



#11(63), 2020 część 3

**Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe**  
(Ukraina, Kijów)

**Czasopismo jest zarejestrowane i publikowane w Polsce.** W czasopiśmie publikowane są artykuły ze wszystkich dziedzin naukowych. Czasopismo publikowane jest w języku polskim, angielskim, niemieckim i rosyjskim.

Artykuły przyjmowane są do dnia 30 każdego miesiąca.

Częstotliwość: 12 wydań rocznie.

Format - A4, kolorowy druk

Wszystkie artykuły są recenzowane

Każdy autor otrzymuje jeden bezpłatny egzemplarz czasopisma.

Bezpłatny dostęp do wersji elektronicznej czasopisma.

**Zespół redakcyjny**

**Redaktor naczelny - Adam Barczuk**

**Mikołaj Wiśniewski**

**Szymon Andrzejewski**

**Dominik Makowski**

**Paweł Lewandowski**

**Rada naukowa**

**Adam Nowicki (Uniwersytet Warszawski)**

**Michał Adamczyk (Instytut Stosunków Międzynarodowych)**

**Peter Cohan (Princeton University)**

**Mateusz Jabłoński (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**

**Piotr Michalak (Uniwersytet Warszawski)**

**Jerzy Czarnecki (Uniwersytet Jagielloński)**

**Kolub Frennen (University of Tübingen)**

**Bartosz Wysocki (Instytut Stosunków Międzynarodowych)**

**Patrick O'Connell (Paris IV Sorbonne)**

**Maciej Kaczmarczyk (Uniwersytet Warszawski)**

#11(63), 2020 part 3

**East European Scientific Journal**  
(Ukraine, Kiev)

**The journal is registered and published in Poland.** The journal is registered and published in Poland. Articles in all spheres of sciences are published in the journal. Journal is published in **English, German, Polish and Russian.**

Articles are accepted till the 30th day of each month.

Periodicity: 12 issues per year.

Format - A4, color printing

All articles are reviewed

Each author receives one free printed copy of the journal

Free access to the electronic version of journal

**Editorial**

**Editor in chief - Adam Barczuk**

**Mikołaj Wiśniewski**

**Szymon Andrzejewski**

**Dominik Makowski**

**Paweł Lewandowski**

**The scientific council**

**Adam Nowicki (Uniwersytet Warszawski)**

**Michał Adamczyk (Instytut Stosunków Międzynarodowych)**

**Peter Cohan (Princeton University)**

**Mateusz Jabłoński (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**

**Piotr Michalak (Uniwersytet Warszawski)**

**Jerzy Czarnecki (Uniwersytet Jagielloński)**

**Kolub Frennen (University of Tübingen)**

**Bartosz Wysocki (Instytut Stosunków Międzynarodowych)**

**Patrick O'Connell (Paris IV Sorbonne)**

**Maciej Kaczmarczyk (Uniwersytet Warszawski)**

**Dawid Kowalik (Politechnika  
Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**

**Peter Clarkwood(University College  
London)**

**Igor Dzedzic (Polska Akademia  
Nauk)**

**Alexander Klimek (Polska Akademia  
Nauk)**

**Alexander Rogowski (Uniwersytet  
Jagielloński)**

**Kehan Schreiner(Hebrew University)**

**Bartosz Mazurkiewicz (Politechnika  
Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**

**Anthony Maverick(Bar-Ilan  
University)**

**Mikołaj Żukowski (Uniwersytet  
Warszawski)**

**Mateusz Marszałek (Uniwersytet  
Jagielloński)**

**Szymon Matysiak (Polska Akademia  
Nauk)**

**Michał Niewiadomski (Instytut  
Stosunków Międzynarodowych)**

**Redaktor naczelny - Adam Barczuk**

**1000 kopii.**

**Wydrukowano w Ukraina, Kijów,  
Pobedy Avenu, 56/1, Biuro 115**

**Sp. z o.o."Grupa Konsultingowa  
"Образование и наука"**

**Ukraina, Kijów, Pobedy Avenu, 56/1,  
Biuro 115**

**E-mail: info@eesa-journal.com,**

**<http://eesa-journal.com/>**

**Reprezentacja czasopisma naukowego  
w krajach afrykańskich.**

**Republika Angoli.**

**ADAMSMAT\_SU\_LDA,**

**Sede: Rio Longa\_ prédio Z11 Quarteirão Z,  
N\*23, Município: BELAS, província: LUANDA**

**E\_mail: Adamsmat@mail.ru**

**Contribuinte n\* 5417331007**

**Tel:+244-929527658**

**Dawid Kowalik (Politechnika  
Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**

**Peter Clarkwood(University College  
London)**

**Igor Dzedzic (Polska Akademia  
Nauk)**

**Alexander Klimek (Polska Akademia  
Nauk)**

**Alexander Rogowski (Uniwersytet  
Jagielloński)**

**Kehan Schreiner(Hebrew University)**

**Bartosz Mazurkiewicz (Politechnika  
Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**

**Anthony Maverick(Bar-Ilan  
University)**

**Mikołaj Żukowski (Uniwersytet  
Warszawski)**

**Mateusz Marszałek (Uniwersytet  
Jagielloński)**

**Szymon Matysiak (Polska Akademia  
Nauk)**

**Michał Niewiadomski (Instytut  
Stosunków Międzynarodowych)**

**Editor in chief - Adam Barczuk**

**1000 copies.**

**Printed in the Ukraine, Kiev, Pobedy  
Avenue, 56/1, office 115**

**LLC "Consulting group  
"Образование и наука"**

**Ukraine, Kiev, Pobedy Avenue, 56/1,  
office 115**

**E-mail: info@eesa-journal.com,**

**<http://eesa-journal.com/>**

**Representation of a scientific journal in  
African countries:**

**Republic of Angola**

**ADAMSMAT\_SU\_LDA,**

**Sede: Rio Longa\_ prédio Z11 Quarteirão Z,  
N\*23, Município: BELAS, província: LUANDA**

**E\_mail: Adamsmat@mail.ru**

**Contribuinte n\* 5417331007**

**Tel:+244-929527658**

# СОДЕРЖАНИЕ

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

<b>Безушко Д.І., Дорофеев В.С., Клованич С.Ф.</b> АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СПОРУД У СВІТІ ТА УКРАЇНСЬКІ РЕАЛІЇ.....	4
<b>Dolya G., Bondarenko K.</b> LASER DETECTOR OF ACOUSTIC OSCILLATIONS UTILIZING A RETROREFLECTIVE SURFACE WITH GLASS BEADS ....	7
<b>Грязнова Г.Г., Грязнова А.В.</b> ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ОБЩЕСТВЕННОГО ЦЕНТРА В СТРУКТУРЕ ТРАНСПОРТНО - ПЕРЕСАДОЧНОГО УЗЛА .....	17
<b>Касяненко В.В.</b> АДГЕЗИЙНА МІЦНІСТЬ ДВОШАРОВИХ МЕТАЛЕВИХ ПОКРИТТІВ НА ПІДКЛАДКАХ ОКСИДУ АЛЮМІНІЮ .....	22
<b>Biliaiev M.M., Biliaieva V.V., Berlov O.V., Kozachyna V.A.</b> MODELING OF NOISE POLLUTION NEAR RAILWAY .....	30
<b>Лавінський Д.В., Морачковський О.К., Конкін В.М., Конкін С.В.</b> ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОДЕФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ ТІЛ ПРИ ДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ.....	36
<b>Сенькин Н.А., Филимонов А.С., Халимбеков И.М.</b> О ЖИВУЧЕСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МОРСКОГО УЧАСТКА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ МАГИСТРАЛИ ОТ НАВАЛА СУДНА .....	40
<b>Тертычный А.А., Шинкевич Е.С., Мироненко И.Н.</b> СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ АКТИВИРОВАННЫХ И НЕАКТИВИРОВАННЫХ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ СМЕСЕЙ И БЕТОНОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ .....	46
<b>Яковлева Е.В., Фролов А.С., Кузнецов П.А.</b> АКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОБУЧЕНИЯ РАБОТНИКОВ ПО ОХРАНЕ ТРУДА В УСЛОВИЯХ ПАНДЕМИИ ВИРУСА COVID-19.....	53

# ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 004.942:624.074:624.042.7

**Bezushko D.**

*candidate of technical sciences, associate professor,  
Department of Civil Engineering and Architecture,*

*Odessa National Maritime University, Odessa, Mechnikova 34, 65029*

**Dorofeyev V.**

*doctor of technical sciences, professor,*

*Department of Civil Engineering and Architecture,*

*Odessa National Maritime University, Odessa, Mechnikova 34, 65029*

**Klovanych S.**

*doctor of technical sciences, professor,*

*Faculty of Geodesy, Geospatial and Civil Engineering*

*University of Warmia and Mazury in Olsztyn, ul. Prawocheckiego 15, 10-720 Olsztyn, Poland*

## ANALYSIS OF APPLICATION BUILDING INFORMATION MODELING IN THE WORLD AND UKRAINIAN REALITIES

**Безушко Денис Іванович**

*кандидат технічних наук, доцент*

*кафедра цивільної інженерії та архітектури*

*Одеський національний морський університет, Одеса (Україна)*

**Дорофєєв Віталій Степанович**

*доктор технічних наук, професор*

*кафедра цивільної інженерії та архітектури*

*Одеський національний морський університет, Одеса (Україна)*

**Клованич Сергій Федорович**

*доктор технічних наук, професор*

*Вармінсько Мазурський університет в г. Ольштин (Польща)*

## АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СПОРУД У СВІТІ ТА УКРАЇНСЬКІ РЕАЛІЇ

**Summary.** The paper presents an analysis of world experience in implementing technologies for building information modeling. At present, in technologically developed countries (USA, Great Britain, Northern Europe, France, Germany) in the practice of design and construction of buildings and structures for various purposes, information modeling technologies are being intensively introduced. According to foreign experts, the introduction of information modeling technology reduces the cost construction of facilities financed from the state budget by 25%. Reduction of operating costs is more than 35%. The basic principles of BIM implementation in Ukraine, which is regulated by the Concept of implementation of construction information modeling technologies (VIM-technologies) in Ukraine, are also considered. Based on the above, it should be noted that in Ukraine it is necessary to change almost the entire structure of control in the field of urban planning with the development of methods for determining the criteria of importance of information in creating an information model of the building.

**Анотація.** У роботі наведено аналіз світового досвіду, щодо впровадження технологій інформаційного моделювання будівель та споруд. В теперішній час в технологічно розвинених країнах (США, Великобританії, країнах Північної Європи, Франції, Німеччини) в практику проектування і будівництва будівель та споруд різного призначення інтенсивно впроваджуються технології інформаційного моделювання. За оцінками зарубіжних фахівців, впровадження технології інформаційного моделювання забезпечує скорочення витрат на будівництво об'єктів, що фінансуються за рахунок коштів державного бюджету на 25%. Скорочення витрат на експлуатацію становить понад 35%. Також розглянуто основні засади впровадження ВІМ в Україні, що регулюється Концепцією впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (ВІМ-технологій) в Україні. Спираючись на наведене слід зазначити, що в Україні слід змінити майже всю структуру контролю в галузі містобудівної діяльності з розробкою методів визначення критеріїв важливості інформації при створенні інформаційної моделі споруди.

*Key words: building information modeling, life cycle.*

*Ключові слова: технологія інформаційного моделювання в будівництві, життєвий цикл.*

**Вступ.** За оцінками зарубіжних фахівців, впровадження технології інформаційного моделювання забезпечує скорочення витрат на будівництво об'єктів [1], що фінансуються за рахунок коштів державного бюджету на 25%. Скорочення витрат на експлуатацію становить понад 35% [2]. Завдяки формуванню інформаційної моделі - єдиного інформаційного ресурсу про об'єкт капітального будівництва на усіх етапах життєвого циклу будівлі Рис.1. - забезпечується більш ефективне в порівнянні з традиційними

підходами управління проектом. При цьому відбувається кардинальне підвищення прозорості, з'являється можливість більш точної оцінки ефективності та цільового використання бюджетних коштів [3]. Впровадженню будь якої нової технології передують аналіз світового досвіду, щодо темпів, етапів впровадження та отриманих результатів, для створення системи КРІ (ключові показники ефективності). Саме аналіз світового досвіду та ситуації в будівельній галузі робить роботу **актуальною та на часі.**



Рис. 1. Життєвий цикл будівлі  
Джерело: [3].

**Завдання роботи** виконати аналіз світового досвіду, щодо впровадження технологій інформаційного моделювання будівель та споруд.

**Основна частина.**

В теперішній час в технологічно розвинених країнах (США, Великобританії, країнах Північної Європи, Франції, Німеччини) в практику проектування і будівництва будівель та споруд різного призначення інтенсивно впроваджуються технології інформаційного моделювання.

З огляду на значні переваги від використання даних технологій для держави, в якості першого кроку, в ряді країн встановлено умови щодо обов'язкового застосування зазначених технологій при проектуванні і будівництві об'єктів за рахунок коштів державного бюджету. Подібні вимоги послідовно вводилися окремими державними замовниками: в США з 2003 року, в ряді країн Європи і Азії з 2007 року. Дані кроки з боку держави забезпечили значне прискорення рівня впровадження BIM-технологій. У 2012 році в США більше 70% учасників будівельного ринку заявили про використання технологій інформаційного моделювання в своїх проектах, в Великобританії в 2013 році - 54% (за даними NBS [3]).

За даними сингапурського державного агентства по будівництву (BCA, Building & Construction Authority), в 2015 році більше 80% всіх будівельних проектів виконано згідно BIM-

технологій. У Сінгапурі сформований фонд підтримки переходу галузі на інноваційні технології, що надає допомогу підприємствам галузі з переходу на інформаційне моделювання. Створена система експертизи проектної документації на новому сучасному рівні.

У січні 2014 року було запропоновано поправки в європейську директиву про державні закупівлі, де всім країнам-учасникам Євросоюзу для підвищення прозорості та ефективності витрачання коштів бюджету було рекомендовано застосовувати електронні форми, що включають інформаційне моделювання в будівництві. Історичні данні, щодо впровадження BIM в технологічно розвинених країнах Рис.2. [4]:

2006 США. Обов'язкове використання BIM на ранніх етапах всіх будівельних проектів за участю держави;

2007 Фінляндія. BIM в стандарті IFC обов'язково для будівництва за держзамовленням;

2008 Сінгапур. Реалізована перша в світі електронна система будівельної експертизи на основі BIM. На експертизу потрібно надавати проекти тільки в BIM-виді;

2010 Норвегія. Всі будівельні об'єкти за участю держави виконуються в BIM в форматах IFC / IFD;

2011 Великобританія. Обов'язкове використання BIM для громадських будівель, а з



будівництва, що здійснюється за державної підтримки, з врахуванням життєвого циклу об'єктів та застосуванням баз даних об'єктів-аналогів. Розширення критеріїв обов'язковості використання BIM-технології для об'єктів, спорудження яких здійснюється за рахунок приватних коштів [6].

Також [6] передбачено внесення напряму «Впровадження будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) у будівництві» до переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок. Внесення планується на IV квартал 2021, тобто з 2022 року може розпочатися державне фінансування наукових досліджень з цього напряму.

#### **Висновок.**

У роботі наведено аналіз світового досвіду, щодо впровадження технологій інформаційного моделювання будівель та споруд. Також розглянуто основні засади впровадження BIM в Україні, що регулюється Концепцією впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) в Україні. Спираючись на наведене слід зазначити, що в Україні слід змінити майже всю структуру контролю в галузі містобудівної діяльності з розробкою методів визначення критеріїв важливості інформації при створенні інформаційної моделі споруди [7].

#### **Список використаних джерел**

1. Талапов В.В. Основы BIM: введение в информационное моделирование зданий. М.: ДМК Пресс, 2011. 392 с.

УДК 535.4 + 621.373  
ГРНТИ 59.39.29

1. 2. Rodriguez J. Introduction to Building Information Modeling [Электронный ресурс]. URL <https://www.thebalancesmb.com/introduction-to-building-information-modeling-bim-845046> (дата обращения: 28.10.2020).

2. 3. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors, 3rd Edition / [C. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks та ін.], 2018. – 688 с.

3. 4. BIM. Мировой опыт внедрения. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://takosystems.com/polezno/item/69-bim-mirovoj-opyt-vnedreniya.html>.

4. 5. BIM от внедрения до реновации. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://special.kommersant.ru/bim/#chastnie-proekty>.

5. 6. Концепції впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) в Україні [Электронный ресурс]. URL <https://www.minregion.gov.ua/base-law/grom-convers/elektronni-konsultatsiyi-z-gromadskistyru/proekt-rozporyadzhennya-kabinetu-ministriv-ukrayiny-pro-shvalennya-konceptziyi-vprovadzhennya-tehnologij-budivelnogo-informacijnogo-modelyuvannya-vim-tehnologij-v-ukrayini/> (дата обращения: 28.10.2020).

6. 7. Безушко Д.І. Методи визначення важливості інформації при створенні інформаційної моделі споруди // Modern engineering and innovative technologies Issue 12. Part 2. - Karlsruhe, Germany, 2020. P.100-105.

#### **Gregory Dolya**

*professor, Department of Theoretical and Applied Systems Engineering  
Faculty of Computer Science, V.N. Karazin Kharkiv National University,  
Kharkiv, Ukraine.  
(ORCID: 0000-0001-8888-5189)*

#### **Kostiantyn Bondarenko**

*student, Department of Systems and Technologies Modeling,  
Faculty of Computer Science, V.N. Karazin Kharkiv National University,  
Kharkiv, Ukraine.  
(ORCID: 0000-0002-2430-0716)*

### **LASER DETECTOR OF ACOUSTIC OSCILLATIONS UTILIZING A RETROREFLECTIVE SURFACE WITH GLASS BEADS**

#### **Доля Г. Н.**

*профессор, кафедра  
Теоретической и прикладной системотехники, факультет компьютерных наук,  
Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина,  
Харьков, Украина.  
(ORCID: 0000-0001-8888-5189)*

#### **Бондаренко К. А.**

*студент, кафедра  
Моделирования систем и технологий, факультет компьютерных наук,  
Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина,  
Харьков, Украина.  
(ORCID: 0000-0002-2430-0716)*



## ЛАЗЕРНЫЙ ДАТЧИК АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕТОВОЗВРАЩАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СО СТЕКЛОШАРИКАМИ

**Abstract.** A method for detecting acoustic oscillations of a medium using laser radiation and reflective surfaces based on micro glass beads is considered. A mathematical model that describes all stages of the detection process has been created. A computer simulation model has been developed, which makes it possible to study the detection system providing ability to vary a wide range of parameters. The model was verified by comparing the simulation results with those observed during a physical experiment. Some simulation results are presented. The prospects of using the developed model are outlined.

**Аннотация.** Рассмотрен метод детектирования акустических колебаний среды с помощью лазерного излучения и световозвращающих покрытий на основе микрошариков. Создана математическая модель, описывающая все этапы процесса детектирования. Разработана компьютерная имитационная модель, позволяющая исследовать систему детектирования при варьировании широкого ряда параметров. Произведена верификация модели путем сравнения результатов моделирования с наблюдаемым при физическом эксперименте. Представлены некоторые результаты моделирования. Очерчены перспективы использования разработанной модели.

