квашнин А.Г. Об одной ячеичной модели супензии сферических частиц // Изв. АН СССР, МЖГ. 1979. № 4. С. 154-157.
12. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. 3-е изд. перераб. М.: Наука, 1986. 736 с.
13. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. 2-е изд. дополн. и перераб. М.: ГИФМЛ, 1959. 699 с.
14. Городцов В.А. Медленные движения жидкой капли в вязкой жидкости // Журн. прикл. мех. и техн. физики. 1975. № 6. С. 32-37.

15. Бызова Н.Л., Нестеров В.С. Термическое затухание звука в суспензии высокой концентрации // Акуст. журн. 1959. Т. 5. № 4. С. 408-414.

## References

1. S. M. Rytov, V. V. Vladimirsny, M. D. Galanin. Sound propagation in dispersive systems. Zh. Eksp. Teor. Fis. 1938. Vol. 8. No. 5. pp. 614-621.
2. R. J. Urick. The absorption of sound in suspensions of irregular particles // J. Acoust. Soc. Amer. 1948. V. 20. № 3. P. 283-289.
3. P.S. Epstein, R.R. Carhart. The absorption of sound in suspensions and emulsions. Water fog in air // J. Acoust. Soc. Amer. 1953. V. 25. No. 3. P. 553-565.
4. I. A. Ratinskaya. On the attenuation of sound in emulsions. Akust. Zh. 1962. Vol. 8. No. 2. Pp. 210-215.
5. V. S. Nesterov. Visco-inertial dispersion and sound attenuation in a high-concentration suspension // Akust. Zh. 1959. Vol. 5. No. 3. pp. 337-344.
6. V. S. Fedotovsky, A. I. Orlov, S. V. Lunina, E. A. Pilshchikova. Complex density of suspensions in vibrational-wave processes. Acoust.Phys. 2014. Vol. 60. no. 2. pp. 173-178.
7. L. I. Kazakov. Dynamics of drops in electrocapillary acoustic converters: Candidate's Dissertation in Mathematics and Physics (Vladivostok, 1985).
8. L. I. Kazakov. On the propagation of sound in dispersive media // Acoust.Phys. 2018. Vol. 64. no. 3. pp. 330-341.
9. L. I. Kazakov. Cellular models of spherical particle suspensions under different boundary conditions // NOISE Theory and Practice. 2019. Vol. 5. no. 4. pp. 27-40.
10. J. Happel and H. Brenner, Low Reynolds Number Hydrodynamics. With Special Applications to Particulate Media (Springer, 1983; Mir, Moscow, 1976).
11. A. G. Kvashnin. On a cellular model of a suspension of spherical particles. Izv. AN SSSR, MZhG. 1979. No. 4. pp. 154-157.
12. L. D. Landau, E. M. Lifshits. Hydrodynamics. 3rd ed. pererab. M.: Nauka, 1986. 736 p.
13. V. G. Levich. Physicochemical hydrodynamics. 2nd ed. M.: GIFML, 1959. 699 p.
14. V. A. Gorodtsov. Slow movements of a liquid drop in a viscous liquid. J. Appl. Mech. and Tech. Phys. 1975. No. 6. pp. 32-37.
15. N. L. Buzova, V. S. Nesterov. Thermal attenuation of sound in a high-density suspension concentrations // Akust. Zh. 1959. Vol. 5. No. 4. pp. 408-414.

УДК: 534.83  
OECD: 01.03.AA

## Расчет шумозащитных ограждений для снижения шума операторов металлообрабатывающих станков

Шашурин А.Е.<sup>1\*</sup>, Курченко П.С.<sup>2</sup>, Гогуадзе М.Г.<sup>3</sup>, Разаков Ж.П.<sup>4</sup>

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

<sup>2,3</sup> Младший научный сотрудник, Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, РФ

<sup>4</sup> Соскатель

<sup>1,4</sup> БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

### Аннотация

Улучшению условий труда на рабочих местах машиностроительных предприятий посвящено много работ. В статье показан подход к снижению уровней шума от металлообрабатывающих станков. Рассмотрены вопросы снижения уровней шума в соразмерных помещениях, где в одном помещении располагается станок и проанализирован вариант, где в цехе расположено n-ое кол-во оборудования. С учетом этого меняется характер шумообразования в цехе и расчеты ведутся с учетом вклада отраженного шума в звуковое поле на рабочем месте и с учетом множества оборудования. В статье рассмотрены расчеты эффективность мероприятий по снижению шума на участках профильно и координатно-шлифовальных станков, указаны их возможные компоновки, показаны результаты эксперимента. Показан расчет систем снижения шума системы «узел шлифования – шлифуемая заготовка». Показаны материалы, которые могут применяться для снижения звукопоглощения в цехах. Представлен расчет и проектирование акустического экрана зоны шлифования координатно-шлифовального станка.