*Key words: lasers, acoustics, detectors, retroreflective surfaces, micro glass beads, simulation, specklometry.*

*Ключевые слова: лазеры, акустика, детекторы, ретрорефлекторные поверхности, микростеклошарики, имитационное моделирование, спеклометрия.*

### Introduction

Currently, laser detectors are widely used. These devices allow solving a wide range of tasks - vibration control, laser ranging, velocimetry, turbulence control, as well as registration of acoustic oscillations and others [1-8]. This article focuses on acousto-optic detectors.

One of the key parameters of such systems is the power of the received signal and, accordingly, the signal-to-noise ratio during detection. Retroreflective surfaces (RRS) allow to increase the power reflected in the direction towards the light receiver. The most widespread use of retroreflectors is in the manufacture of signs and transport markings. Such surfaces are a set of miniature reflectors (prisms or glass beads (GB)) put on some base (plastic, paint, etc.) [9, 10]. Due to these design features, retroreflectors have some useful properties. For example, much like in case of the rough-surfaced objects, speckle pattern is formed in the far zone when they are irradiated with laser radiation, which can be used for laser ranging. It is also possible to vary the microstructure, which opens up an opportunity to influence the transformation characteristics of the light field and intensity distribution form of the reflected laser radiation in the far zone (receiving plane). The latter of these features is of particular interest and is the subject of research [8, 11-13], since it makes it possible to optimize the RRS when used as part of the specific optical subsystems to improve the target useful applied properties of systems that include them.

Acousto-optic detectors are actively exploited and have the potential for use in various industries, and the use of retroreflectors in addition to them makes it possible to create new promising types of detectors [3, 4]. Earlier, in [8, 10], a study was carried out showing the possibility of creating such detectors using corner reflectors. Task of current interest is to study the features of acoustic oscillations detection systems consisting of a laser sensor and a reflective surface based on the glass beads. In contrast to the regular space lattice structure of retroreflectors, the location of beads

on the surface and their size are random, which means that to solve such a problem, it is practical to develop a simulation model of the system. This article is devoted to the description of such a model and the results of its use.

### Method description

The method of detecting sound in air by probing the medium of its propagation with a laser beam and analyzing the characteristics of the laser radiation reflected after that from the RRS was first described in [8]. The principle of detecting acoustic oscillations in air using a laser is based on the fact of optical density modulation of air during acoustic wave propagation. In essence, such modulation is inextricably linked with the nature of the mechanical deformations of the substance during the acoustic vibration, and, therefore, carries information about the properties of the sound signal. This makes it possible to use a laser beam to detect oscillations: in the general case, the amplitude-phase distribution (APD) of its field changes when it passes through an optically inhomogeneous medium of an acoustic wave, which means that by observing the change in the APD of the light field in time, it is possible to restore the acoustic signal that modulated it.

Based on this principle of detection, in order to create a real detector, it is necessary to choose a registration method for a modified optical signal. In this study, for this purpose, a retroreflector based on micro glass beads is added to the optical system. Located on the other side of the acoustic wave from the laser, the reflective surface reflects the power of the optical signal back to the emitter, which makes it possible to spatially combine the photodetector with the emitter, making the detection system much more compact. Basically we are talking about the RRLS (retroreflective laser sensor). In addition, the RRS also have such useful properties as a low coefficient of reflection loss, a high degree of spatial concentration of reflected laser radiation in the direction of the emitter, the formation of a speckle pattern in the far zone, the possibility of parametrization of the surface microstructure during creation (the meaning of these



advantages is disclosed later in the article). After reflection from the RRS, the light passes back through the sound wave and its power is integrated using a lens on the photodetector. The regularities of the photocurrent change due to the changes of the scattered radiation pattern in the receiving plane is the consequential response to the acoustic vibrations.

The proposed detection scheme is useful in that it does not require mechanical interaction of the sensor with the medium for propagating acoustic vibrations - the detector can be located outside of this medium. Due to the fact that the observation is carried out by means of an optical medium, a number of advantages arise. It becomes possible to avoid distortion of the acoustic properties of the observed system by introducing a sensor into it, if we consider the heating and ionization

of air by laser radiation to be insignificant. Also, there is no need to place the sensor close to the source of acoustic oscillations - the sound power is observed indirectly, which means that the degree of the detector's remoteness is limited not by the power of the observed object, but by the properties of the optical system.

In this regard, it is of interest to study the relationship between the parameters in the system, as well as the effect of changing the parameters of the RRS on the quality of detection. For this purpose, it is practical to develop a simulation model and investigate its behavior under various conditions of detection.

#### Physics simulation

During the research, a number of physical experiments were carried out.

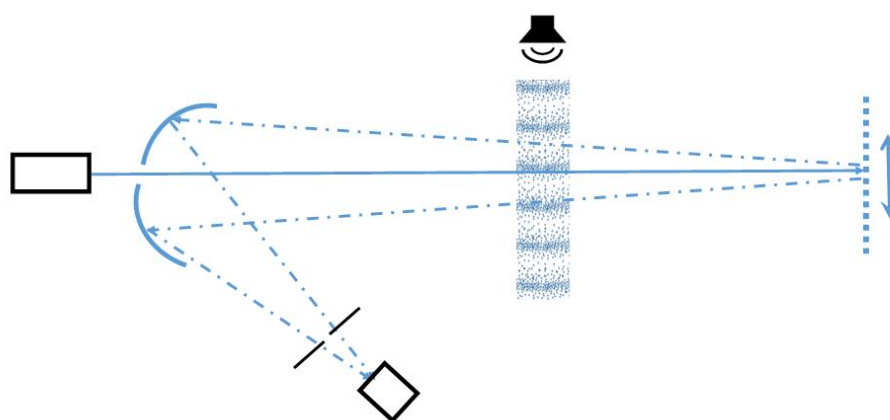


Fig. 1. – Experimental setup scheme

Shown in Fig. 1, the setup diagram includes the following elements: a source of laser (monochromatic) radiation with an external focusing device (not shown), a source of sound vibrations - a speaker (acoustic column), a reflecting surface with a reflective coating of micro glass beads applied to it, a radiation collector, a diaphragm, and a photodetector.

The light emitted by the laser initially has the form of a diverging Gaussian beam and passes through the beam expander/focusing device, which forms a light spot of variable diameter with a Gaussian intensity distribution in the cross section on the light reflective surface. When propagating from the emitter to the surface, the beam passes through the optically inhomogeneous thickness of the acoustic wave, i.e. traveling sound wave. The latter plays the role of a deflector [14, 15], since when choosing the frequency of sound vibrations, the condition of smallness of the width of the light beam relative to the length of the acoustic wave is ensured. The laser beam formed in this way illuminates a specific area on a stationary screen with a RRS. After the transformation of the amplitude-phase distribution of the light wave in the elements of the RRS, the "reflected" wave is directed back to the source, repeatedly passing through the sound wave, forming a characteristic speckle pattern in the far diffraction zone (which is true with selected parameters). In the receiving plane, the intensity

distribution formed as a result of diffraction is spatially scaled and integrated within the area of the receiving diaphragm of a given shape on the sensitive surface of the photodetector, while the obtained photocurrent is studied using a spectrum analyzer. Dynamic changes in the structure of the air refractive index profile in a sound wave lead to deflection of the focused spot over the surface with micro beads, which leads to periodic changes in the structure of the speckle pattern in the receiving plane and corresponding changes in the temporal structure of the photocurrent.

#### Simulation stages

In accordance with the above method, simulation modeling can be broken down into main stages:

- 1) Generation of the original light beam structure.
- 2) Interaction of the light field with an acoustic wave.
- 3) Transformation of light field APD on the RRS.
- 4) Finding the APD of speckle pattern in the receiving area (far zone).
- 5) Converting the resulting APD into a photocurrent.

Note that stages 1, 3, and 4 are included in the model for the transformation of laser radiation on the RRS GB, described in detail by the authors in article [16], and therefore details regarding these items are omitted in this article.

**1. Generation of the original light beam structure.**

A single-mode monochromatic laser generating a polarized wave is assumed as a source. The radiation of such a laser can be described by a Gaussian beam, for which we turn to the works of Kogelnik and Lee [17], as well as Marcuse [18]. A detailed analysis of how it works in the model and the transition to geometric optics can be found in the article [16].

**2. Interaction of the light field with an acoustic wave.**

In this work, it is assumed that the condition of the smallness of the laser beam width relative to the acoustic wavelength in air is satisfied. This is quite

justified, since at sound frequencies in the part of the spectrum audible to the human ear - say from 100 Hz - 10 kHz - the wavelength range in air at a propagation speed of 330 m/s will be approximately 3.3 m - 0.033 m. Since the diameter a laser beam an order of magnitude less than 3 cm is easily achievable, the condition is quite feasible in practice. And this means that the sound wave can be represented as an acousto-optic refractive deflector - the mechanical propagation of a sound wave is accompanied by a change in the air density, which creates a gradient of optical density and causes the beam to deviate from the axis of its initial propagation.

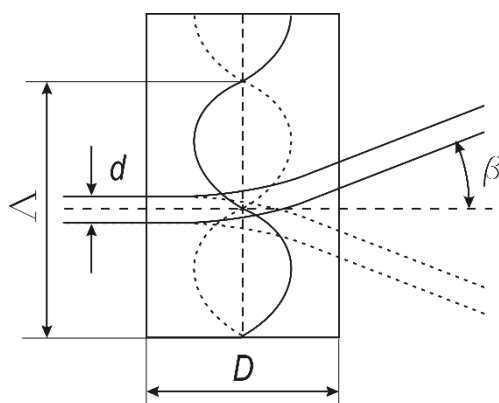


Fig. 2. – Acousto-optic refractive deflector

Then the following formula is applicable for the deflection angle [14]:

$$\beta = \frac{2\pi\Delta n D}{n\Lambda} \sin(2\pi(ft + \varphi)), \quad (1)$$

where

$\Delta n$  - modulation amplitude of the refractive index of the medium;

$D$  - acoustic wave thickness;

$n$  - refractive index;

$\Lambda$  - acoustic wavelength;

$f$  - acoustic frequency;

$t$  - time;

$\varphi$  - phase shift;

For application in the model, the acoustic wave is assumed to be a plane with the wave propagation axis indicated on it. At the zero point of the axis, the phase is assumed to be zero.

The simulation begins with the fact that we select a point on the plane of the acoustic column through which we want to pass the tracing ray. Let the refractor plane be specified by three points  $M_1, M_2, M_3$ , in this case, and let the axis of wave propagation be  $\{M_1, \overline{M_1M_3}\}$ ,  $\varphi(M_1) = 0$ .

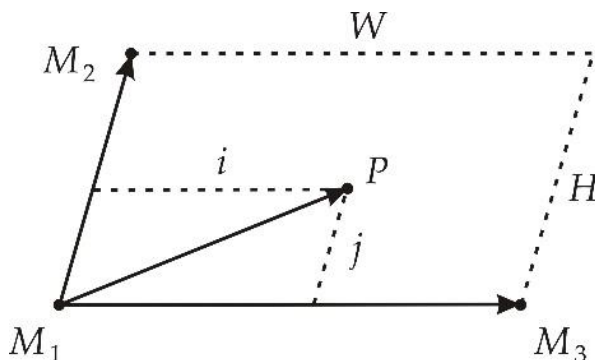


Fig. 3. – Transition to a point on a plane

The sampling rate determines the number of points that will be traced. It is introduced as  $W$  - number of points per vector module  $\overline{M_1M_3}$ . The number of points will be calculated inside the model, let's call it  $H$ , for  $\overline{M_1M_2}$  in such a way, that ratio  $W/|\overline{M_1M_3}| =$

$H/|\overline{M_1M_2}|$  is satisfied. At the first stage, a discrete point is selected on the plane  $(m, n): m \in [0, 1, 2, \dots, W - 1]; n \in [0, 1, 2, \dots, H - 1]$ . It gets converted to a point in space  $P(x, y, z)$ , for which the parameters of the emitter field will be calculated. To do

this, it is enough to calculate its radius vector  $\vec{r}_P$  (fig. 3.):

$$\vec{r}_P = \vec{r}_{M_1} + \frac{m}{W} \overline{M_1 M_3} + \frac{n}{H} \overline{M_1 M_2}. \quad (2)$$

In this case, the phase at a point is determined elementarily, taking into account the speed of sound propagation in air. It is enough to divide the projection  $\vec{r}_P$  on the propagation axis  $\{M_1, \overline{M_1 M_3}\}$  by acoustic wavelength:

$$\varphi(\vec{r}_P) = \frac{\vec{r}_P \cdot \overline{M_1 M_3}}{|\overline{M_1 M_3}| \lambda}. \quad (3)$$

So we got a point in space and the phase of the acoustic wave. Substituting into the equation for a Gaussian beam, we obtain vectors indicating the direction and polarization of the light field of the emitter. An important note - since the planes of the emitter and the acoustic column are set parallel, and since the distance from the emitter to the plane of the wave is relatively large, the curvature of the Gaussian beam can be viewed large enough to consider the vector perpendicular to the plane - it is not difficult to calculate the vector, but there is no necessity in this case. Substituting the phase in formula (1), we obtain the deflection angle. It is now possible to calculate a new unit vector  $\vec{k}$ , coinciding with wave vector after deflection:

$$\begin{aligned} \vec{x}: \vec{x} &= \frac{\overline{M_1 M_3}}{|\overline{M_1 M_3}|}; \\ \vec{y}: \vec{y} &= \frac{\overline{M_1 M_2}}{|\overline{M_1 M_2}|}; \\ \vec{z}: \vec{z} &= -\frac{\vec{x} \times \vec{y}}{|\vec{x} \times \vec{y}|}; \\ \vec{k} &= \vec{x} \sin \beta + \vec{z} \cos \beta. \end{aligned} \quad (4)$$

And the new polarization vector  $\vec{E}'$  can be easily restored because it lies in the same plane with the previous vector  $\vec{E}$  and is perpendicular to the direction vector of the light field  $\vec{k}'$ :

$$\vec{E}' = |\vec{E}| \frac{(\vec{k}' \times \vec{E}) \times \vec{k}'}{|\vec{k}' \times \vec{E}| \times \vec{k}'}. \quad (5)$$

### 3. Transformation of light field APD on the RRS.

In view of the fact that the actual dimensions of the beads correspond to 50  $\mu\text{m}$  in diameter or more, and the laser wavelength in the long-wavelength part of the visible spectrum is only 0.7  $\mu\text{m}$ , the approximation of geometric optics can be used to calculate the field transformation inside a single microsphere.

In the developed model, the RRS is assumed to be two parallelepipeds with a common side located in space. They represent the cover layer and the substrate, both layers are dielectric. Enclosed between parallelepipeds are beads. The latter in this model are considered ideal spheres of a dielectric, with a given

radius, as well as a center for each of them. As mentioned above, the RRS is supposed to be a kind of parallelepiped made up of two with a common face. This means that we will be looking for the APD on a plane - on one of the faces. The substrate, however, is assumed to be thick enough so that none of the balls go beyond it and its thickness is not indicated separately, since this does not affect the simulation.

The face plane of the reflector is defined by three points. The vectors of incidence and polarization at the input are obtained from the previous step. Now we can find the intersection of the ray deflected at the last stage with the plane of the RRS - we get a point on the plane. After that, one can calculate the phase change from the distance between the obtained one and the point on the plane of the deflector. Then the transformations described in [16] take place and we get a point where the beam exits back to the surface of the RRS with the amplitude, phase and polarization vector. Each ray has its own polarization at the point of exit to the surface. To apply the scalar theory of diffraction, it is sufficient to decompose the polarization vector for each of the rays into a common basis, so that is parallel and perpendicular components are in the same basis. Orthogonal components do not interfere with each other, which means that one can calculate their images in the far zone separately.

### 4. Finding the APD of speckle pattern in the receiving area (far zone).

After the APD has been found on the surface of the reflector, one can start calculating the speckle pattern formed in the far zone. For this, let us turn to the basic concepts of diffraction theory. APD on a plane can be considered as a set of point radiation sources, the coherence of which is provided by the nature of the laser illuminating the surface. As shown in the article [16], the superposition integral can be represented as the Fourier transform.

The resulting Fourier transform is the far-field diffraction pattern. As applied to the model, it should be noted that two Fourier transforms are calculated - for the parallel and perpendicular components of the intensity vector relative to the common basis.

### 5. Converting the resulting APD into a photocurrent.

The resulting pair of Fourier transforms represents the far-field APD for the perpendicular and parallel polarization components. To convert into a photocurrent, a few simple steps are enough. To begin with, let's translate the amplitude into intensity - by squaring. The resulting intensities for the components can be added. At this stage, one can simulate a different receiving aperture by imposing a bit mask on the resulting distribution - multiplying the distribution with an array of zeros and ones of the same size - this way we can cut out the central aperture, make it circular, etc. Further, it is enough to sum up all intensities for each of the polarizations - this is equivalent to the operation of integration over the area, which, in fact, is produced by the lens - the result will be the power. The obtained instantaneous energy characteristic can be represented as directly proportional to the photocurrent - the

characteristic of the photodetector can be considered linear and the sensor is infinitely sensitive because this does not apply to detection and is solved in applied cases by typical methods.

Further, one can trace the dynamics of the photocurrent in time by simulating the behavior of the system at successive discrete moments in time. Thus, we receive a photocurrent. Now we need to get the spectral characteristics of this sampled signal. To do this, first we find and subtract the average - this is how we get rid of the constant component. Next, we apply the Fourier transform and obtain the spectrum of the photocurrent - it carries information about the detected

acoustic vibrations, since the optical signal that formed it was modulated by a sound wave.

**Results of physical and simulation modeling**

An important characteristic of an acoustic vibration detector is the amplitude of the useful signal (current) at the output of the photodetector, which is convenient to analyze in the spectral domain in the case of detecting a monochromatic sound signal. At the same time, it was noticed that in some situations, in addition to the fundamental frequency, the second and higher harmonics are observed. Fig. 4 shows the spectrum of the photocurrent recorded on the experimental setup, containing the second harmonic of the audio frequency.

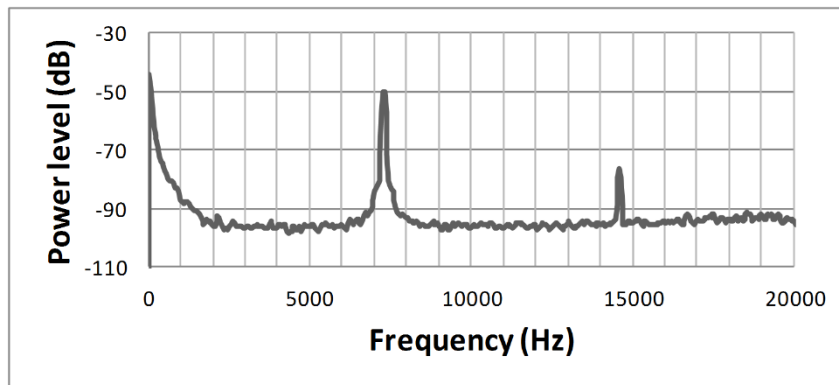


Fig. 4. – Photocurrent spectrum recorded at the experimental setup

Here, the abscissa shows the frequency in Hz, and the ordinate shows the power level of the spectral component of the photocurrent in decibels.