**Ключевые слова:** звуковое давление, эффективность, шумозащитное ограждение, звуковое поле, дифракция, мощность, энергия.

### *Calculation of noise barriers to reduce the noise of operators of metalworking machines*

*Shashurin A.E.<sup>1</sup>, Kurchenko P.S.<sup>2</sup>, Goguadze M.G.<sup>3</sup>, Razakov Zh.P<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> *DSc, professor of the department of Ecology and Industrial Safety*

<sup>2,3</sup> *Junior researcher, Rostov State University of Railway Transport, Rostov-on-Don, Russia*

<sup>4</sup> *Applicant*

<sup>1,4</sup> *BSTU "VOENMEH" named after D. F. Ustinov, St. Petersburg, Russia*

### Abstract

*Many works have been devoted to improving working conditions at the workplaces of machine-building enterprises. The article shows an approach to reducing noise levels from metalworking machines. The issues of reducing noise levels in commensurate rooms, where the machine is located in one room, are considered and the variant where the nth number of equipment is located in the workshop is analyzed. With this in mind, the nature of noise generation in the workshop is changing and calculations are carried out taking into account the contribution of reflected noise to the sound field at the workplace and taking into account a variety of equipment. The article considers the calculations of the effectiveness of noise reduction measures in the sections of profile*

and coordinate grinding machines, their possible layouts are indicated, and the results of the experiment are shown. The calculation of noise reduction systems of the "grinding unit – the workpiece being ground" system is shown. Materials that can be used to reduce sound absorption in workshops are shown. The calculation and design of the acoustic screen of the grinding zone of the coordinate grinding machine is presented.

**Keywords:** sound pressure, efficiency, noise barrier, sound field, diffraction, power, energy.

## Введение

Повышенные уровни шума зачастую являются основным вредным фактором на рабочих местах операторов металлообрабатывающих станков. Большое количество станков, устанавливаемых в машиностроительных цехах усиливают общий уровень шума в цехе. На практике используют разные подходы по снижению шума именно от станка. Снижение шума в самом источнике различными способами, снижении шума на пути распространения – различные шумозащитные ограждения и снижения шума в защищаемом объекте, в данном случае это беруши или наушники. В статье описаны первый и второй методы.

### 1. Эффективность мероприятий по снижению шума на участках профильно и координатно-шлифовальных станков.

Вследствие повышенной точности обработки деталей станки данных моделей в большинстве случаев располагаются в отдельных производственных помещениях, которые относятся к категории соразмерных. Поэтому расчеты акустических характеристик необходимо выполнять на основе схемы, приведенной на рис.1, поскольку в расчетах должны присутствовать параметры производственного помещения и одновременного излучения звуковой энергии нескольких станков, зачастую характеризуемых различными уровнями звукового давления.

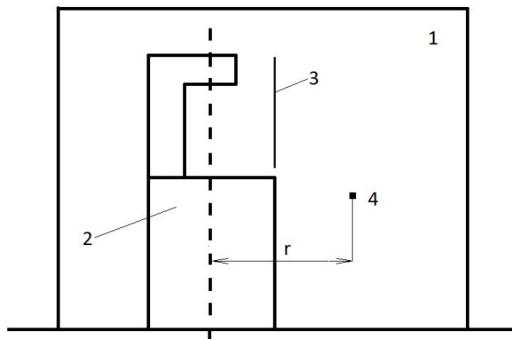


Рис. 1. Расчетная схема участка: 1 - соразмерное помещение; 2 - станок; 3 - акустический экран; 4 - рабочее место

Компоновка профильно и координатно-шлифовальных станков, а также условия эксплуатации практически полностью исключают использование различных ограждений зоны шлифования. Наличие же шумозащитного экрана технологически просто реализовать и не сохранить удобство в обслуживании при эксплуатации и обеспечить защиту оператора не только от акустического воздействия, но и травм, связанных с поломками тонких шлифовальных кругов, в особенности, при высоких

частотах вращения.