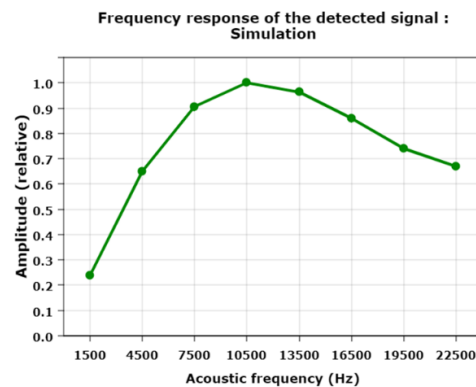
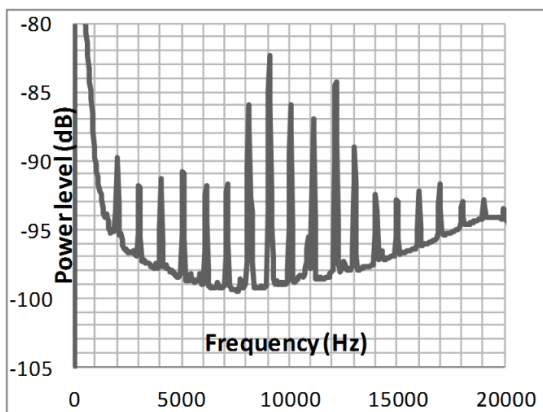
The contribution of harmonics to the registered signal can be measured using the coefficient

$$k_f = \frac{\sqrt{u_2^2 + u_3^2 + \dots + u_n^2}}{\sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots + u_n^2}}, \quad (6)$$

where  $U_i$  – effective value of the  $i$  - th signal harmonics. Obviously, the larger the value of the coefficient, the worse, because it means more influence of harmonics on the quality of detection of a

monochromatic signal. We will call such a coefficient the harmonic coefficient and use it as one of the metrics for assessing the quality of the detected signal.

The dependence of the photocurrent on the frequency of sound vibrations (frequency response (FR)) is also of practical interest. The linearity of such a characteristic would mean the transmission without distortion of a complex audio signal consisting of a set of frequencies. The form of such a characteristic, measured experimentally by analyzing the photocurrent with a sequential change in the frequency of the sound signal, is shown in Figure 5 (a). It shows that the characteristic has a maximum in the frequency range of 9 kHz and decreases in the region of lower and higher frequencies.



Puc. 5. – FR of the detected signal: a) physical experiment, b) computer simulation

A similar dependence was studied by means of simulation with the values of the parameters corresponding to the physical experiment; the results are shown in Fig. 5 (b). Let's pay attention to the similarity of the shape of the frequency response curves, which indicates the adequacy of the simulation model to real physical processes occurring during detection.

The type of frequency response in figures 5 (a) and 5 (b) can be explained as follows. All other things being equal, an increase in the frequency of the sound wave entails an increase in the deflection of the light beam (relation (1)). At a small angle and a small distance from the acoustic column to the RRS, the beam spot

periodically deviates from the axis along the RRS surface insignificantly - by an amount comparable to the diameter of the beam itself. Very small deviations (down to zero) create small fluctuations in the detected power.

As the frequency increases, the amplitude of the displacement of the beam over the surface increases. At a fixed sampling rate, the approximation of the photocurrent change curve becomes more and more rough, which is adequate to an increase in the power of harmonics of the fundamental frequency and, consequently, to a decrease in the contribution of oscillations at the fundamental frequency to the alternating component of the photocurrent.

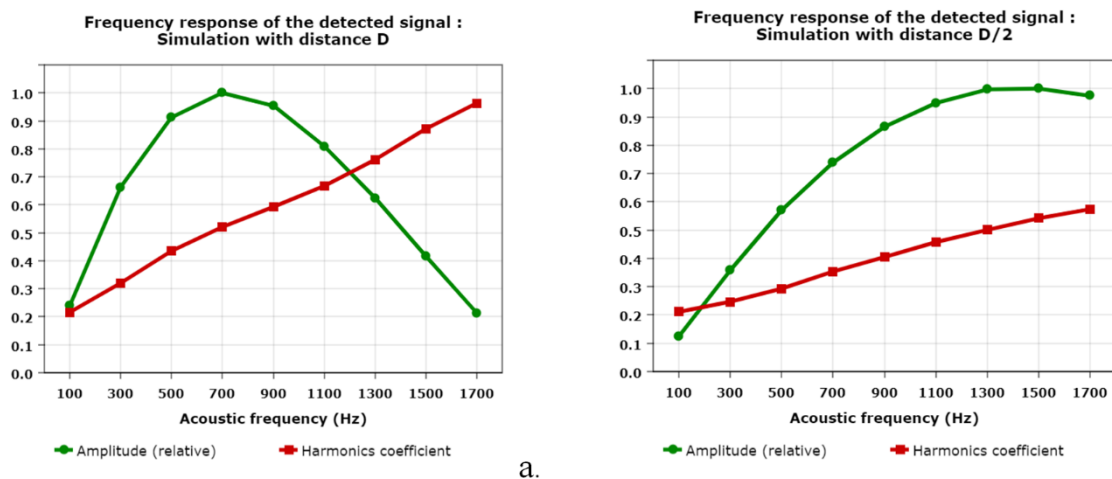


Fig. 6. – FR obtained by simulation with the distance (D) between acoustic wave and RRS  
 a)  $D_a = const$ , b)  $D_b = D_a/2$

Figure 6 shows the results of calculating the frequency response by simulation for two different cases of the location of the sound wave in the space between the emitter and the RRS. The absolute maxima of the amplitude for both cases presented in the graphs coincide. Figure 6 (b) corresponds to the situation when the sound emitter is located twice as close to the RRS as compared to the case in Fig. 6 (a). It can be seen from the above figures that the shape of the frequency response does not change, however, its maximum shifts to the region of higher frequencies as the acoustic column approaches the RRS. This is due to the fact that with a fixed value of the angle of deflection of the beam by the sound wave, as it (the column) approaches the RRS, the amplitude of the displacement of the light spot over the surface decreases. In this case, the amplitude of the useful signal grows slower with increasing frequency, while the harmonic distortion also grows slower.

Next, let us pay attention to the simulation modeling results of the effect of the diameter of the beam hitting the RRS (Fig. 7), while average bead size is fixed. Here, the abscissa shows the ratio (in percent)

of the half-width of the Gaussian beam to the mean of the bead diameter, and the ordinate shows the harmonic coefficient for the spectral component of the photocurrent at the frequency of sound vibrations.

It is obvious from the graph that the ratio of the beam diameter to the diameter of the bead is of great importance: it is possible to reduce, and therefore to improve, the value of the harmonic coefficient, since when it increases, the sine wave observed in the photocurrent, corresponding to the scanning frequency of the acoustic deflector of the sound wave, is smoothed due to the illumination of a larger the number of micro-reflectors.

Note that in the case when the beam diameter is commensurate with the size of the bead, a situation is created in which the beam first completely covers the bead, and then - when the beam does not cover any bead at all. In this case, in addition to the periodicity of the process due to sound oscillations, additional frequencies will appear in the spectrum of the output signal due to the (quasi-)periodic nature of the beads arrangement on the RRS.

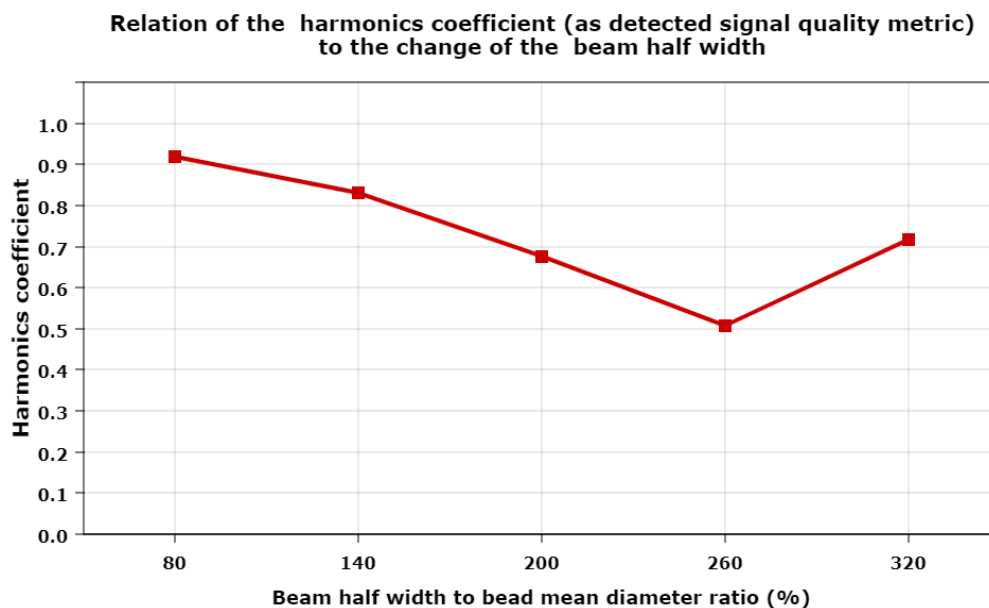


Fig. 7. – Change in harmonics coefficient with increasing beam half width

If the beam diameter is too large relative to the diameter of one bead, then the variable component in the detected light power becomes small compared to its average value. The average stays near mean value since

the number of illuminated balls is large and does not change significantly when the beam is moved.

An important advantage of simulation is the ability to change the parameters of the RRS (Fig. 8), which is not always possible to provide in a physical model.

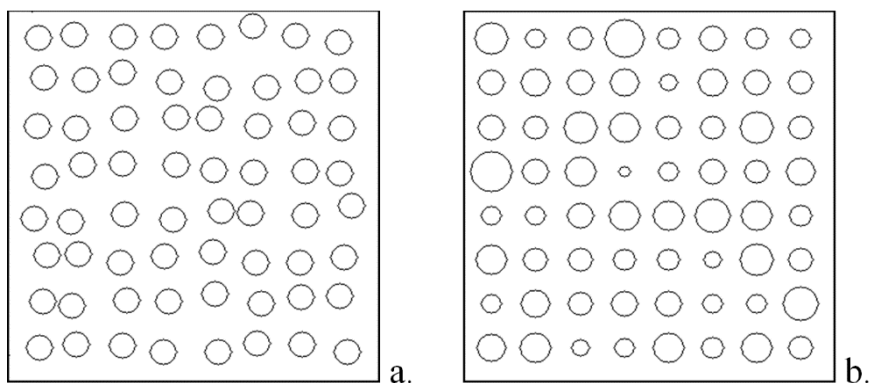


Fig. 8. – Examples of generated GB distributions with a) SD of the bead radius 0%, SD from the grid node 12%, b) the bead radius 18%, SD from the grid node 0%

Figure 9 presents the results of simulation of the effect of the standard deviation (SD) of the size of the bead at a fixed average size. Here, the abscissa shows the values of the relative standard deviation as a

percentage of the average bead size, and the ordinate shows the power of the useful signal (blue line) and the value of the harmonic coefficient (red line).

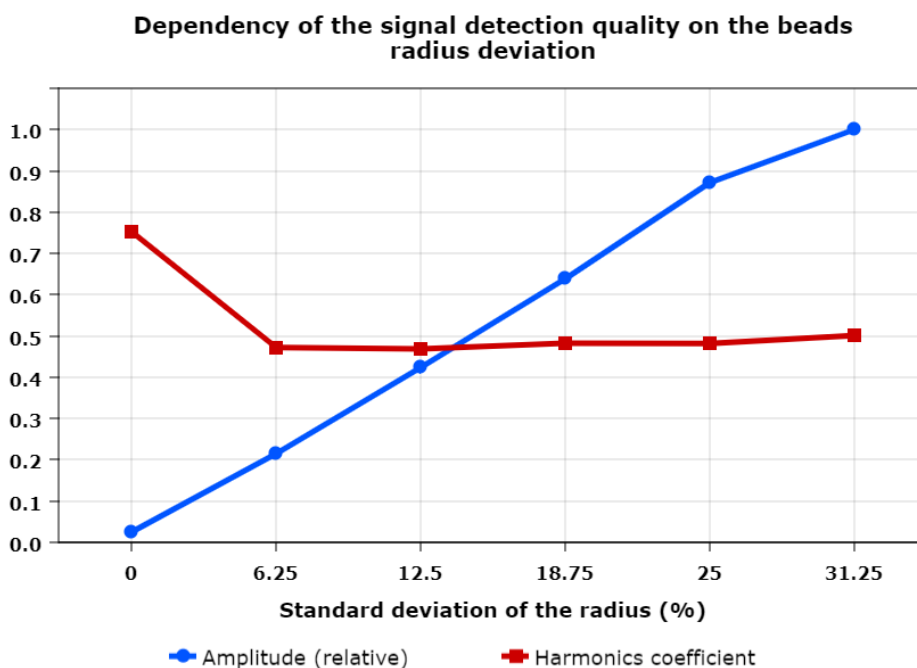


Fig. 9. – Dependency of the signal detection quality on the beads radius deviation

It can be seen from the obtained dependence that a random bead size is more preferable than a deterministic one. This is due to the fact that, with a deterministic size of the beads, the variable component carrying information about sound oscillations is relatively small compared to the average value of the detected light power.

Figure 10 shows the results of simulation of the influence of the irregularity of the arrangement of balls on the surface. Here, the abscissa shows the values of the position standard deviation of the beads displaced from the nodes of an ideal square lattice.

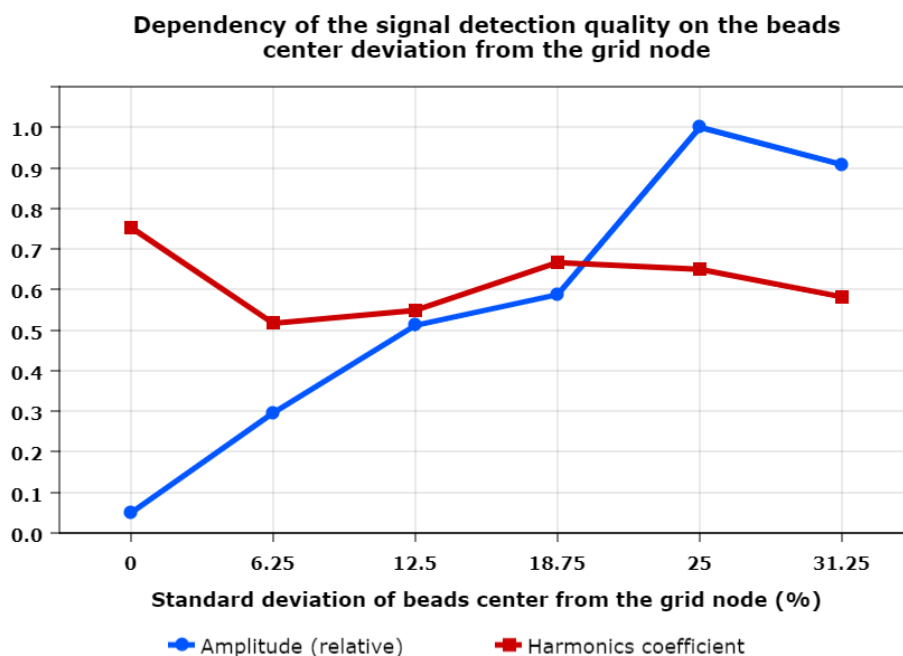


Fig. 10. – Dependency of the signal detection quality on the bead center deviation from the grid node

The ordinate is the power of the useful signal (blue line) and the value of the harmonic coefficient (red line). It can be seen from the results obtained, that the use of an ideal lattice is less advisable than a randomized one up to a certain value of SD. The

reasons for such a change in the useful component of the photocurrent are similar to those discussed above when analyzing the effect of randomization of the bead size.



### Conclusion

The paper considered some of the features of the method for detecting acoustic oscillations using laser radiation and retroreflective surfaces. On the basis of the mathematical description of the physical processes occurring during detection, a flexible simulation model of the process of laser detection of acoustic oscillations in air using a reflective surface with glass beads has been created. The developed model was verified by comparing the results of the frequency response measurement modeling with the results of a physical experiment. In particular, the FR was obtained in the form of a curve containing a maximum in the central region of the audio range and decreasing at its edges.

A number of experiments were carried out to reveal the dependence of the detection quality on the variation of the RRS parameters. In the course of analyzing the results of these experiments, the relationships between the parameters of the system were revealed, and recommendations were formulated for their selection to improve the quality of detection. It is shown that for practical applications it is advisable to maintain a rational ratio of the diameter of the light beam to the diameter of the bead and to the period of their location on the surface. It was shown that the randomization of the size of the glass beads and the spatial period of their location is desirable to increase the power of the detected signal.

The obtained results can be used in the construction of specific acousto-optic detectors for solving applied problems, helping to select the appropriate parameters of the RRS. It is possible to develop the work in the future in the direction of applying the created model to the detection of a complex (multifrequency, composite) acoustic signal, as well as carrying out computationally intensive studies to determine the rational parameters for the detector of acousto-optic oscillations.

### References

1. Measures R. M. *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications*. Malabar, FL : Krieger Publishing, 1992.
2. Tetsuo Fukuchi, Tatsuo Shiina. *Industrial Applications of Laser Remote Sensing*. Bentham Science Publishers, 2012.
3. Korpel, A. *Acousto-Optics, Second Edition*; Technology & Engineering, CRC Press, 1996.

4. Magdich, L.N. *Acoustooptic Devices and Their Applications*; Technology & Engineering, CRC Press, 1989.
5. Sirohi, R.S., Ed. *Speckle Metrology*; Technology & Engineering, CRC Press, 1993.
6. M. Kowalczyk, Pluta M. , Jabczynski J. K., and Szyjer M. *Laser speckle velocimetry // Optical Velocimetry, Proc. SPIE 2729*, 1996. Pp. 139–145.
7. Raffel M., Willert C., Kompenhans J. *Particle Image Velocimetry. A Practical Guide*. Springer, 1998.
8. Dolya G. M., Lytvynova O. S. *Modeling of fluctuations of laser radiation scattered on the reflector array in a turbulent atmosphere // Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM)*, 2011. Pp. 108-111.
9. Tietze S., Lindner G. *Visualization of the interaction of guided acoustic waves with water by light refractive vibrometry. // Ultrasonics, Issue 99*, 105955, 2019.
10. Dolya G.N., Litvinova E. S. *Retroreflective laser detector of acoustic oscillations // Proceedings of 12th International Conference on Laser & Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM'2016)*, Sept. 15-18, Odessa, Ukraine. Pp. 108-111.
11. Lloyd J. *A brief history of retroreflective sign face sheet materials. The principles of retroreflection*. REMA publications, 2008.
12. Migletz J., Fish J. K., Graham J. L. *Roadway Delineation Practices Handbook*. US Department of transportation, Federal highway administration, 1994.
13. Héricz D., Sarkadi T., Erdei G., Lazuech T., Lenk S., Koppa P. *Simulation of small- and wide-angle scattering properties of glass-bead retroreflectors // Applied Optics Vol. 56, Issue 14*, 2017. Pp. 3969-3976.
14. A.J. Giarola, T.R.Billeter, *Electroacoustic deflection of a coherent light beam, Proc.IEEE 51, #8*, 1150 (1963).
15. R. Lipnik, A. Reich, G.A. Schoen, *Nonmechanical scanning of light using acoustic waves, Proc. IEEE 52, #7*, 853 (1964).
16. Dolya G., Bondarenko K. *Model of laser radiation transformation upon retroreflection from glass beads based surface // East European Scientific Journal, #5 (45)*, 2019. Pp. 10-20.
17. Kogelnik H., Li T. *Laser Beams and Resonators // OSA Publishing: Applied optics, Vol. 5. No.10*, 1966. Pp. 1550-1567.
18. Marcuse D. *Light transmission optics. – Van Nostrand Reinhold*, 1972.