Для такой расчетной схемы с использованием данных работ [1,2] получено следующее выражение условий шума

$$L = L_p \Sigma - A\Theta + 10 \lg \left( \frac{\chi_c \varphi_c}{2\pi r^2} + \frac{4\psi_n}{B_n} \right), \quad (1)$$

где  $L_p \Sigma$  - октавные уровни звуковой мощности, дБ;  $A\Theta$  - акустическая эффективность экрана, дБ;  $\chi_c$  - коэффициент искажения поля у станка;  $\varphi_c$  - коэффициент направленности станка;  $\psi_n$  - коэффициент диффузности производственного помещения;  $B_n$  - постоянная производственного помещения, м<sup>2</sup>.

$B_n = \frac{\alpha_n S_n}{1-\alpha_n}$ ;  $S_n$  - площадь производственного помещения, м<sup>2</sup>;  $\alpha_n$  - частотно-зависимые коэффициенты звукопоглощения производственного помещения.

Для соразмерного помещения можно принять  $\varphi_c = 1$ . Поскольку превышения уровней шума зафиксированы в интервале частот 125 Гц и выше, то по данным работы [1]  $\psi_c = 1$ .

По данным этой же работы коэффициент диффузности определяется по формуле  $\psi_n = 1 - 0,3 \frac{B}{S_n}$ .

Тогда зависимость (1) примет вид

$$L = L_p \Sigma + 10 \lg \left( 4 \cdot 10^{-4} + \frac{1 - 1,3\alpha_n}{\alpha_n S_n} \right) + 6 - A\Theta, \quad (2)$$

Следует отметить, что при наличии нескольких одновременно работающих станков на участке суммарные уровни шума определяются энергетическим суммированием  $L_p \Sigma = 10 \lg \sum (10^{0,1L_1} + 10^{0,1L_2} + \dots + 10^{0,1L_{kc}})$ , где  $L_i$  - уровни звуковой мощности каждого станка, дБ;  $k_c$  - количество одновременно работающих станков.

Чтобы соблюсти уровни шума в нормируемом диапазоне на участке вышеуказанных станков предполагается, что у операторов каждого станка вклад от каждого источника шума должны быть уменьшены на 4-5 дБ.

Тогда зависимость (2) примет вид

$$L_c - (4 - 5) = L_p \Sigma + 10 \lg \left( 4 \cdot 10^{-4} + \frac{1 - 1,3\alpha_n}{\alpha_n S_n} \right) + 6 - A\Theta. \quad (3)$$

## 2. Проектирование и расчет систем снижения шума системы «узел шлифования - шлифуемая заготовка»

Такие системы должны совмещать эффекты звукоизоляции и вибропоглощения. Следует отметить, что снижение уровней шума шлифовальных кругов и заготовок, обусловленных вибропоглощением, определяется по известной формуле

$\Delta L = 10 \lg \frac{\eta_\Sigma}{\eta_{osc}}$ , где  $\eta_{osc}$  - коэффициенты потерь колебательной энергии шлифовального круга. Эти данные задаются по уравнению регрессии, полученному по экспериментальным данным. Далее привести расчет по шлифовальному кругу.

Экспериментальные исследования показали, что максимальные уровни звука на рабочих местах достигают 95 дБА у профильно-шлифовальных и 103 дБА у координатно-шлифовальных. Таким образом, снижение уровней звукового давления должно составлять 20 дБА у профильно-шлифовальных и 23-29 дБА у координатно-шлифовальных. Однако пересчет уровней шума с учетом времени реализации технологических процессов показал, что системы шумозащиты должны иметь

акустическую эффективность 13 дБА и 18 дБА (соответственно). У профильно-шлифовального станка требуемая акустическая эффективность достигается системой звукоизоляции и вибропоглощения узла шлифования и шлифуемой заготовки в тисках. Система снижения шума и вибрации узла резания представлена на рис.2-а, а заготовки на рис.2-б.