**Galina Gryaznova**Associate Professor of Architectural Design  
Ural State University of Architecture and Art**Anna Gryaznova**Bachelor of Architecture  
Ural State University of Architecture and Art  
620075 Russia, Yekaterinburg, St. Carla Liebknecht, 23.

UDC 69.001.5

GRNTI 67.07 Architecture

**PRINCIPLES OF FORMING A MULTIFUNCTIONAL PUBLIC CENTER IN THE STRUCTURE OF  
A TRANSPORT HUB****Грязнова Галина Геннадьевна**доцент кафедры Архитектурного проектирования  
Уральский государственный архитектурно-  
художественный университет**Грязнова Анна Валентиновна**бакалавр Архитектуры  
Уральский государственный архитектурно-  
художественный университет  
620075 Россия, Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, 23.

УДК 69.001.5

ГРНТИ 67.07 Архитектура

**ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ОБЩЕСТВЕННОГО  
ЦЕНТРА В СТРУКТУРЕ ТРАНСПОРТНО - ПЕРЕСАДОЧНОГО УЗЛА**

**Abstract.** This article discusses the basic principles and techniques of forming transport hubs with a developed public service structure. Multifunctional buildings are new type of industrial and public areas. It allows to create functional zones that have a large number of intersections, emphasizing the unity and subordination of the spaces of the project. As a result, the quality of the urban environment and the standard of living of the population are improving. Important aspects of design are environmentally friendly construction and also efficient use of natural resources.

**Аннотация.** В данной статье рассмотрены основные принципы и приемы формирования транспортно-пересадочных узлов с развитой структурой общественного обслуживания. Многофункциональные комплексы формируют новый тип промышленно-общественных зданий, позволяют создавать функциональные зоны, имеющие большое количество пересечений, подчеркивая единство и соподчиненность пространств объекта проектирования. В результате, улучшается качество городской среды и уровень жизни населения. Важными аспектами проектирования являются вопросы экологически безопасного строительства и эффективного использования природных ресурсов.

**Keywords:** *transport hub, community services, multifunctional building, architectural solution.*

**Ключевые слова:** *транспортно-пересадочный узел, общественное обслуживание, многофункциональный комплекс, архитектурное решение.*

Архитектурная теория и практика, активно развиваясь, создают типологически новые интересные объекты городской среды. В крупных и крупнейших городах всего Мира качество жизни населения во многом оценивается удобством транспортной инфраструктуры и системы общественного обслуживания. Чем меньше времени тратит каждый житель на перемещение в «городских джунглях», пересадку с разных видов транспорта и осуществление бытовых, культурно-образовательных и других социальных функций, тем комфортнее условия жизни в городе, для этого транспортно-производственная функция зданий и сооружений может быть дополнена системой общественного питания, магазинов, пунктов бытового обслуживания.

Сегодня транспортно-пересадочные узлы

представляют собой многофункциональные объекты, в которых транспортная функция является основополагающей, но не определяющей пространственное содержание всего узла. Дополнительными функциями являются коммуникация, торговля, культурно-развлекательные мероприятия, социальной активности, а так же экономическая, экологическая и эстетическая. Все функции должны быть реализованы в целостной системе пространств, носящих не только технологический характер, но и гуманное для человека соотношение производственных и экологических характеристик. Большое значение приобретает видеэкология и внутренняя логистика объекта.

Приступая к разработке архитектурно-планировочного решения объекта проектирования

важно формировать пространство исходя из особенностей места проектирования, а также основываться на применении передовых технологий энергоэффективных решений в строительстве. Рассмотрим несколько подходов к формированию общественных зданий на примере существующих объектов и проектных предложений (Табл.1):

Таблица 1.

1	2	3
<p>Многофункциональный комплекс «Центр Ванке». Шеньчжень (Китай). Арх. Стивен Холл Источник: <a href="https://archi.ru/world/20878/gorizontalny-i-neboskreb">https://archi.ru/world/20878/gorizontalny-i-neboskreb</a></p>	<p>Офисное здание. Хенгцинь (Япония). Арх. Тайхэй Мацумото Источник: <a href="https://www.g-mark.org/award/describe/49438">https://www.g-mark.org/award/describe/49438</a></p>	<p>Общественный центр для жителей района г. Загреб (Хорватия) «Badel Block». Арх. WAU Design Источник: <a href="https://www.archdaily.com/243091">https://www.archdaily.com/243091</a></p>
		
<p>Под искусственными холмами скрываются конференц-зал, спа-центр и гараж, а в самом здании расположены штаб-квартира риэлтерской компании Vanke Co. Ltd, офисы, жилье и гостиница.</p>	<p>Стратегический проект района Чжухай города Хэнцинь, который станет базой для проекта Большого залива Гуандун-Гонконг-Макао. Он включает в себя центральную городскую площадь и здания с каналами и горой, соединенными зеленой городской площадью.</p>	<p>Комплекс зданий станет местом создания новой крытой общественной площади, где различные по функции объекты будут смешаны вместе, обеспечивая большой выбор возможностей для общения и взаимодействия.</p>
<p>Энергоэффективное решение:</p>	<p>Энергоэффективное решение:</p>	<p>Энергоэффективное решение:</p>
<p>Здание соответствует стандартам платинового сертификата LEED: ее охлаждают специальные водоемы, наполняемые вторично использованной водой, на крыше установлены солнечные батареи, стеклянные фасады закрыты солнцезащитными экранами. Здание раскрывается на все стороны света и ориентировано на значимые окружающие видовые точки.</p>	<p>В центре кубическое здание с «центром управления» и пустотами в здании, куда направлен сильный ветер (бриз со стороны залива). Отличительная особенность здания – белая решетка и подвесные террасы.</p>	<p>Здание активно использует солнечную энергию за счёт установки солнечных панелей и собирает воду, попадающую на поверхность зелёной кровли. Эти и другие энергоэффективные решения позволяют на 15% сократить выбросы CO<sub>2</sub>, на 23% снизить потребление электроэнергии и на 23% снизить расход водопотребления.</p>
[5]	[6]	[7]

Следовательно, целью создания данных объектов можно назвать разработку проектного предложения участка проектирования исходя из принципов устойчивого развития территории. Задачи, стоящие перед проектировщиками, заключаются в анализе места проектирования, выявлении проблем и потенциальных возможностей участка; изучении инноваций в проектировании многофункциональных общественных зданий, а также транспортно-пересадочных узлов и аэропортов; определении основной концепции проекта, его функционального наполнения, архитектурно-планировочного решения.

Екатеринбург является одним из крупнейших городов России, где ежегодно повышается

транспортная мобильность населения, возникает потребность в модернизации существующих и строительстве новых транспортных узлов, развязок и магистралей. Согласно стратегической программе «Екатеринбург – евроазиатский транспортно-логистический узел» к 2030 году Екатеринбург превратится в «сухой порт» мирового значения, динамично преобразующий жизнь в городе. Для освоения возрастающих объемов внешнеторговой деятельности и укрепления роли города в хозяйственной системе страны необходимо дальнейшее развитие современного транспортно-логистического узла, интегрированного в мировую систему товародвижения, и условий для обслуживания увеличивающегося пассажиропотока. Благодаря

географическому расположению в Свердловской области город Екатеринбург уже сегодня является местом пересечения и взаимодействия многих областей жизни современного человека. Прежде всего, отраслей экономики и промышленности, бизнеса, культуры и искусства, науки и технологий.

Проект Северного транспортно-пересадочного узла имеет значительный потенциал для дальнейшего развития района Эльмаш в общей структуре города Екатеринбург. Транспортный хаб станет местом сосредоточения практически всех видов общественного транспорта: метро, трамвай, автобус, городская электричка. Участок проектирования расположен в северной части города Екатеринбург, протянувшись вдоль проспекта Космонавтов от перекрестка с улицей Шефская до развязки у Верхней Пышмы.

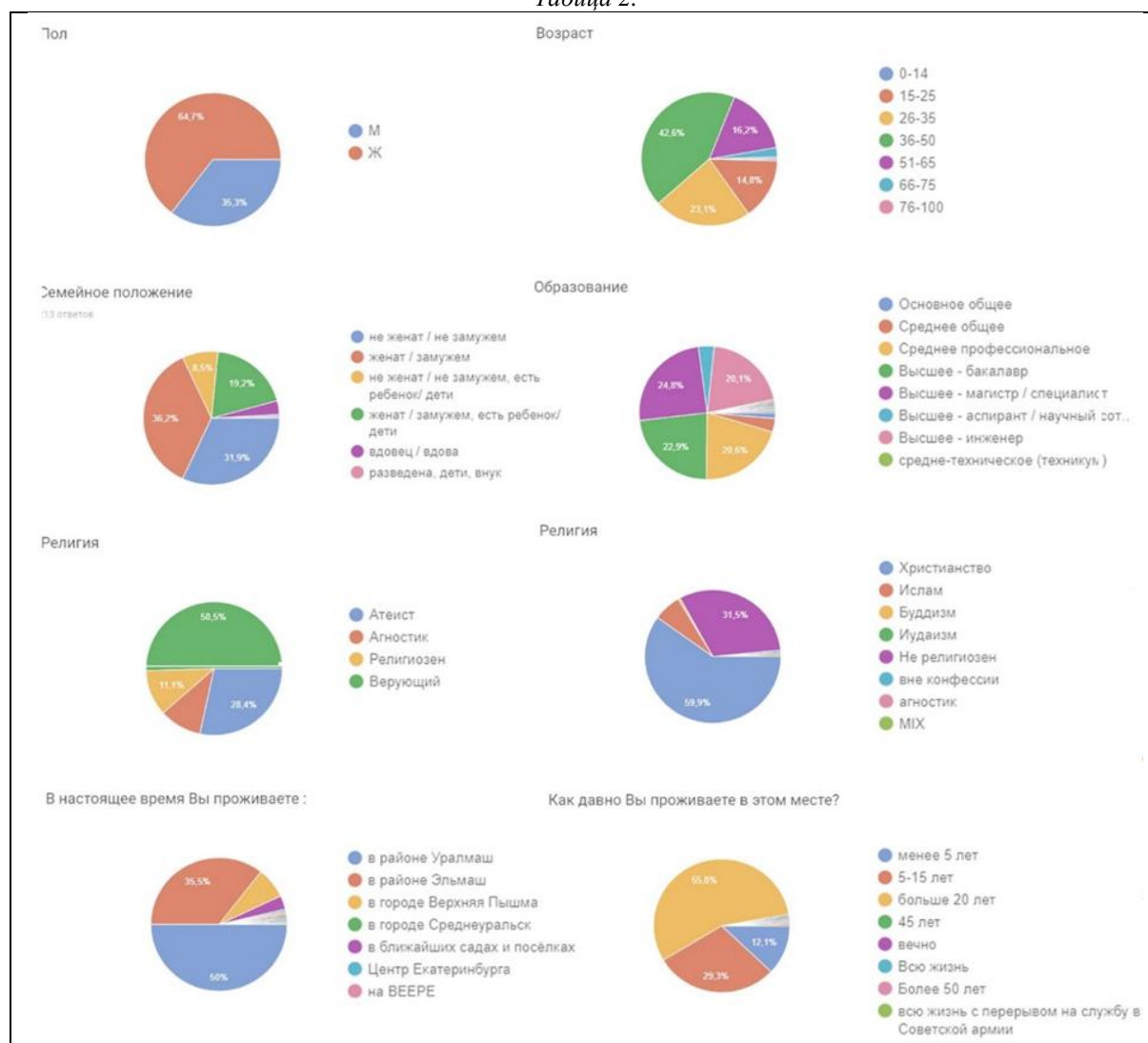
Актуальность данной работы заключается в развитии торгово-развлекательной, жилищной и социальной инфраструктуры, организации взаимосвязи различных транспортных средств и общественных, досуговых пространств, как для транзитных пассажиров, так и для жителей района.

В ходе предпроектного анализа территории

был проведён интернет-опрос о проблемах и потенциалах развития места проектирования. Анализируя данные анкет, полученные от 215 респондентов можно составить ориентировочный портрет потребителя: это человек среднего возраста от 36 до 50 лет (Табл. 2).

«Он» состоит в браке, имеет высшее образование (магистр/специалист). Это верующий человек, придерживающийся концепции христианской религии, проживает в районе Уралмаш уже больше 20 лет и планирует переезд в другой район города, потому что его не вполне устраивает существующая инфраструктура. Чаще всего этот человек использует личный автомобиль, чтобы доехать до центра города, съездить в Пышму или ближайшие деревни и посёлки. Но, если есть потребность, выберет альтернативу – общественный транспорт (метро, трамвай или автобус, троллейбус). Он проводит свободное время, гуляя на свежем воздухе или оставаясь дома, а также любит работать на своём садовом участке. Значительно реже этот человек «живёт культурной жизнью города» — только иногда посещает кино, театры, музеи или выставки.

Таблица 2.



В целом, территорию проектирования он оценивает, как достаточно благоприятную (из-за

близости лесопарка), но неудовлетворительную из-за отсутствия торгово-развлекательной инфраструктуры. На участке проектирования этот человек решительно не хочет видеть объекты религиозного назначения (православный храм или мечеть), но считает необходимым организацию мест для занятий различными видами спорта.

Используя данные, полученные при анализе транспортной инфраструктуры, а также,

природных и антропогенных факторов, мы можем перейти к этапу формирования объёмно-планировочной структуры объекта проектирования.

Рассмотрим три проектных предложения по оптимизации выразительности формы и положения архитектурного объекта исходя из принципов энергоэффективности (Табл.3, 4):

1	2	3
«Горизонтальный небоскреб, парящий над рельефом»	«Куб – целостное функциональное ядро»	«Эксплуатируемая кровля – стилобат наземного этажа»

Таблица 3.

**Схемы вариантов концептуальной модели формообразования:**

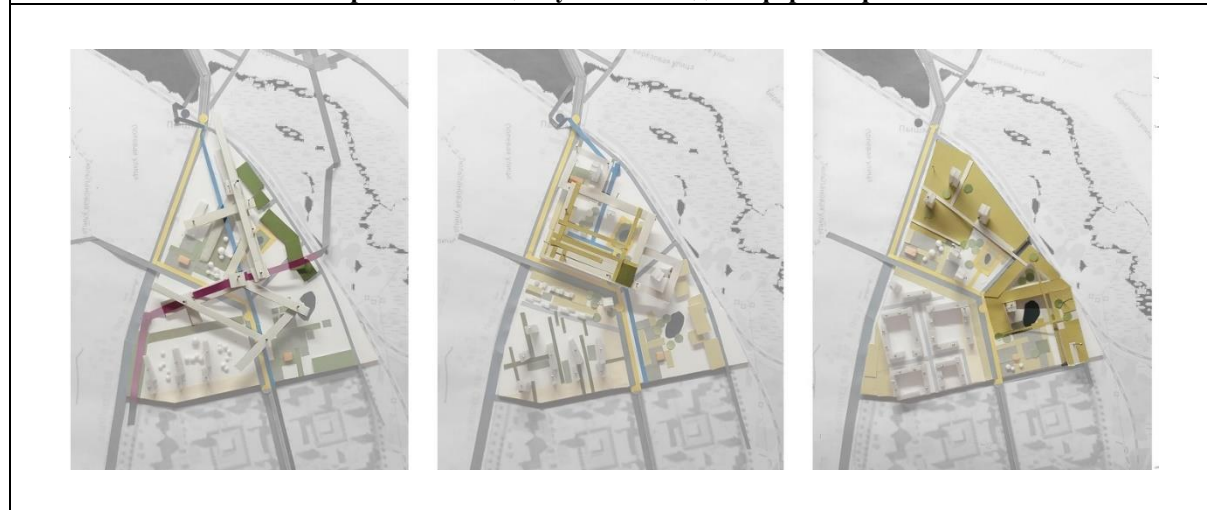
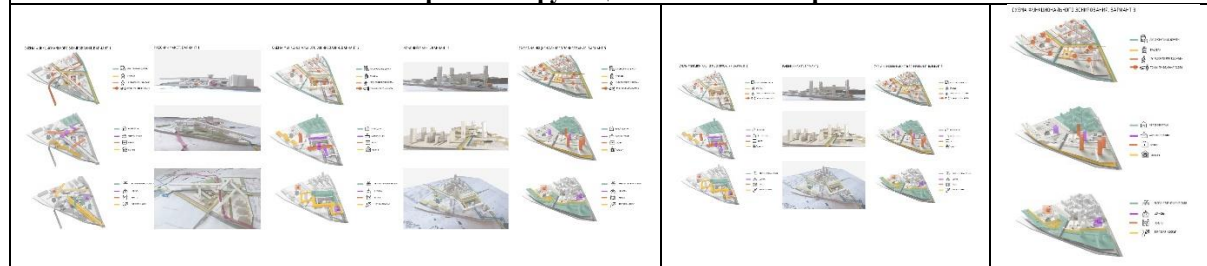


Таблица 4

**Схемы вариантов функционального зонирования:**



Вариант 1 размещения архитектурного объекта предполагает активное использование ветровой энергии. На поверхности рассредоточенных в пространстве блоков могут быть установлены ветрогенераторы, чтобы получать максимальную энергию даже когда направление ветра будет изменяться.

Вариант 2. Блокированные объемы здания обеспечивают меньше теплопотери в зимний период и теплопоступления в летний период года. Значительное количество поверхностей здания может быть оснащено солнечными панелями.

Вариант 3. Покрытие «зелёной кровли» производит сбор дождевой воды и организует её рациональное вторичное использование. Участки с уклоном на открытом пространстве обеспечивают естественное движение воды к пониженным

отметкам. В таких местах образуются зоны по типу био-болота – важной части экосистемы в жилой среде.

Итоговый вариант. Анализируя форму и положение в пространстве проектируемого объекта, были выявлены основные преимущества каждого варианта, базирующегося на принципах энергоэффективной архитектуры. Так, в рамках предпроектного анализа, выявлено следующее предложение по организации формы объекта проектирования – разделить его на 4 функциональных уровня:

Уровень 1 – Транспортно-пересадочная, коммуникационная зона – пространство под «зелёной кровлей», включающее зоны ожидания и отдыха, кафе и магазины, обособленные рекреационные пространства, детские игровые



площадки.