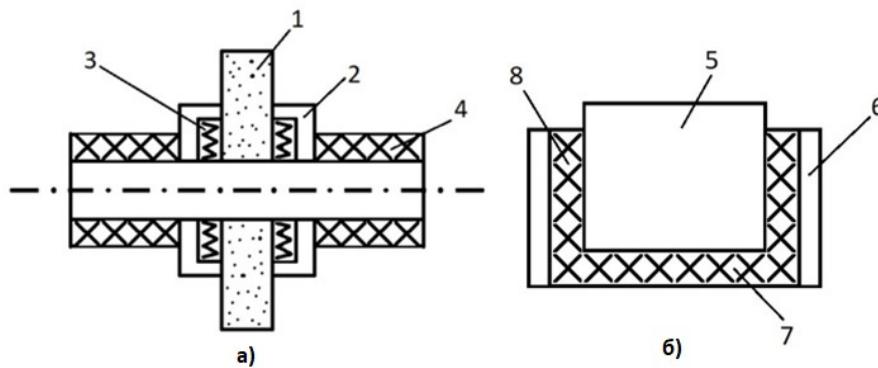


Рис. 2. Системы снижения шума узла резания и заготовки профильно-шлифовального станка: 1 - шлифовальный круг; 2 - корпус и стеклотекстолита (толщина 2-3 мм); 3 - вибропоглощающие элементы из магнитопласти толщиной 5-6 мм; 4 - резиновые шайбы (резина марки 1002 толщиной 8 мм на сторону), устанавливаемые на оправку шлифовального круга; 5 - шлифуемое изделие; 6 - губки тисков; 7 и 8 - пластины из стеклотекстолита толщиной 5-6 мм

Такие конструкции обеспечивают снижение шума за счет как частичной звукоизоляции площади, излучающей звук поверхности источника и эффекта вибропоглощения. Расчеты показали, что снижение уровней шума узла резания составляет: 7 дБ - за счет уменьшения площади излучения шлифовального круга; 3 дБ - за счет эффекта вибропоглощения шлифовального круга; 4 дБ - за счет вибропоглощения шлифуемого изделия. Фактически для профильно-шлифовальных станков экран целесообразен только для предотвращения травмирования станочников при поломках шлифовального круга.

Для координатно-шлифовальных станков система снижения уровней шума узлом шлифования не целесообразна вследствие вертикального расположения шпинделя. Однако подобная система для заготовок с эффективностью снижения шума может быть повышена до 5-6 дБ при использовании двухслойных пластинок и стеклотекстолита и материала «АГАТ» толщиной 2-3 мм и акустического экрана с акустической эффективностью 10-12 дБ. Кроме этого в местах расположения на станках производственного помещения звукопоглощающих панелей из базальтовых звукопоглощающих матов имеющих коэффициенты звукопоглощения 0,5-0,75 в диапазоне частот 1000-4000 Гц (рис.3) либо конструкций, разработанных для рабочих мест пультовщиков [3] (рис.4).