Уровень 2 – Рекреационное пространство, представляющее собой пешеходную зону сочетающую транзит людей и спортивные и игровые площадки общего доступа.

Уровень 3 – Общественно-деловая зона,

размещенная в блоках на колоннах над эксплуатируемой «зелёной кровлей», состоящая из административных зон, бизнес-центра, конференц-залов, гостиницы и выставочных пространств (Рис. 1).

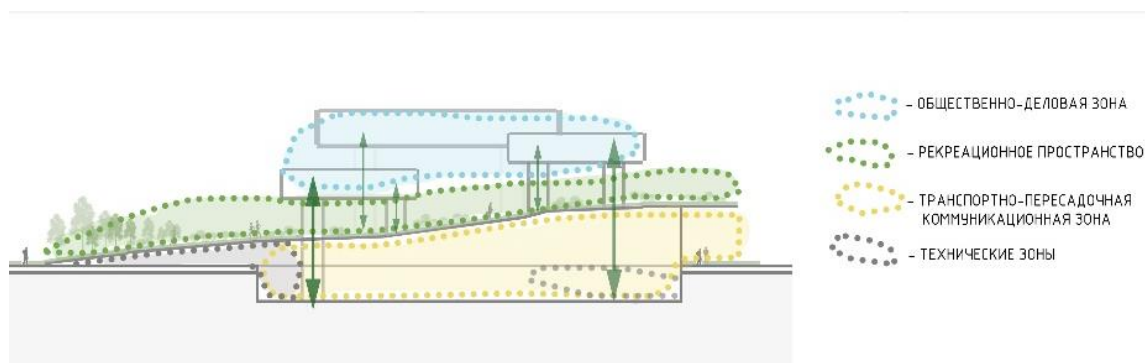


Рисунок 1 Схема функционального зонирования объекта проектирования – разделение по уровням

Разделение на функциональные уровни позволяет сформировать социально-ориентированную и комфортную для людей городскую среду. Сегодня идея «здорового города» дополняет концепцию «устойчивого развития». Объект исследования отвечает основным принципам «устойчивого проектирования»:

- повышена энергоэффективность здания
- оптимизировано водопотребление
- используются экологичные материалы

Концепция проектируемого объекта заключается в формировании целостного пространства, гармоничного сочетания различных функциональных зон, создания благоприятной среды как для транзитных пассажиров, так и для жителей ближайших районов.

Композиционное решение представляет собой диагональное размещение нескольких пространственных объемов по отношению к сложившейся секте улиц. Блоки, приподнятые на опорах, освобождают рекреационное пространство – эксплуатируемую «зелёную кровлю». Она сохраняет природный каркас территории, формируя взаимосвязи человека и природы, обозначает экологический подход проектирования.

В стилобате здания расположены элементы культурно-бытового обслуживания людей. В месте пересечения основных транзитных путей пассажиров организовано пространство атриума. Организация северного транспортно-пересадочного узла даст возможность разграничить и перенаправить потоки транспорта, связывающий Екатеринбург и Свердловскую область (Рис.2).

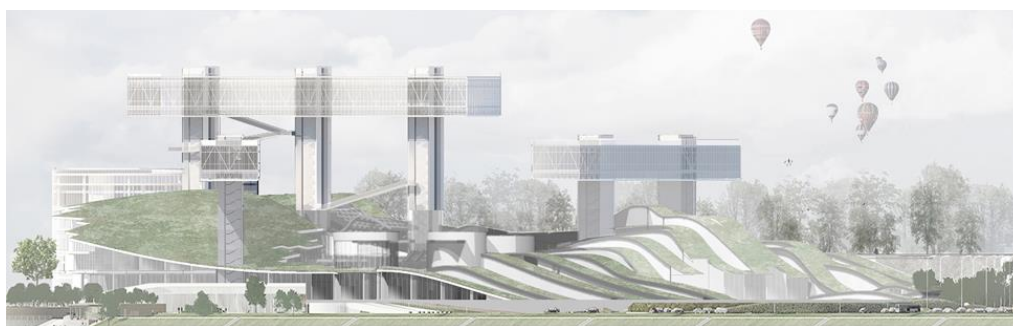


Рисунок 2 Фасад. Проект Северного транспортно-пересадочного узла

Концепция объекта проектирования заключается в формировании целостного пространства в общей структуре общественного центра и транспортно-пересадочного узла. Так, чтобы функциональные зоны имели большое количество пересечений, подчеркивая единство и соподчиненность пространств объекта проектирования.

В перспективе развития этой территории города намечено комплексное развитие

прилегающих к участку проектирования зон. Многофункциональный транспортно-пересадочный узел определяет направления развития транспортной и социальной инфраструктуры, свяжет отдалённые районы города с центром, сформирует благоприятную среду жизнедеятельности человека.

Главной темой и направлением работы для современного архитектора являются вопросы экологически безопасного строительства и

эффективного использования природных ресурсов.

Темп и ритм жизни в современном городе предполагает такую же активную и насыщенную событиями жизнь каждого человека. Транспортно-пересадочный узел должен отвечать этим требованиям.

#### Список литературы

1. Формирование сбалансированной транспортной системы города [Электронный ресурс] // Официальный портал г. Екатеринбург – Режим доступа: <https://екатеринбург.рф/официально/стратегия/раздел3/направление5> (дата обращения: 31.10.2019)
2. Ю. С. Хайруллина. Общие положения функционально-пространственной организации современного транспортно-коммуникационного узла // Электронное научное издание «Известия КГАСУ». — 2011. — №4 (18). — С. 155-165. — URL [https://izvestija.kgasu.ru/files/4\\_2011/155\\_165\\_Khairullina.pdf](https://izvestija.kgasu.ru/files/4_2011/155_165_Khairullina.pdf) (дата обращения: 31.10.2019).
3. Концепция стандартного жилья для среднеэтажной модели застройки [Электронный ресурс] // «Archi.ru» – Режим доступа: <https://archi.ru/russia/77811> (дата обращения: 01.12.2019)

01.12.2019)

4. Мультиодальный транспортный узел в Сколково [Электронный ресурс] // «Archi.ru» – Режим доступа: <https://sk.ru/news/> (дата обращения: 01.12.2019)

5. Горизонтальный небоскрёб [Электронный ресурс] // «Archi.ru» – Режим доступа: <https://archi.ru/world/20878/gorizontalnyi-neboskreb> (дата обращения: 2.11.2019)

6. Office Building [Poly Center, Hengqin New Area, Zhuhai] [Электронный ресурс] // «Good Design Award» – Режим доступа: <https://www.g-mark.org/award/describe/49438> (дата обращения: 2.11.2019)

7. Badel Block Complex Proposal / WAU Design [Электронный ресурс] // «Archdaily.ru» – Режим доступа: <https://www.archdaily.com/243091> (дата обращения: 2.11.2019)

8. Е. Фёдоров. «Город будущего» — энергоэффективность, безопасность и комфорт // Электронное научное издание «Control Engineering Россия». — 2015. — №2. — С. 23-26. — URL <https://controlengrussia.com/avtomatizatsiya-zdaniy/gorod-budushhego-e-nergoe-ffektivnost-bezopasnost-i-komfort/> (дата обращения: 23.11.2019).

УДК 539.231

**Vadym Kasianenko**

*Student of the Faculty of Electronics*

*The National Technical University*

*«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» Ukraine*

**Kuzmichev Anatoly**

*Professor, D.Sc.*

*Department of Electron Devices and Systems*

*The National Technical University*

*«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» Ukraine*

### ADHESIVE STRENGTH OF TWO-LAYER METAL COATINGS ON ALUMINUM OXIDE SUBSTRATES

**Касяненко Вадим Вікторович**

*здобувач освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр»*

*факультету електроніки*

*Національний технічний університет України*

*"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"*

**Науковий керівник: Кузьмичев Анатолій Іванович**

*професор, д. т. н.*

*професор кафедри електронних пристроїв та систем*

*Національний технічний університет України*

*"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"*

*Україна*

### АДГЕЗІЙНА МІЦНІСТЬ ДВОШАРОВИХ МЕТАЛЕВИХ ПОКРИТТІВ НА ПІДКЛАДКАХ ОКСИДУ АЛЮМІНІЮ

**Summary.** Adhesion strength depends on many factors: coating technology, film material, substrate material; and may decrease during operation of the finished product. During the operation of power modules, they are subjected to thermal and mechanical loads, including vibration. This leads to the destruction of components from overheating and mechanical damage to the modules. Often the destruction occurs in the structure of the substrate-conductive coating. The main reason for this destruction is the low adhesive strength of the metal film to the ceramic base.



Used laboratory installation to test the technology of forming metal coatings and work on testing the technology; study of the obtained samples. Determination of the range of technological modes for the formation of coatings by magnetron sputtering. Determination of technological modes of source operation during copper coating by steam jet deposition, processing of experimental data and issuance of recommendations on the use of work results.

Based on the data obtained during the study, the roughness of the adhesive sublayer of titanium affects the adhesive strength of the conductive layer of copper on the substrate of alumina. The minimum values of roughness  $R_a < 2.0 \mu\text{m}$  required to achieve maximum values of adhesive strength up to 60 MPa, can be obtained by placing the substrate relative to the magnetron sputtering system at an angle of  $90^\circ$  and  $180^\circ$  at a distance from the target to the substrate from 25 to 60 mm

**Анотація.** Адгезійна міцність залежить від багатьох факторів: технології отримання покриття, матеріалу плівки, матеріалу підкладки; і може знижуватися в процесі експлуатації готового виробу. В процесі роботи силових модулів вони піддаються тепловим і механічним навантаженням, в тому числі вібрації. Це призводить до руйнування компонентів від перегріву і механічних пошкоджень модулів. Часто руйнування відбувається в структурі підкладка-провідникове покриття. Основною причиною такого руйнування є низька адгезійна міцність металевої плівки до керамічної основи.

Використана лабораторна установка для відпрацювання технології формування металевих покриттів та проведення робіт з відпрацювання технології; дослідження отриманих зразків. Визначення діапазону технологічних режимів для формування покриттів методом магнетронного розпилення. Визначення технологічних режимів роботи джерела при нанесенні покриття міді методом пароструйного осадження обробка експериментальних даних і видача рекомендацій щодо використання результатів роботи.

Виходячи з даних, отриманих в ході дослідження, шорсткість адгезійного підшару титану впливає на адгезійну міцність струмопровідного шару міді на підкладці оксиду алюмінію. Мінімальні значення шорсткості  $R_a < 2,0 \mu\text{m}$ , необхідні для досягнення максимальних значень адгезійної міцності до 60 МПа, можуть бути отримані при розташуванні підкладки щодо магнетронної розпилювальної системи під кутом  $90^\circ$  і  $180^\circ$  при відстані від мішені до підкладки від 25 до 60 мм.

*Keywords: adhesion; ceramics; copper; thermal conductivity; film.*

*Ключові слова: адгезія; кераміка; мідь; теплопровідність; плівка.*

## АДГЕЗІЙНА МІЦНІСТЬ ДВОШАРОВИХ МЕТАЛЕВИХ ПОКРИТТІВ НА ПІДКЛАДКАХ ОКСИДУ АЛЮМІНІЮ

### Вступ

В даний час при виробництві силових модулів промисловістю для металізації використовуються атмосферні товстоплівкові технології, такі як впалювання пасти, Direct Bonding Coating (DBC), Direct Plated Coating (DPC), холодну газодинамічне нанесення. Перехід на тонкоплівкові технології такі як термічне випаровування і магнетронного розпилення дозволять отримати стабільну якість покриттів і відтворюваність результатів при їх отриманні. Через це виникла необхідність отримання струмопровідних покриттів на керамічних підкладках, які використовуються для виробництва силових модулів, методами тонкоплівкової технології. Однак для тонкоплівкових технологій до теперішнього моменту не вирішені питання отримання стабільних значень адгезійної міцності на керамічних підкладках, що стримує їх впровадження у виробництво виробів силової електроніки і електровакуумних приладів.

Метою роботи є підвищення адгезійної міцності покриттів при металізації методами тонкоплівкової технології керамічних підкладок, які використовуються для виготовлення пристроїв силової електроніки і електровакуумних приладів.

На основі аналізу існуючих вимог до пристроїв силової електроніки і електровакуумних приладів, а також методів отримання металевих покриттів, визначити вимоги до матеріалів і технології

металізації керамічних поверхонь. Розробити лабораторну установку для проведення досліджень процесів нанесення покриттів на керамічні підкладки. Визначити технологічні режими нанесення покриттів, що забезпечують адгезійну міцність одержуваних покриттів більше 50 МПа

### Технології формування покриттів

#### Нанесення покриття

Використання розробленої лабораторної установки формування покриттів дозволяє проводити відпрацювання технології формування двошарових покриттів в єдиному вакуумному циклі. Модульна конструкція установки забезпечує мобільність і дозволяється легко розширювати склад технологічних методів під час досліджень.

Підкладка виконує дві основні функції:

- Є діелектричною основою друкованої схеми, формованої на одній або двох сторонах.
- Забезпечує відведення тепла, що виділяється напівпровідниковими кристалами і елементами схеми.

Наявність на поверхні підкладки різного роду забруднень призводить до різкого зниження відсотка виходу придатних виробів на наступних технологічних операціях. Забруднення підкладок зазвичай відбувається при механічній обробці напівпровідникових злитків і пластин (різанні, шліфування та полірування), а також за рахунок адсорбції різних речовин з технологічних середовищ. Серед всіх видів забруднень особливу увагу слід приділяти органічним забруднень, так як вони при нагріванні розкладаються і виділяють газоподібні речовини (кисень, оксид і діоксид

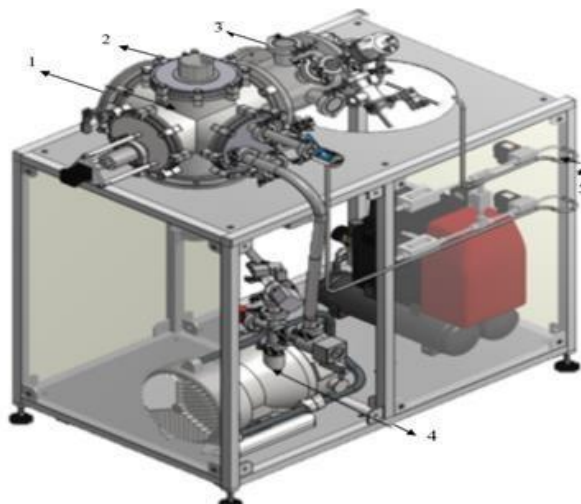
вуглецю, пари води та ін.), Які в значній мірі погіршують наступні технологічні процеси (дифузії, епітаксії, осадження захисних діелектричних плівок і ін.).

Для повного очищення підкладки від забруднень необхідно вибрати технологічний процес, який включав би в себе ряд послідовних операцій, кожна з яких дозволяла б видаляти з поверхні один або кілька видів забруднень. Однією з умов отримання високої адгезійної міцності є можливість формування багатшарових покриттів в єдиному вакуумному циклі, без розгерметизації

обсягу вакуумної камери і контакту виробу з атмосферою [1].

Розроблена лабораторна установка призначена для нанесення плівок методами магнетронного і термічного випаровування в єдиному вакуумному циклі.

Установка складається з вакуумної камери, технологічної системи, систем відкачування і напуску газу, систем живлення і керування, системи реєстрації режимів проведення експериментальних досліджень.



*Рис. 1. Зовнішній вигляд установки для відпрацювання технології формування металевих покриттів  
1 - Камера нанесення, 2 - магнетрон розпилювальна система, 3 - Камера випаровування, 4 - Система відкачування, 5 - Система подачі газу*

Система відкачування виконана на базі турбомолекулярного насоса Edwards nEXT-75 (NR1) і спірального механічного насоса Edwards XDS-10 (NI1). Такий набір засобів відкачування дозволяє отримати повністю безмасляний вакуум, що є важливою умовою для отримання високої адгезійної міцності формованих покриттів [2].

Найпростішим способом очищення є механічна очистка поверхні. Вона призначена для видалення механічних забруднень, таких як: залишки окалини і іржі, великих скупчень мастильного матеріалу.

При механічному очищенні поверхню обробляють металевими щітками, наждачним папером і протирають ганчір'ям. Дану очищення в основному застосовують при обробці поверхні металевих елементів вакуумної камери, внутрішньокамерних пристроїв і пристосувань [5].

Грубе хімічне очищення використовується для видалення з поверхні оброблюваних деталей видимих органічних забруднень, таких як: залишки масел, мастильні матеріали, барвники, відбитки пальців і жирові плями. Щоб видалити продукти

очищення і забезпечити якісний стан поверхні після грубої хімічної очистки рекомендується застосовувати м'які тканини типу бязі і ін.

Тонку хімічну очистку в розчинах неорганічних кислот і лугах, а також в парах органічних розчинників застосовують для забезпечення якісної підготовки поверхні перед нанесенням покриття. Для інтенсифікації процесу очищення використовують ультразвукові ванни; процес очищення ведуть, як правило, при температурі розчину вище кімнатної.

Основні хімічні речовини, що застосовуються для очищення поверхні, наведені в Таблиці 1.

Ультразвукове очищення видаляє великі жирові забруднення завдяки інтенсивному локальному перемішуванню під дією ударних хвиль, створюваних в розчиннику. В ході промивки розчинник, насичений домішками, необхідно безперервно видаляти з поверхні підкладки; при цьому його замінює чистий розчинник. Механічні коливання, що створюються на підкладці, сприяють видаленню макро забруднень, лусочок металів, пилу та ін.

**Характеристики деяких хімічних розчинників застосовуються для очищення поверхні**

Розчинник	Призначення
Бензин з низьким октановим числом	Видалення грубих жирових забруднень і первинне очищення вакуумної камери і внутрішньокамерних пристроїв після механічної обробки
Бензин з високим октановим числом	Повторна очищення поверхні після обробки бензином низької якості
Ізопропиловий спирт	Видалення ефірних мастил (замінник етанолу, етилового спирту)
Етиловий спирт (етанол)	Розчинення лакофарбових матеріалів
Ацетон	Розчинення перхлорвінілових і поліакрилових лаків, ацетатів целюлози та ін.
Тетрахлорид вуглецю	Очищення поверхні металів і деяких полімерів, наприклад полістиролу (в процесі обробки можливо травлення поверхні)
Трихлоретилен	Знежирення поверхні металів, видалення масел, жирів, воску

**Данні сформовано з [2]**

При використанні ультразвукової ванни з частотами 20-50 кГц усунення забруднень відбувається за рахунок кавітаційного ефекту. Явище кавітації полягає в «схлопуванні» газових бульбашок, що утворюються при стисненні і розширенні рідини. При використанні ультразвукової ванни, в розчині, що омиває пластину, створюються змінні стискають і розтягують напруги, під дією яких утворюються кавітаційні бульбашки [6].

Ефективність ультразвукового очищення в основному визначається частотою коливань; крім того, воно залежить від потужності випромінювання і температури розчинника. Фактично ультразвукове очищення ефективно видаляє тільки великі забруднення, тому рекомендується її завершувати знежиренням в парах органічних розчинників.

З підвищенням частоти збільшується проникаюча здатність рідини за рахунок зменшення довжини хвилі коливань, зменшується ймовірність руйнування зразків за рахунок зменшення розмірів кавітаційних бульбашок. З підвищенням потужності УЗ-коливань до певних

значень інтенсивність кавітації зростає. Підвищення температури підвищує розчинність забруднень і впливає на умову виникнення кавітації. Для кожної рідини існує оптимальна температура обробки [7].

Обробку пластин і підкладок зазвичай ведуть при ультразвукових коливаннях, коли кавітація відсутня і очищення інтенсифікується за рахунок вихрових акустичних потоків рідини.

Ультразвукові коливання значно підвищують продуктивність і поліпшують якість не тільки знежирення, а й інших операцій рідинної обробки.

Схема обробки пластин в ультразвуковій ванні показана на Рис. 2.

Для видалення залишків органічних розчинників використовують промивання деонізованою водою. Після промивання в деонізованій воді підкладку слід витягувати таким чином, щоб мінімізувати кількість рідини на поверхні. Решта на поверхні краплі води після висихання проявляться у вигляді видимих плям, що змінюють властивості формованого покриття. Тому краплі води слід здувати струменем чистого Обезпилення повітря або видаляти за допомогою центрифуги. [3]

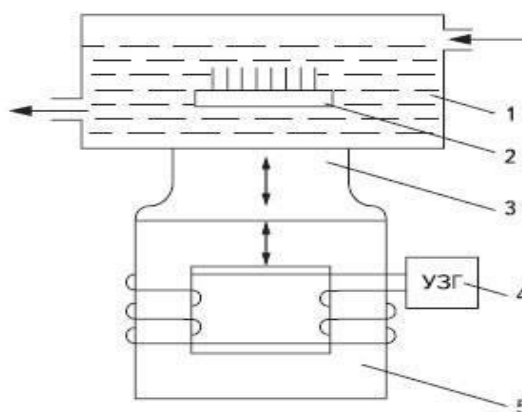


Рис. 2. Схема процесу ультразвукового очищення в протоці розчинника  
 1 - ванна; 2 - касета з пластинами; 3 - концентратор; 4 - Генератор ультразвукових коливань;  
 5 - магнітострикційний випромінювач

Сушка проводиться в паровому очищувачі або в чистій печі з використанням гарячого очищеного повітря або азоту. Очищення поверхні підкладки необхідно проводити безпосередньо перед приміщенням у вакуумну камеру, так як при тривалому очікуванні чистота поверхні може бути порушена, що призведе до зниження якості осадженої плівки.

Зазвичай після хімічної очистки, промивки в дистильованій воді і сушки підкладка надходить в камеру металізації. При цьому можливе повторне забруднення поверхні внаслідок адсорбції молекул різних речовин з навколишнього повітря.

Недоліком хімічної підготовки поверхні є також і те, що ця обробка в принципі не забезпечує видалення фізично адсорбованої вологи. Фізична адсорбована волога виділяється в процесі відкачування тільки прогрівом підкладок в вакуумі при високій температурі [4].

В рамках даної роботи у всіх експериментів з відпрацювання технології для проведення ультразвукової відмивання використовувалася ультразвукова ванна Водолій. Зовнішній вигляд ванни представлений на Рис. 3.



Рис. 3. Зовнішній вигляд ультразвукової ванни, що використовувалася для очищення

В якості хімічного розчинника використовувався ізопропіловий спирт. Ізопропіловий спирт, він же ізопропанол - це прозора безбарвна рідина з різким «спиртовим» запахом. Він досить просто змішується з органічними розчинниками і водою. Цей спирт не залишає слідів після випаровування і тому вважається відмінним засобом для чищення оптичних лінз, дзеркал, глянцевої скляних і металевих поверхонь, а також для обробки поверхні підкладки. [4]

В якості підкладок у всіх експериментах використовувалися шліфовані пластини оксиду алюмінію з шорсткістю Ra 1,6 мкм. Пластини відмивалися в розчині підігрітого ізопропілового

спирту в ультразвукової ванні протягом 10 хвилин. Температура миючої рідини становила 40 ° С. Сушка пластин проводилася при кімнатній температурі.

#### Виявлення впливу адгезійного підшару на адгезійну міцність основного струмопровідного шару

Для виявлення впливу підшару титану на адгезійну міцність шару міді була проведена серія експериментів з отримання структур Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Cu і Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Ti / Cu. Адгезійний підшар титану наносився методом магнетронного розпилення. Основний шар міді наносився методом термічного випаровування.

Таблиця 2.

#### Режими нанесення одношарового (мідного) покриття

Номер зразка	Покриття	Спосіб нанесення покриття	Тиск в камері (P, мбар)	Потужність (W, кВт)	Час осадження (t, с)
1	Cu	Термічне випаровування	$1,3 \times 10^{-3}$	0,20	300
2	Cu	Термічне випаровування	$1,0 \times 10^{-3}$	0,20	300
3	Cu	Термічне випаровування	$8,7 \times 10^{-4}$	0,20	300

Для кожного набору режимів було отримано три зразки покриттів.

Всі отримані зразки піддавалися випробуванням на адгезійну міцність покриття методом відриву.

Схема вимірювання адгезійної міцності показана на Рис. 4.

Підкладка приклеювалася на сталеву плиту, до покриття припаювався спеціальний грибок з відомою площею підставки.

Режими нанесення двошарового (Ti+Cu) покриття

Номер зразка	Покриття	Спосіб нанесення	Подача газу (Q, ссстп)	Тиск в камері (P, мбар)	Потужність (W, кВт)	Час осадження (t, с)
1	Ti	Магнетронне розпилення	30	$1,2 \times 10^{-2}$	0,38	300
	Cu	Термічне випаровування	-	$1,3 \times 10^{-4}$	0,20	300
2	Ti	Магнетронне розпилення	30	$1,3 \times 10^{-2}$	0,38	300
	Cu	Термічне випаровування	-	$1,0 \times 10^{-4}$	0,20	300

Зовнішній вигляд грибка, який показаний на Рис. 5. Площа капелюшки грибка використовувалася при проведенні випробувань, становила близько 1 мм<sup>2</sup>.

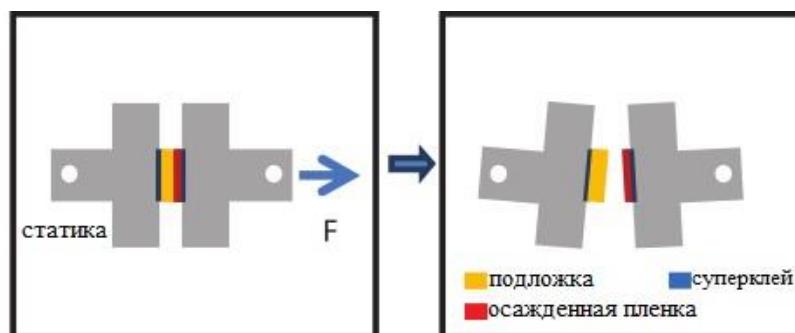


Рис. 4. Схема проведення вимірювання адгезійної міцності методом відриву

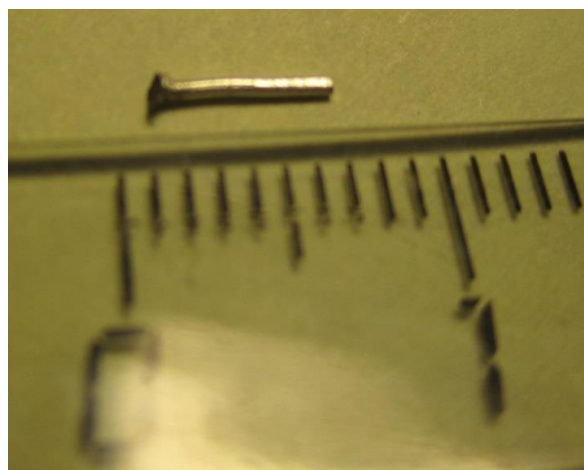


Рис. 5. Зовнішній вигляд грибка, який використовувався при проведенні випробувань на адгезійну міцність методом відриву

Після пайки до грибка прикладалася зусилля, і вимірювалася величина сили, при якій відбувалося руйнування з'єднання. Залежно від характеру руйнування (стик покриття / підкладка; стик покриття / грибок; міжшарове з'єднання покриття) робився висновок про величину адгезійної міцності.

Були проведені вимірювання адгезійної міцності у зразків покриттів з підшаром і без нього.

Результати вимірювання адгезійної міцності покриття з адгезійним підслоєм і без нього показані на Рис. 6.

В ході проведення експерименту було встановлено, що вставка адгезійного підшару приводить до збільшення адгезійної міцності струмопровідного покриття в 10 разів до розміру 45 МПа. Тому всі подальші дослідження виконувалися на зразках із застосуванням адгезійного підшару титану.

**Результати вимірювання адгезійної міцності для зразків без адгезійного підшару і з адгезійним підшаром**

Номер зразка	1	2	3	4	5	6	7
Потужність термічного випаровування (кВт)	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Потужність магнетронного розпилення (Вт)				380	380	380	380
Площа припаянного провода (мм <sup>2</sup> )	36	36	36	16	14	49	70
Виміряне Значення адгезії одношарового покриття (МПа)	<5	<5	<5				
Виміряне Значення адгезії двошарового покриття (МПа)				40	40	45	46

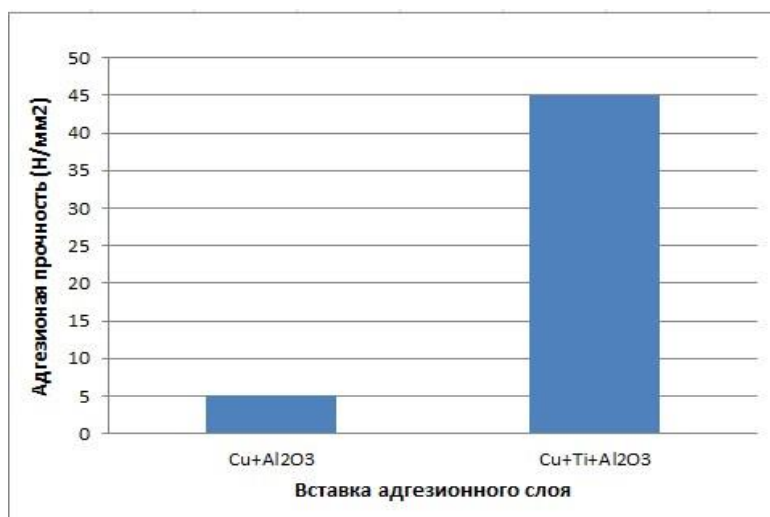


Рис 6. Вплив підшару титану на адгезійну міцність покриття міді на підкладці оксиду алюмінію

#### **Виявлення залежності адгезійної міцності від режимів роботи джерела живлення магнетронній розпилювальній системі**

Друга серія експериментів була спрямована на виявлення залежності адгезійної міцності від режимів роботи магнетронній розпилювальній системі при нанесенні адгезійного підшару.

Були проведені серії експериментів при роботі магнетронній розпилювальній системі в режимі постійного струму, а також в імпульсному режимі при різних параметрах частоти і шпаруватості імпульсів і при різному робочому тиску у вакуумній камері. Тиск в камері регулювався за рахунок зміни величини подачі робочого газу аргону.

Технологічні режими, використані при отриманні покриттів, наведені в Таблицях 5 - 8. У кожному режимі було отримано не менше трьох зразків покриттів. Результати вимірювання адгезійної міцності методом відриву для отриманих зразків наведені в таблиці 3.9.

Після обробки результатів вимірювання було встановлено, що при роботі магнетронній розпилювальній системі найкращі значення адгезійної міцності показали зразки, отримані на частоті імпульсів 90 кГц при коефіцієнті заповнення 70%. Зменшення частоти імпульсів при збереженні коефіцієнта заповнення призводить до незначного зниження міцності. Зниження ж коефіцієнта заповнення призводить до втрати адгезійної міцності покриття і зводить нанівець ефект від адгезійного підшару. Результати цієї серії експериментів показані на Рис. 7.

Для виявлення впливу тиску у вакуумній камері при нанесенні адгезійного підшару на адгезійну міцність покриття були проведені експерименти з нанесення покриттів титану при різноманітному тиску у вакуумній камері. Тиск в камері регулювався зміною подачі робочого газу і провідності каналу системи відкачування. Формування покриттів адгезійного підшару проводилося як в режимі постійного струму, так і в імпульсному режимі.



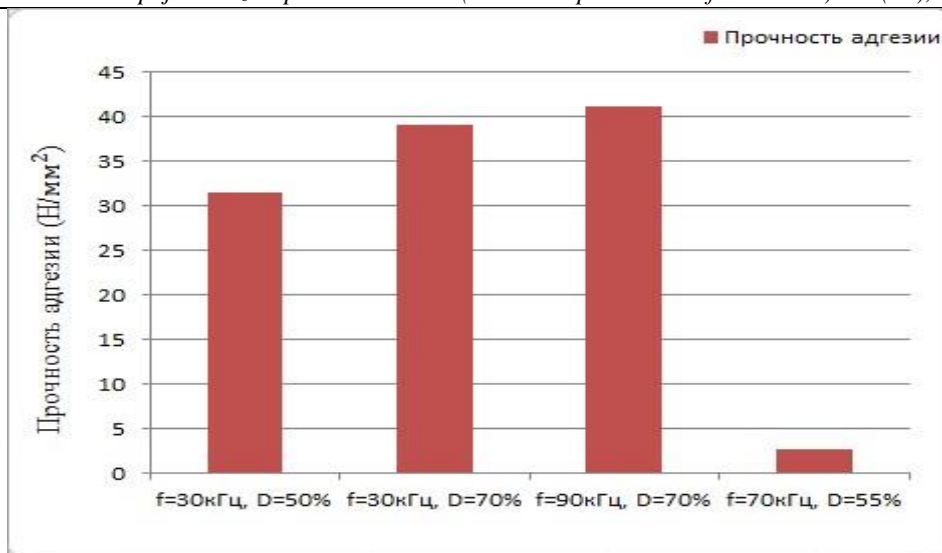


Рис. 7. Вплив параметрів імпульсного режиму роботи магнетронної розпилювальної системи при нанесенні підшару на адгезійну міцність покриттів

Технологічні режими, використані при отриманні покриттів з джерелом живлення магнетронної розпилювальної системи постійного струму, наведені в Таблицях 10 - 12. У кожному режимі було отримано не менше трьох зразків покриттів.

Технологічні режими, використані при отриманні покриттів з джерелом живлення магнетронної розпилювальної системи імпульсного струму. Використовувалися

параметри імпульсного режиму, які показали найкращу адгезійну міцність: частота імпульсів 90 кГц, коефіцієнт заповнення 70%. Напруга, що прикладається до магнетронної розпилювальної системи, визначалася можливістю отримання стабільного горіння розряду при даному тиску. У кожному режимі було отримано не менше трьох зразків покриттів.

Зведені результати вимірювання адгезійної міцності зразків наведені в таблиці 5 і на Рис. 8

Таблиця 5.

**Результати вимірювання адгезійної міцності отриманих зразків**

Номер режима	1	2	3
Тиск в камері, мбар	$8,3 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$4,6 \times 10^{-3}$
Виміряне значення адгезії двошарового покриття (постійний струм), МПа	62,7	28,0	32,7
Виміряне значення адгезії двошарового покриття (імпульсний режим), МПа	40,8	27,4	118

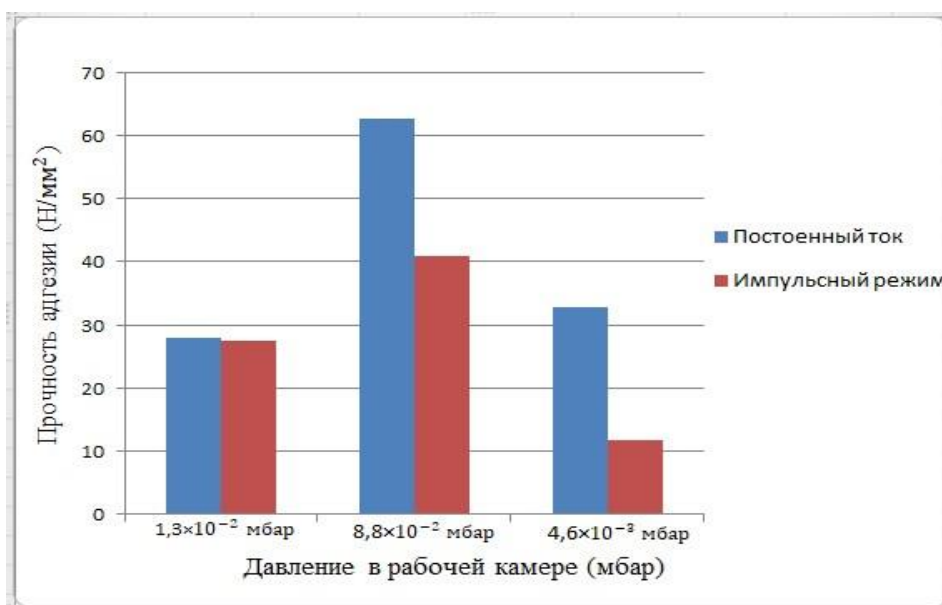


Рис. 8. Вплив тиску у вакуумній камері при нанесенні подшару на адгезійну міцність покриттів



Найкращі значення адгезійної міцності показали зразки, отримані при роботі магнетронній розпилювальної системи в режимі постійного струму при тиску  $8,8 \cdot 10^{-2}$  мбар. Причому ці зразки показали найкращий результат за весь час досліджень. Всі подальші дослідження проводилися з параметрами режиму, які показали найкращий результат за адгезійної міцності.

### ВИСНОВКИ

1. Отримані результати вимірювання адгезійної міцності покриттів дозволяють говорити про можливість використання обраних режимів для нанесення підшару титану в якості адгезійного підшару під матеріали, які використовуються при пайку компонентів (мідь, олово-золото і ін.).

2. Нанесення плівки методом пароструйного осадження в кластерному режимі роботи джерела дозволяє отримувати покриття з Швидкістю нанесення до 2 мкм / с на локальній ділянці підкладки. Така товщина покриття забезпечується на ділянці шириною 2 мм навпроти центру сопла джерела.

3. Для збільшення адгезійної міцності покриттів міді на підкладках оксиду алюмінію необхідно використовувати адгезійний підшар, наприклад, підшар титану. Використання такого підшару приводить до збільшення адгезійної міцності в 10 і більше разів.

4. Режими роботи магнетронної розпилювальної системи і параметри технологічного процесу істотно впливають на адгезійну міцність одержуваних покриттів.