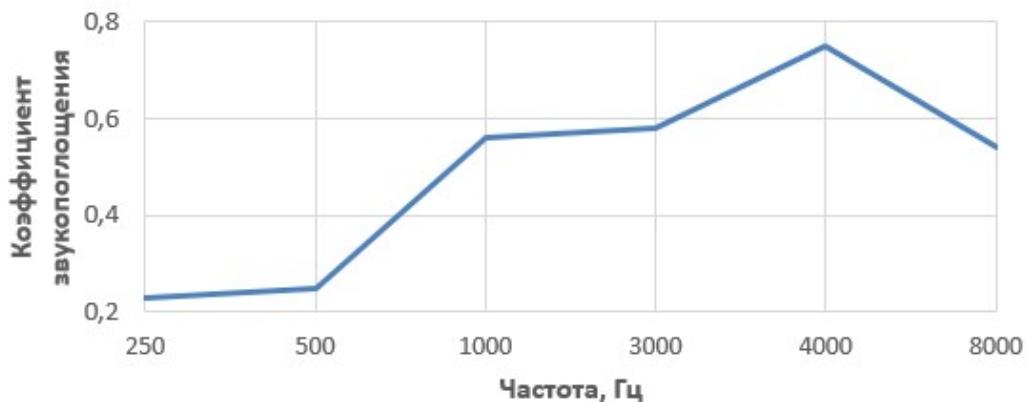


Рис. 3. Частотно- зависимые коэффициенты звукопоглощения базальтовых матов

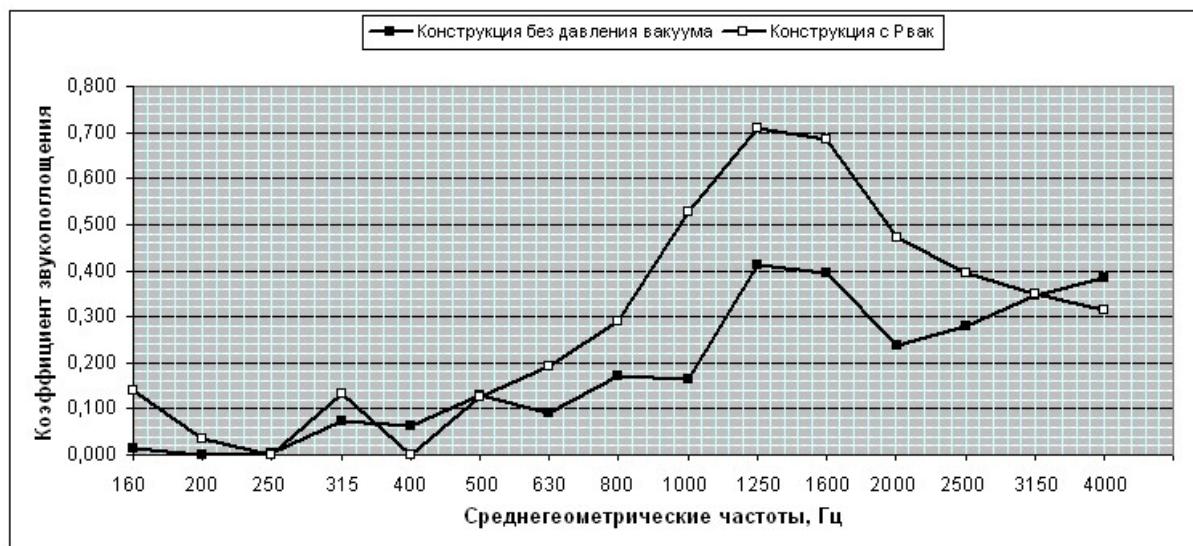


Рис. 4. Коэффициенты звукопоглощения типовых сотовых конструкций

### 3. Расчет и проектирование акустического экрана зоны шлифования координатно-шлифовального станка

Одним из надежных подходов уменьшения звукового давления на станках при работе с металлом являются доработка станка кожухами, перегородками, перекрывающими прямой звук от источников шума до рабочего места. Одним из наиболее предпочтительных средств снижения уровней звука в цехах предприятий у металлообрабатывающих станков считается применение различных перегородок, закрывающих зону обработки, возможно с раздвижными дверцами и др. [4]. Звукозащитные элементы таких конструкций изготавливаются из металла, служат для снижения прямого шума, попадания на работника эмульсий, пыли и пр. Зачастую в конструкции используют сэндвич панели, т.е. металл, между которым находится звукопоглощающий материал, который в свою очередь служит неким демпфером. Места прилегания конструкции к станку должны быть акустически. Для удобства работы и визуального осмотра делают комбинированную конструкцию сэндвич-монолитный поликарбонат, либо полиметиметаакрилат. Со стороны, обращенной к источнику шума добавляют звукопоглощающий материал, для снижения доли переотраженного шума.

Ниже проработан подход, позволяющий проводить выбор конструкции, учитывающей площади, геометрию и характеристики элементов шумозащиты.

Схематичное изображение экрана представлено на рисунке 5.

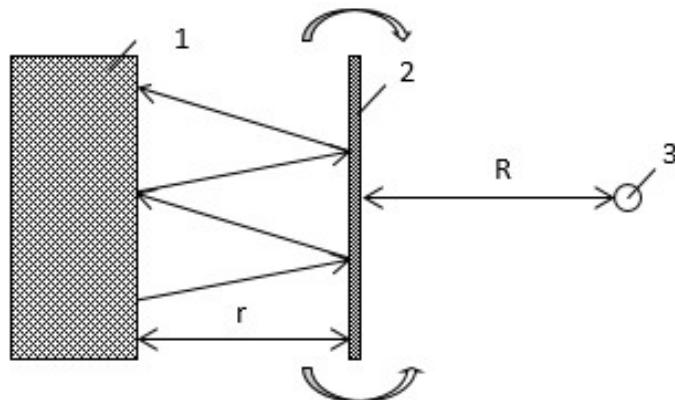


Рис. 5. Шумозащитное ограждение для уменьшения акустического воздействия на рабочих местах работников металлообрабатывающих: 1- источник шума (ИШ); 2 – шумозащитное ограждение (ШЗО); 3 – расчетная точка (РТ); → – переотражения звука;  $\curvearrowright$  – дифракция звука

Снижением шума различными ограждениями занимались ученые Иванов Н.И., Шашурин А.Е. и др. [5]. Согласно обзору методик расчета предлагается использовать теорию, выдвинутую Шашуриным А.Е.

Для выполнения расчетов в нашем случае сделаем некоторые допущения, такие как: в РТ звук дифрагирует через все стороны ограждения (экрана); ИШ и свободные ребра ШЗО приняты линейными излучателями шума; ограждение является комбинированным, состоящим из звукоизолирующей панели с облицовкой и прозрачного звукоизолирующего пластика толщиной не менее 16 мм и звукоизоляцией порядка 34 дБА для того, чтобы шум через само ограждение не учитывать (рис.6).

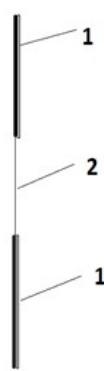


Рис. 6. Условная схема комбинированного шумозащитного ограждения: 1 - звукоизолирующий материал с облицовкой; 2 - прозрачный монолитный поликарбонат

В работе [6] дан расчет эффективности ограждения. На основе этого расчета, но с учетом звукового поля, которое образуется в ограниченном пространстве между источником шума и ограждающей конструкцией, выведены упрощенные формулы для расчета параметров конструкции.

Снижение шума ограждением определяют:

$$\Delta L_{\text{ШЗО}} = 10 \lg \frac{I_{PT}^{\text{Б/ШЗО}}}{I_{PT}^{\text{С/ШЗО}}}, \text{дБ} \quad (4)$$

где:  $I_{PT}^{\text{Б/ШЗО}}$  - интенсивность звука в РТ от ИШ без ШЗО; Вт/м<sup>2</sup>.  $I_{PT}^{\text{С/ШЗО}}$  - тоже с установленным ШЗО, Вт/м<sup>2</sup>.

Интенсивность звука в РТ без ШЗО:

$$I_{PT}^{\text{Б/ШЗО}} = \frac{W_{\text{ист}}}{2\pi l_{\text{ист}}(R+r)} \arctg \frac{l_{\text{ист}}}{2(R+r)}, \quad (5)$$

где:  $W_{\text{ист}}$  – акустическая мощность ИШ, Вт;  $l_{\text{ист}}$  – длина ИШ, м;  $r$  – расстояние от ИШ до ШЗО, м;  $R$  – расстояние от ШЗО до РТ, м.

Звуковая энергия, падающая на ШЗО

$$I_{PT}^{\text{С/ШЗО}} = \frac{4W_{\text{ист}}(1 - \overline{\alpha}_{\text{об}})}{\varphi_{\text{пр}} A_{\text{пр}}} \quad (6)$$

где  $\overline{\alpha}_{\text{об}}$  – средний коэффициент звукопоглощения в пространстве между ИШ и ШЗО;  $\varphi_{\text{об}}$  – коэффициент неравномерности звукового поля;  $A_{\text{об}}$  – эквивалентная площадь звукопоглощения;

$$A_{\text{пр}} = \alpha_{\text{отр}}^{\text{ШЗО}} l_{\text{шзо}} h_{\text{отр}} + \alpha_{\text{погл}}^{\text{ШЗО}} l_{\text{шзо}} h_{\text{погл}} + \alpha_{\text{ист}} l_{\text{ист}} h_{\text{ист}} + 4l_{\text{шзо}}, \quad (7)$$

где:  $\alpha_{\text{отр}}^{\text{ШЗО}}$  – коэффициент звукопоглощения отражающей части ШЗО;  $h_{\text{отр}}$  – высота, м;  $l_{\text{шзо}}$  – длина, м;  $\alpha_{\text{погл}}^{\text{ШЗО}}$  – коэффициент звукопоглощения поглощающей части ШЗО (ЗПМ);  $h_{\text{погл}}$  – высота поглощающей части, м;  $\alpha_{\text{ист}}$  – коэффициент звукопоглощения ИШ;  $l_{\text{ист}}$  – длина ИШ, м;  $h_{\text{ист}}$  – высота ИШ, м;

$$h_{\text{шзо}} = h_{\text{отр}} + h_{\text{погл}}. \quad (8)$$

Для улучшения в последующих расчетах т.к. первый и третий члены в формуле (7) пренебрежимо малы ( $\alpha = 0,01$ ) формула может быть преобразована: ( $l_{\text{ист}} \approx l_{\text{шзо}}$ )

$$A_{\text{об}} = l_{\text{шзо}}(\alpha_{\text{погл}} h_{\text{погл}} + 4r), \quad (9)$$

$$\overline{\alpha}_{\text{об}} = \frac{A_{\text{об}}}{S_{\text{иши}} + 4S_{\text{св.об}} + S_{\text{шзо}}}, \quad (10)$$