5. Найкращі результати адгезійної міцності отримані при нанесенні адгезійного підшару при роботі магнетронній розпилювальної системи в режимі постійного струму при тиску у вакуумній камері  $8,8 \cdot 10^{-2}$  мбар.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баданова Н.В., Колесник Л. Л. Способ металлизации керамических подложек. [Электронный ресурс] // Труды Всероссийской научнотехнической конференции «Студенческая весна 2014: Машиностроительные технологии». – М.: МГТУ им. Н.Э Баумана. URL: [http://studvesna.ru/db\\_files/articles/1340/article.pdf](http://studvesna.ru/db_files/articles/1340/article.pdf) (дата обращения: 18.06.2015)
2. Блинов И.Г., Кожитов Л.В. Оборудование полупроводникового производства : Учебное пособие для студентов вузов. М. : Машиностроение. 1986. 264 с.
3. Вакуумная техника: Справочник (3-е изд.) / К.Е. Демихов [и др.]; Под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова., перераб. И доп. М.: Машиностроение, 2009. 590 с.
4. Вакуумное оборудование тонкопленочной технологии производства изделий электронной техники : Учебник для студентов специальности «Электронное машиностроение». В 2 т.т. / Н.В. Василенко [и др.]. Красноярск. Сиб. аэрокосм. акад. : Кн. изд-во, 1996. Т. 1. 256 с.
5. Вакуумное оборудование тонкопленочной технологии производства изделий электронной техники : Учебник для студентов специальности «Электронное машиностроение». В 2 т.т. / Н.В. Василенко [и др.]. Красноярск. Сиб. аэрокосм. акад.: Кн. изд-во, 1996. Т. 2. 416 с.
6. Волчкевич Л.И. Автоматизация производства электронной техники : Учебное пособие. М. : Высшая школа. 1988. 287 с.
7. Волчкевич Л.И. Надежность автоматических линий. М. : Машиностроение. 1969. 309 с

**Biliaiev M.M.**

*Doctor of Technical Sciences, Professor  
Head of The Department «Hydraulics and Water Supply»,  
Dnipro National University of Railway Transport  
named after academician V. Lazaryan*

**Biliaieva V.V.**

*PhD, Associate Professor of The Department  
«Fluid Dynamics, Energy and Mass Transfer »  
Dniprovsk National University after Oles Gonchar*

**Berlov O.V.**

*PhD, Associate Professor of The Department  
«Workplace Safety and Health»,  
State Higher Education Establishment  
«Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture»*

**Kozachyna V.A.**

*PhD, Senior lecturer of The Department « Physics of power engineering»,  
Dnipro National University of Railway Transport  
named after academician V. Lazaryan*

### MODELING OF NOISE POLLUTION NEAR RAILWAY

**Біляєв Микола Миколайович**

*доктор технічних наук, професор,*

завідувач кафедри «Гідравліка та водопостачання»,  
Дніпровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна  
**Біляєва Вікторія Віталіївна**  
кандидат технічних наук,  
доцент кафедри «Аерогідромеханіка та енергомасоперенос»,  
Дніпровський національний університет імені Олеса Гончара  
**Берлов Олександр Вікторович**  
кандидат технічних наук,  
доцент кафедри «Безпека життєдіяльності»,  
ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»  
**Козачина Віталій Анатолійович**  
кандидат технічних наук,  
старший викладач кафедри «Гідравліка та водопостачання»,  
Дніпровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна

## МОДЕЛЮВАННЯ ШУМОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ БІЛЯ ЗАЛІЗНИЦІ

**Summary.** Noise from railway transport is a relevant problem from the point of view of people health. Now, in Ukraine, the railway traffic infrastructure has the period of development. It is important to predict railway transport noise impact in case of changing of transport infrastructure. Existing in Ukraine predictive models are based on empirical formulae which were obtained long ago for specific conditions and do not take into account some important factors. So, these models can't be used for existing problems which are connected with railway transport noise. The aim of this work was development of numerical predictive model to forecast noise from railway transport. The model is built on the numerical integration of wave equation for acoustic pressure. Some results of numerical experiment are presented.

**Анотація.** Шум від залізничного транспорту є актуальною проблемою з точки зору здоров'я людей. Зараз в Україні інфраструктура залізничного руху має період розвитку. Важливо передбачити вплив шуму на залізничному транспорті у разі зміни транспортної інфраструктури. Існуючі в Україні прогностичні моделі базуються на емпіричних формулах, отриманих давно для конкретних умов і не враховують деяких важливих факторів. Отже, ці моделі не можна використовувати для існуючих проблем, пов'язаних із шумом залізничного транспорту. Метою даної роботи була розробка чисельної прогностичної моделі для прогнозування шуму від залізничного транспорту. Модель побудована на чисельному інтегруванні хвильового рівняння для акустичного тиску. Представлено деякі результати чисельного експерименту.

*Key words: sound barriers; numerical simulation; railway transport*

*Ключові слова: звукові бар'єри; чисельне моделювання; залізничний транспорт*

**Introduction.** The noise from railway transport has a negative effect on the environment and creates acoustic discomfort for the people. Locomotives and wagons are among the most significant sources of this noise. In addition, the impact of the wheels on the joints of the rails, the sound of brake rods, etc. make a certain contribution. In this regard, much attention was paid to the problem of forecasting traffic noise and methods of dealing with it [1-7]. Worthy of note that mathematical modeling of noise pollution from trains is a difficult problem. Now to solve it Navier–Stokes equations are widely used [1-7]. For practice, it is necessary to have quick computing mathematical models to use the models widely in every day practice.

In fact, in Ukraine, empirical formulae [8] are used to estimate the intensity of noise from different trains. For example, the maximum noise level from a freight train is estimated using the following formula [8]:

$$L_{\text{Амакс}} = 79,4 + \Delta L_{\text{Астик}} + 0,233V, \quad (1)$$

where  $V$  – average estimated speed of trains;  $L_{\text{Астик}}$  – amendment in dBA, taking into account the type of railway track; is determined in accordance with [8].

For passenger trains the maximum noise level is calculated as:

$$L_{\text{Амакс}} = 82,4 + \Delta L_{\text{Астик}} + 0,12V \quad (2)$$

Empirical models like these have additional formulae which help to «adjust» the model to some specific situations, for example, to take into account effect of some obstacles on sound level near the train track. Empirical models allow quickly assess the level of noise pollution. Worthy of note that empirical models like equations (1), (2) give sound level value only in one point near the railway track. This is a point which is situated 25m far from the railway track. These models can't give information about sound level in another point which is situated at another distance from the track. These models can't predict sound field which is formed near the railway track.

Therefore, at present, the development of other mathematical models which allow to take into some important factors are of great interest.

The aim of this work is to develop a quick computing numerical model for the estimate the sound pressure field near the railway.

**Goal.** The goal of this paper is development a numerical model for quick computing of sound pressure field near the railway, where sound barriers are used.

**Mathematical model.** To simulate sound pressure field from the railway transport we used wave equation for pressure:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = a^2 \left( \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right), \tag{3}$$

where  $a$  is sound speed;  $P$  is pressure;  $x, y$  are Cartesian coordinates;  $t$  is time.

Initial condition is:  $P=0$  in the computational region. We set  $P=0$  at the right and left boundaries of the computational region and  $\partial P/\partial n=0$  (here,  $n$  is the internal normal to the boundary) at the solid internal boundaries.

**Numerical models.** For the numerical integration of equation (1) we used the following difference scheme [9]:

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n - P_{i,j}^{n-1}}{\Delta t^2} = a^2 \frac{P_{i+1,j}^n - 2P_{i,j}^n + P_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} + a^2 \frac{P_{i,j+1}^n - 2P_{i,j}^n + P_{i,j-1}^n}{\Delta y^2}. \tag{4}$$

This is three time layers explicit difference scheme. To start integration we must set pressure value at two time layers.

To simulate the complicated geometrical form of the computational region we used «markers» (porosity technique). In this case we separate computational cells

where we integrate wave equation from the cells which represent internal boundaries of the computational region (figure 1). This technique allows to make quickly the geometrical form of the region where we want to study the acoustic regime.

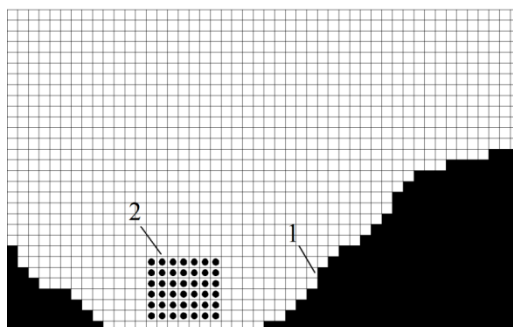


Fig. 1. Sketch of computational region: 1 – boundary of the hill; 2 – markers which indicate the train position (source of noise)

To simulate the source of noise (for example, locomotive) we choose the internal subregion where the source of noise is situated. The internal boundary covers this subregion. In this subregion we set a number of point sources having constant sound pressure  $P$ . We may say that in this subregion we have the internal Dirichlet condition.

We developed code to perform numerical experiments. FORTRAN language was used to develop code.

**Results.** The developed numerical model was used to solve the model problem. A notch is considered where the railway track passes (figure 2).

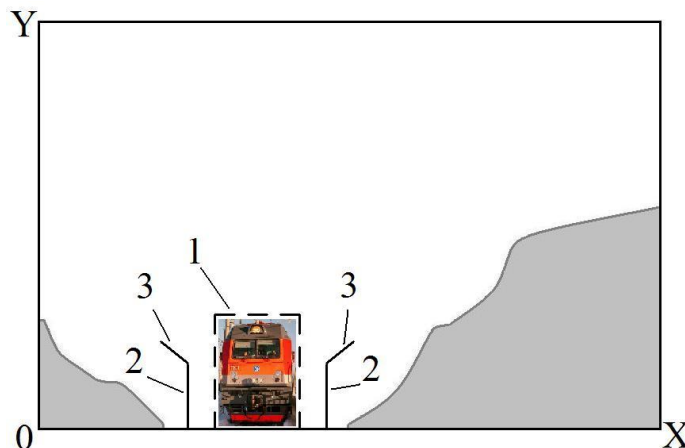


Fig. 2. Sketch of computational region: 1 – internal boundary for source of noise; 2 – vertical barrier; 3 – «wing»

Three scenarios are considered. The first scenario – there is no sound barrier near the railway track. The second scenario – there is a vertical sound barrier near

the railway track. The third scenario – the vertical sound barrier which has a wing (figure 2).

Figures 3-5 show dimensionless sound pressure field near railway track for each scenario.

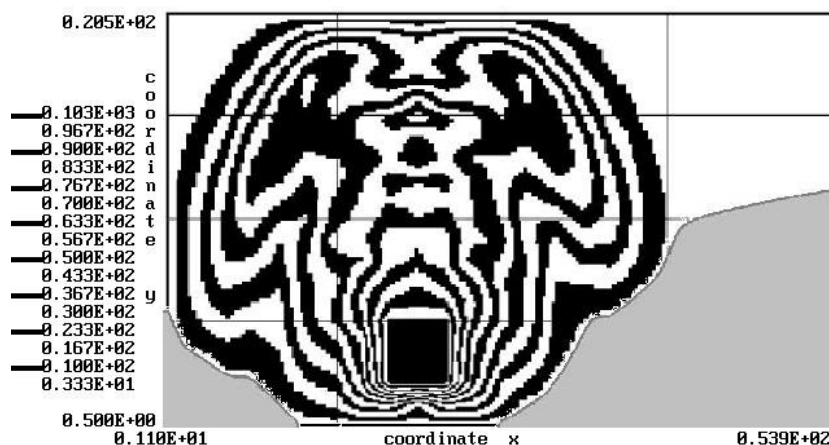


Fig. 3. Dimensionless sound pressure field near railway track,  $t=0.008s$  (scenario #1: no barriers)

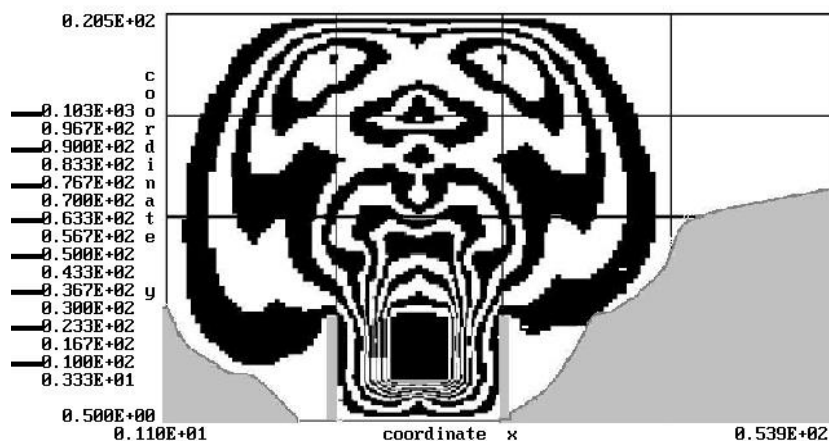


Fig. 4. Dimensionless sound pressure field near railway track,  $t=0.008s$  (scenario #2: vertical barriers)



Fig. 5. Dimensionless sound pressure field near railway track,  $t=0.008s$  (scenario #3: vertical barriers with wings)

In figure 6 the acoustic pressure field calculated on the basis of the Laplace equation (potential flow model) is shown. If we compare figure 5 and figure 6, then we can see a significant discrepancy in the

structure of the pressure field. The Laplace equation does not allow to take into account the interference of sound waves.

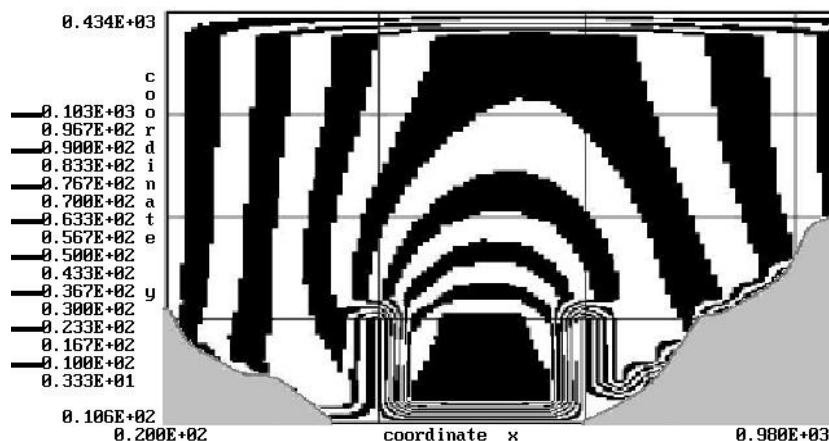


Fig. 6. Dimensionless sound pressure field near railway track (scenario #4: model of potential flow)

In the table 1 the dimensionless value of the acoustic pressure at the receptor (see figure 5) is shown.

Table 1.

**Dimensionless sound pressure at receptor point**

Scenario	#1 no barriers	#2 vertical barriers	#3 vertical barriers+ «wing»
Sound pressure	7.8	3.9	2.7

As can be seen from the table 1, application of a sound barrier with a wing reduces the sound pressure level at the point of interest.

the railway embankment (fig. 7). Three scenarios were considered: no sound barriers at the railway embankment (scenario #1); low sound barriers at the railway embankment (scenario #2); high sound barriers at the railway embankment (scenario #3).

Next figures (fig. 8-10) illustrate acoustic pressure field in case when locomotive is situated on the top of



Fig. 7. Sketch of train at the railway embankment

([https://nunatsiaq.com/stories/article/65674baffinland\\_railway\\_may\\_be\\_dead\\_pond\\_inlet\\_group\\_declares/](https://nunatsiaq.com/stories/article/65674baffinland_railway_may_be_dead_pond_inlet_group_declares/))



Fig. 8. Dimensionless sound pressure field near railway track (scenario #1: no barriers)

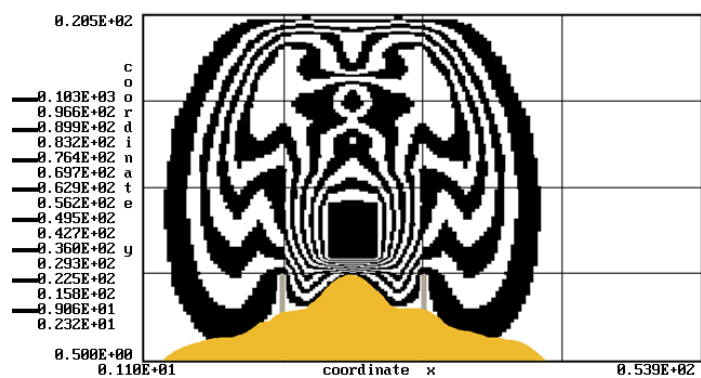


Fig. 9. Dimensionless sound pressure field near railway track (scenario #2: low barriers)

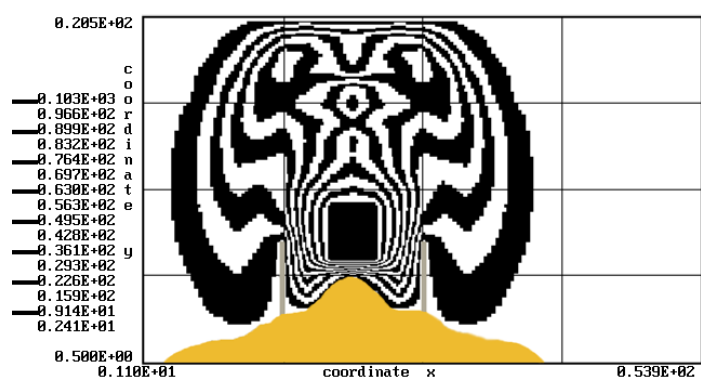


Fig. 10. Dimensionless sound pressure field near railway track (scenario #3: high barriers)

It can be seen from fig. 8-10, that complex sound pressure field is formed in the computational region. Interference of waves creates this picture of sound pressure distribution.

It should be noted that solving the problem requires 3 seconds from computer time.

**Scientific novelty and practical significance.** Developed numerical model allows to compute sound pressure pattern near the railways taking into account complex terrain and sound barriers installation. Results of numerical experiment are presented.

**Conclusions.** A numerical model was built to simulate sound pressure near the railway track. The model is based on the explicit difference scheme which was used for integration of wave equation for sound pressure. The model allows to simulate train traffic noise with account of geometrical form of terrain. The model takes little computation time to perform numerical experiment.

Further improvement of the model should be carried out in the direction of creating a 3D numerical model.

#### List of reference links

1. Andrelini B, Facchini G, Bellini CG 2011 9<sup>th</sup> World Congress on Railway Research 12.
2. Yang Z, Li Z, Rahimi S, Dollevoet R P B J 2014 Proceedings of ISMA2014 including USD2014 3583–94.
3. Sun Zhenxu, Song Jingjing, An Yiran 2012 Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics 6. 173-85.
4. Yang Xinwen, Yan Caiyun 2009 Proceedings of the 2nd International Conference on Transportation Engineering 2035–40.
5. Jufeng Su, Yamin Sun, Yuyang Liu 2018 Hindawi. Complexity 2018 16.
6. Xiaoqi Sun, Han Xiao 2018 Hindawi. Complexity 2018 12.
7. Wei-te Lu1, Yan Wang, Chun-qin Zhang 2017 Journal of Vibroengineering 19 2262–79.
8. State Enterprise «SRIBC» DSTU-N B V.1.1-33: 2013 Instruction on calculation and design of inhabited territories protection from the noise (Kyiv: Minrehion) p 46
9. Samarskii A A, Gulin A V 1989 Numerical methods (Moscow: Nauka) p 432.