где  $S_{\text{иши}}$  – площади источника шума, м<sup>2</sup>;  $S_{\text{св.об}}$  – площадь свободного пространства между источником шума и ШЗО, м<sup>2</sup>;  $S_{\text{шзо}}$  – площадь шумозащитного ограждения, м<sup>2</sup>.

Акустическая мощность на свободных ребрах ШЗО:

$$W_{\text{шзо}} = I_{\text{пад}}^{\text{С/ШЗО}} S_{\text{шзо}}, \quad (11)$$

где  $S_{\text{шзо}}$  – площадь ИШ, м<sup>2</sup>;

$$S_{\text{шзо}} = l_{\text{шзо}}(h_{\text{отр}} + h_{\text{пад}}). \quad (12)$$

Интенсивность звука в РТ с ШЗО: принимая свободные ребра ШЗО линейными отраженными источниками звука (при этом свободных поверхностей).

$$I_{PT}^{C/ШЗО} = \frac{4W_{ШЗО}\beta_{дифр}}{2\pi l_{ШЗО}R} arctg \frac{l_{экп}}{2R}, \quad (13)$$

где  $\beta_{дифр}$  – коэффициент дифракции на свободном ребре (принимаем одинаковое значение  $\beta_{дифр} = \frac{1}{2\pi}$ )

Подставляем в (13) формулы (6), (9), (11) и (12)

$$I_{PT}^{C/ШЗО} = \frac{4W_{ист}(1 - \bar{\alpha}_{об})l_{ШЗО}(h_{отр} + h_{пад})4\beta_{дифр}}{\varphi_{пр}l_{ШЗО}(\alpha_{погл}h_{погл} + 4r)} arctg \frac{l_{экп}}{2R}. \quad (14)$$

После упрощений и приняв второе слагаемое A

$$I_{PT}^{C/ШЗО} = \frac{8W_{ист}(1 - \bar{\alpha}_{об})(h_{отр} + h_{пад})4\beta_{дифр}}{\varphi_{пр}(\alpha_{погл}h_{погл} + 4r)l_{ШЗО}R\pi} A, \quad (15)$$

Подставим (5) и (15) в (4)

$$\Delta L_{ШЗО} = 10 \lg \frac{W_{ист} - \varphi_{об}(\alpha_{погл}h_{погл} + 4r)l_{ШЗО}R\pi A}{2\pi l_{ист}(R + r)8W_{ист}(1 - \bar{\alpha}_{об})(h_{погл} + h_{OTP})l_{ШЗО}R\pi\beta_{дифр}} arctg \frac{l_{ист}}{2(R + r)} \quad (16)$$

Примем  $l_{ШЗО} \approx l_{ист}$  и сделаем упрощения,

$$\Delta L_{ШЗО} = 10 \lg \frac{R}{(R+r)} + 10 \lg \varphi_{пр} + 10 \lg \frac{(\alpha_{погл}h_{погл}+4r)}{(h_{погл}+h_{OTP})} - 10 \lg(1 - \bar{\alpha}_{об}) - 10 \lg \frac{1}{\beta_{дифр}} + 10 \lg \left( arctg \frac{l_{ШЗО}}{2R} \right) + 10 \lg \left( arctg \frac{l_{ШЗО}}{2(R+r)} \right) - 10 \lg 16, \text{ дБ.} \quad (17)$$

Применяя данную схему расчета, инженер может подбирать параметры и конструктивные особенности материала звукоограждающей конструкции.

Согласно работе [7] при малых объемах звукового поля данные при расчетах арктангенсов меняют общую эффективность не более, чем 0,1-0,2 дБ, что меньше, чем погрешность прибора при проведении экспериментальной проверки, поэтому в данном случае для удобства инженерных расчетов ими предлагается пренебречь.

Таким образом эффективность ограждения определяется по формуле:

$$\Delta L_{ШЗО} = 10 \lg \frac{R}{(R+r)} + 10 \lg \varphi_{пр} + 10 \lg \frac{(\alpha_{погл}h_{погл}+4r)}{(h_{погл}+h_{OTP})} - 10 \lg(1 - \bar{\alpha}_{об}) - 10 \lg \frac{1}{\beta_{дифр}} - 12$$

## Заключение

В статье представлены расчеты эффективность мероприятий по снижению шума на участках профильно и координатно-шлифовальных станков, указаны их возможные компоновки, даны формулы расчета и показаны результаты эксперимента.

Показан расчет систем снижения шума системы «узел шлифования – шлифуемая заготовка» предложены мероприятия, которые позволяют снизить уровни шума.

Показаны материалы, которые могут применяться для снижения звукопоглощения в цехах с акустическими характеристиками.

Представлен расчет и проектирование акустического экрана зоны шлифования координатно-шлифовального станка с упрощенным подходом, сочетающий в себе инженерные расчеты с учетом звукового поля между станком и ограждением.

## Список литературы

1. 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, №7 (2) с. 199-207
2. Nickolay Ivanov, Gennady Kurtsev, Aleksandr Shashurin. The method for sequential transformation of the sound fields. AKUSTIKA Volume 39, 2021, с. 141-147
3. Тюрин А.П. Проблемы улучшения условий труда в стрелковых тирах на предприятиях машиностроительного комплекса. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Санкт-Петербург, 2011. – 40 с.
4. Иванов Н.И., Шашурин А.Е., Гогуадзе М.Г. Расчет локального шумозащитного ограждения для снижения шума оператора металлообрабатывающего станка XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс.- 2020. - Т.9, № 1(49). С. 185-188
5. Иванов, Н. И. Защита от шума и вибрации: учебное пособие / Н. И. Иванов, А. Е. Шашурин. - 2-е изд., перераб. и доп. - СПб.: Печатный Цех, 2019. – 282 с.
6. Гогуадзе М. Г. Снижение шума на рабочих местах операторов специальных расточных и осетокарных станковю Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Ростов-на-Дону, 2020. – 19 с.
7. Светлов, В.В. Снижение шума стационарных источников в жилой застройке технологическими шумозащитными экранами / В.В. Светлов (лва 40%), Н.И. Иванов, А.Е. Шашурин // Безопасность жизнедеятельности: научно-практический и учебно-методический журнал – М.: Изд-во «Новые технологии». – 2018. – №6. – С. 16-22.

## References

1. Elkin Yu.I.. Shashurin A.E., Kurchenko P.S., Vasilyeva V.K. Shumoobrazovaniye na rabochikh mestakh operatorov
2. Nickolay Ivanov, Gennady Kurtsev, Aleksandr Shashurin. The method for sequential transformation of the sound fields. AKUSTIKA Volume 39, 2021, p. 141-147
3. Tyurin A.P. Problemy uluchsheniya usloviy truda v strelkovykh tirakh na predpriyatiyakh mashinostroitel'nogo kompleksa. Avtoreferat dissertatsii na soiskaniye uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. Sankt-Peterburg. 2011. – 40 p.
4. Ivanov N.I., Shashurin A.E., Goguadze M.G. Raschet lokalnogo shumozashchitnogo ogranicheniya dlya snizheniya shuma operatora metalloobrabatyvayushchego stanka XXI vek: itogi proshloga i problemy nastoyashchego plus.- 2020. - T.9. № 1(49). P. 185-188
5. Ivanov. N. I. Zashchita ot shuma i vibratsii: uchebnoye posobiye / N. I. Ivanov. A. E. Shashurin. - 2-e izd.. pererab. i dop. - SPb.: Pechatnyy Tsekh. 2019. – 282 p.
6. Goguadze M. G. Snizheniye shuma na rabochikh mestakh operatorov spetsialnykh rastochnykh i osetokarnykh stankovyu Avtoreferat dissertatsii na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Rostov-na-Donu. 2020. – 19 p.
7. Svetlov. V.V. Snizheniye shuma statsionarnykh istochnikov v zhiloy zastroyke tekhnologicheskimi shumozashchitnymi ekranami / V.V. Svetlov (lva 40%). N.I. Ivanov. A.E. Shashurin // Bezopasnost zhiznedeyatelnosti: nauchno-prakticheskiy i uchebno-metodicheskiy zhurnal – M.: Izd-vo «Novyye tekhnologii». – 2018. – №6. – P. 16-22

# **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 научометрических 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  
2021