**Lavinsky D.V.**

*candidate of technical sciences, docent,  
docent of the department «Theoretical Mechanics»  
National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute»*

**Morachkovsky O.K.**

*doctor of technical sciences, professor,  
head of the department «Theoretical Mechanics»,  
National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute»*

**Konkin V.M.**

*candidate of technical sciences, docent,  
professor of the department «Continuum Mechanics and Strength of Materials»  
National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute»*

**Konkin S.V.**

*student,  
National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute»*

## NUMERICAL INVESTIGATIONS OF THERMODEFORMATION OF ELECTROCONDUCTIVE BODIES UNDER THE ACTION OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD

**Лавінський Денис Володимирович**

*кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри «Теоретична механіка»  
Національний Технічний Університет «Харківський політехнічний інститут»*

**Морачковський Олег Костянтинович**

*доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри «Теоретична механіка»  
Національний Технічний Університет «Харківський політехнічний інститут»*

**Конкін Валерій Миколайович**

*кандидат технічних наук, доцент,  
професор кафедри «Механіка суцільних середовищ та опір матеріалів»  
Національний Технічний Університет «Харківський політехнічний інститут»*

**Конкін Станіслав Валерійович**

*студент,  
Національний Технічний Університет «Харківський політехнічний інститут»*

## ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОДЕФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ ТІЛ ПРИ ДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

**Summary.** The paper presents a variational formulation of the problem of analysis of electromagnetic field propagation, non-stationary (transient) temperature field and nonlinear deformation of systems of electrically conductive bodies. The analysis of the propagation of the electromagnetic field is reduced to finding the spatio-temporal distribution of vector magnetic and scalar electric potentials. The finite element method is used as a numerical solution method. A system of algebraic equations for determining the nodal values of the vector magnetic potential, temperature and displacements is obtained in general.

**Анотація.** В роботі наведено варіаційну постановку задачі аналізу розповсюдження електромагнітного поля, нестационарного температурного поля та нелінійного деформування систем електропровідних тіл. Аналіз розповсюдження електромагнітного поля зводиться до відшукування просторово-часового розподілення векторного магнітного та скалярного електричного потенціалів. В якості чисельного метода розв'язання використовується метод скінчених елементів. Одержані у загальному вигляді системи алгебраїчних рівнянь для визначення вузлових значень векторного магнітного потенціалу, температури та переміщень.

**Key words:** *nonlinear deformation, electromagnetic field, temperature field, finite element method, vector magnetic potential.*

**Ключові слова:** *нелінійне деформування, електромагнітне поле, температурне поле, метод скінчених елементів, векторний магнітний потенціал.*

**Постановка проблеми, аналіз останніх досліджень.** Електромагнітне поле (ЕМП) є невід'ємною складовою функціонування багатьох технічних та технологічних систем. Тут можна відзначити різноманітні енергетичні системи, технологічні системи індукційного нагріву,

системи використання сильних ЕМП для обробки матеріалів [1-3]. Дія ЕМП на елементи конструкцій розрізняється в залежності від типів їх матеріалів. Для електропровідних матеріалів превалюючою є силова дія та теплова. Мається на увазі виникнення розподілених джерел тепловиділення (як наслідок



закон Джоуля-Ленца про тепловиділення при протіканні електричного струму), які призводять до змін у тепловому полі тіла. Зміни теплового поля електропровідного тіла також можуть у значній мірі впливати на його деформування. Аналіз деформування електропровідних тіл, які є елементами конструкції відповідних технічних або технологічних систем, є обов'язковим етапом проектування. Розрахунковий аналіз деформування неможливо проводити без попереднього аналізу розповсюдження основних компонентів ЕМП та теплового поля. Сучасний підхід потребує використання єдиних розрахункових моделей, у рамках яких проводиться послідовне розв'язання вказаних задач. Також, зрозуміло, що методи розрахункового аналізу повинні спиратись на чисельні алгоритми, оскільки аналітичні підходи можуть бути адекватно використані лише для обмеженого класу розрахункових моделей (обмеження по геометрії, поведінці матеріалу тощо). Таким чином, створення та використання розрахункових методів аналізу розповсюдження ЕМП, теплового поля та деформування електропровідних тіл є актуальним завданням у науковому та практичному сенсі.

**Постановка завдання досліджень.** У роботах [4-6] надано повну математичну постановку задач аналізу розповсюдження ЕМП та теплового поля, а також аналізу термо-пружно-пластичного деформування систем контактуючих тіл. Відзначимо, що при розрахунках реальних технічних та технологічних систем всебічний аналіз може проводитись лише із застосуванням чисельних методів. Найбільш поширеним з яких є метод скінчених елементів (МСЕ). Реалізація МСЕ спирається на варіаційні постановки відповідних задач.

Перший етап розв'язання передбачає знаходження просторово-часових розподілів основних векторних компонентів ЕМП. В першу чергу, зменшимо кількість характеристик, які описують розповсюдження ЕМП. Для цього введемо до розгляду векторний магнітний  $\vec{A}$  та скалярний електричний  $\phi$  потенціали:

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}; \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0; \quad \vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{\nabla} \phi. \quad (1)$$

Де  $\vec{B}, \vec{E}$  – вектори магнітної індукції та напруженості електричного поля. Тоді система фундаментальних рівнянь Максвела із використанням понять про векторний та скалярний потенціали зводиться до двох диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \dot{\vec{u}} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) + \frac{1}{\gamma} \vec{\nabla} \times \frac{1}{\mu_c} (\vec{\nabla} \times \vec{A}) + \vec{\nabla} \phi = \vec{J}; \\ \vec{\nabla} \cdot \left[ \gamma \left( -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) - \vec{\nabla} \phi + \dot{\vec{u}} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) \right] = \rho_e. \end{cases} \quad (2)$$

Де  $\gamma, \mu_c$  – електропровідність та магнітна проникність матеріалу,  $\vec{J}, \rho_e$  – вектор густини сили струму та густина розподіленого електричного

заряду,  $\dot{\vec{u}}$  – вектор швидкості точки тіла. Наведена система дозволяє аналізувати розподіл ЕМП у рухомих електропровідних тілах, електрофізичні властивості яких є змінними (в залежності від температури тіла (електропровідність та магнітна проникність) та в залежності від рівня напруженості магнітного поля (магнітна проникність для магнетиків)).

Для векторного магнітного та скалярного електричного потенціалів формулюються початкові умови:

$$\vec{A}(0) = 0; \quad \phi(0) = 0. \quad (3)$$

Якщо початкові умови для потенціалів формулюються ідентично, то граничні умови мають деякі розбіжності. Якщо ні на якій границі тіла не задані компоненти ЕМП, то у цьому випадку слід розглядати тіло разом із оточуючим середовищем і моделювати загасання ЕМП на віддаленні, тобто граничні умови можуть бути записані:

$$\vec{A}|_{\infty} = 0; \quad \phi|_{\infty} = 0. \quad (4)$$

У випадку, коли на якійсь границі тіла задано компоненти ЕМП, то (у квазістационарному випадку) граничні умови для потенціалів мають вигляд:

$$\left. \frac{\partial \phi_i}{\partial x_i} \right|_{\Gamma} = -E_{\Gamma i}, \quad i = 1, 2, 3;$$

$$\left. \left( \frac{\partial A_i}{\partial x_j} - \frac{\partial A_j}{\partial x_i} \right) \right|_{\Gamma} = B_{\Gamma k}, \quad i \neq j \neq k = 1, 2, 3. \quad (5)$$

Де позначка  $\Gamma$  означає приналежність відповідної величини до границі тіла.

У випадку нехтування рухом електропровідного тіла, а також змінності його електрофізичних характеристик система (2) спрощується до вигляду:

$$\gamma = const; \quad \mu = const;$$

$$\dot{\vec{u}} = 0 \Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \frac{1}{\mu_c \gamma} \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) + \vec{\nabla} \phi = \vec{J}; \\ \Delta \phi = \rho_e. \end{cases} \quad (6)$$

У даному випадку друге рівняння системи може бути розв'язаним незалежно від першого, тобто задача розділяється на два кроки: знаходження скалярного електричного потенціалу, потім знаходження векторного магнітного потенціалу. Для знаходження векторного магнітного потенціалу достатньо знайти його компоненти, тобто необхідно представити перше з рівнянь (6) по компонентах, одержуємо усього чотири скалярні рівняння, для яких можуть бути сформульовані відповідні функціонали і розв'язок задачі про розподіл ЕМП знаходиться з умови їх стаціонарності. Самі функціонали мають вигляд:

$$ELEC = \int_V \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 - \rho_e \phi \right] dV. \quad (7)$$

$$\begin{aligned} MAG_{(x)} &= \int_V \left[ \frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{\partial A_x}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial A_x}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial A_x}{\partial z} \right)^2 \right\} + \phi \cdot A_x + \mu \gamma \frac{\partial A_x}{\partial t} A_x \right] dV; \\ MAG_{(y)} &= \int_V \left[ \frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{\partial A_y}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial A_y}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial A_y}{\partial z} \right)^2 \right\} + \phi \cdot A_y + \mu \gamma \frac{\partial A_y}{\partial t} A_y \right] dV; \\ MAG_{(z)} &= \int_V \left[ \frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{\partial A_z}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial A_z}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial A_z}{\partial z} \right)^2 \right\} + \phi \cdot A_z + \mu \gamma \frac{\partial A_z}{\partial t} A_z \right] dV; \end{aligned} \quad (8)$$

У подальшому будемо нехтувати внеском скалярного електричного потенціалу (електричного поля) у деформування та тепловиділення, тобто не будемо розглядати функціонал (7). Розв'язання задачі визначення

характеристик ЕМП надає можливість враховувати його дію на теплове поле та процес деформування. Нестационарне розповсюдження теплового поля може бути визначене з умови стаціонарності наступного функціоналу:

$$\begin{aligned} Temp &= \int_V \left\{ \frac{\lambda}{2} \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] - QT + \rho c \frac{\partial T}{\partial t} T \right\} dV + \\ &+ \int_{A_q} q T dS + \int_{A_\alpha} \frac{\alpha}{2} [T^2 - 2T_\infty T] dV; \end{aligned} \quad (9)$$

тут  $\lambda$  – теплопровідність матеріалу;  $\rho$  – густина матеріалу,  $c$  – питома теплоємність;  $q$  – функція теплового потоку;  $\alpha$  – коефіцієнт конвекційного теплообміну;  $T_\infty$  – температура навколишнього середовища;  $A_q, A_\alpha$  – області границі тіла на яких задано тепловий потік та умови конвекційного теплообміну відповідно. Тепловиділення при розповсюдженні ЕМП враховується шляхом введення розподілених джерел тепловиділення:

$$Q = \frac{1}{\nu} (\vec{\nabla} \times \vec{H})^2, \quad (10)$$

де  $\vec{H}$  – вектор напруженості магнітного поля. Компоненти НДС при пружному деформуванні (в умовах нехтування внеском електричного поля та у відсутності поверхневих струмів) можуть бути визначені з умови стаціонарності потенційної енергії, яку представимо так:

$$U = \frac{1}{2} \int_V \varepsilon \cdot \cdot \hat{C} \cdot \cdot \varepsilon dV - \int_V (\vec{j} \times \vec{B}) \cdot \vec{u} dV - \int_S \vec{p} \cdot \vec{u} dS - \int_V \Delta T \cdot \cdot \hat{C} \cdot \cdot \varepsilon dV; \quad (11)$$

$$\hat{C} = - \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \hat{I} \otimes \hat{I} + \frac{E}{2(1+\nu)} (e_k \otimes \hat{I} \otimes e^k + e_i \otimes e_k \otimes e^i \otimes e^k). \quad (12)$$

Тут ми врахували дію електромагнітних сил (друга складова), наявність поверхневих розподілених сил (третя складова) та наявність приросту температури (четверта складова).

Розв'язок відшукується з відповідних умов стаціонарності функціоналів (8),(9),(11), причому, для нестационарних ЕМП та теплового поля ці умови повинні виконуватись на кожному кроці за часом –  $k$ :

$$\delta(MAG_{(x)}^k) = 0; \quad \delta(MAG_{(y)}^k) = 0; \quad \delta(MAG_{(z)}^k) = 0; \quad \delta(Temp^k) = 0; \quad \delta U = 0. \quad (13)$$

Шукані змінні задачі: компоненти векторного магнітного потенціалу, температура та

переміщення. Тоді умови стаціонарності потребують рівності нулю наступних похідних:

$$\frac{\partial MAG_{(x)}^k}{\partial A_x} = 0; \quad \frac{\partial MAG_{(y)}^k}{\partial A_y} = 0; \quad \frac{\partial MAG_{(z)}^k}{\partial A_z} = 0; \quad \frac{\partial Temp^k}{\partial T} = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial u} = 0. \quad (14)$$

Що призводить до наступної системи алгебраїчних рівнянь відносно шуканих змінних, яку представляємо у векторно-матричній формі:

$$\begin{aligned} [M]\{A_x\} + [M\gamma] \left\{ \frac{\partial A_x}{\partial t} \right\} &= \{U_x\}; \\ [M]\{A_y\} + [M\gamma] \left\{ \frac{\partial A_y}{\partial t} \right\} &= \{U_y\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [M]\{A_z\} + [M\gamma] \left\{ \frac{\partial A_z}{\partial t} \right\} &= \{U_z\}; \\
 [L]\{T\} + \{C\}^T \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} &= \{Q\} + \{Q\}^q + \{Q\}^\alpha; \\
 [K]\{u\} &= \{p\} + \{f_{em}\},
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

тут  $[M]$  – «магнітна» матриця,  $[M_\gamma]$  – матриця, аналогічна за змістом матриці теплоємності у задачі теплопровідності,  $[L]$  – «матриця теплопровідності»,  $[C_T]$  – матриця теплоємності,  $\{Q\}$  – вектор-стовпець внутрішніх джерел тепловиділення,  $\{Q\}^q$ ,  $\{Q\}^\alpha$  – вектори «теплових поверхневих навантажень» завдяки можливому

потокі через поверхню, або завдяки конвекційному теплообміну, усі інші матриці та вектори є східними з тими, що вже розглянуті раніше. Далі наведемо у загальному вигляді вирази для обчислення матриць та векторів, які входять у визначальні співвідношення (15), для випадку ізотропного матеріалу. «Магнітна матриця» одного СЕ:

$$[M]_{(el)} = \int_{V_{(el)}} \{B\}^T [\mu] \{B\} dV_{(el)}, \quad \{B\}^T = \left\{ \frac{\partial N}{\partial x} \quad \frac{\partial N}{\partial y} \quad \frac{\partial N}{\partial z} \right\}^T.$$

Матриця  $[M_\gamma]$ :  $[M_\gamma]_{(el)} = \mu\gamma \int_{V_{(el)}} \{N\}^T \{N\} dV_{(el)}$ . Матриця теплопровідності:

$$[L] = \int_V \{B\}^T [\lambda] \{B\} dV. \quad \{B\}^T = \left\{ \frac{\partial N}{\partial x} \quad \frac{\partial N}{\partial y} \quad \frac{\partial N}{\partial z} \right\}^T, \quad [\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix}.$$

Матриця теплоємності:  $[C_T]_{(el)} = c\rho \int_{V_{(el)}} \{N\}^T \{N\} dV_{(el)}$ . Вектори внутрішніх джерел тепловиділення та поверхневих «навантажень»:

$$\{Q\} = \int_V Q \{N\}^T dV; \quad \{Q\}^q = \int_V q \{N\}^T dV; \quad \{Q\}^\alpha = \int_V \alpha \{N\}^T \{T_\infty\} dV.$$

Для розв'язку у часі розглядається схема, котра на кожному кроці  $k$  за часом призводить до

наступних рівнянь відносно компонент векторного магнітного потенціалу та температури:

$$\begin{aligned}
 [M^{k-1}]\{A_i^k\} &= -[M\gamma^{k-1}] \frac{\{A_i^k\} - \{A_i^{k-1}\}}{\Delta t} + \{J_i^{k-1}\}; \quad i = 1, 2, 3. \\
 [L^{k-1}]\{T^k\} &= -\{C^{k-1}\}^T \frac{\{T^k\} - \{T^{k-1}\}}{\Delta t} + \{Q^{k-1}\} + \{Q^{k-1}\}^q + \{Q^{k-1}\}^\alpha.
 \end{aligned}$$

Якщо властивості матеріалу залежать від температури, то на кожному кроці за часом відбувається їх корегування за схемою, подібною до корегування магнітної проникності. Відомо, що властивості матеріалу змінюються в залежності від температури повільно, тож при достатньо малому часовому кроці  $\Delta t$  уточнення значень властивостей

матеріалу не буде потребувати більше двох-трьох ітерацій.

У випадку визначення НДС при пружно-пластичному деформуванні розглянемо слабку форму рівнянь рівноваги, розв'язок відшукуємо з умови:

$$\begin{aligned}
 G(\hat{\sigma}, \delta \vec{u}) &= 0, \\
 G(\hat{\sigma}, \delta \vec{u}) &= \int_V \hat{\sigma} \cdot \delta \hat{\varepsilon} dV - \int_V (\vec{j} \times \vec{B}) \cdot \delta \vec{u} dV - \int_{A_p} \vec{p} \cdot \delta \vec{u} dA
 \end{aligned}$$

тут  $\delta \vec{u}$  – вектор віртуальних переміщень, який пов'язаний із деформаціями наступним чином:

$$\delta \hat{\varepsilon} = \frac{1}{2} \left[ \vec{\nabla} \delta \vec{u} + (\vec{\nabla} \delta \vec{u})^T \right].$$

Чисельна процедура розв'язання полягає в наступному. Наприклад, розглядаються два кроки розв'язку  $n$  та  $n+1$ , вважаємо, що на кроці  $n$  відомі тензори напружень, пружних та пластичних

деформацій, також відомі механічні навантаження та електромагнітні сили. Тоді, необхідність виконання умови стаціонарності на кожному кроці призводить до рівняння:

$$\hat{\sigma}_{n+1} = \hat{\sigma}_n + {}^{(4)}C^{ep} \cdot \Delta \hat{\varepsilon}, \tag{16}$$

де  $\Delta \hat{\varepsilon}$  – тензор прирощення деформацій,  ${}^{(4)}C^{ep}$  – пружно-пластичний тензор.

Окремі питання можуть виникати у разі розгляду систем контактної-взаємодіючих тіл. Питання коректного врахування умов контактної взаємодії, а також ефективний чисельний метод для моделювання контактної взаємодії наведених у роботах [5,6].

Наведені варіаційні постановки відповідних задач та наступні системи лінійних алгебраїчних рівнянь можуть бути використаними для створення алгоритмів відповідно до схем МСЕ.

**Висновки.** В роботі представлено варіаційну постановку задачі аналізу розповсюдження електромагнітного поля, нестационарного температурного поля та нелінійного деформування систем електропровідних тіл. У якості ключових змінних обрано векторний магнітний та скалярний електричний потенціали, температуру та переміщення, для яких наведені відповідні функціонали. Із застосуванням схем методу скінчених елементів одержані системи алгебраїчних рівнянь відносно вузлових значень вказаних змінних.

#### Список литературы:

1. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Элементы теории и численного расчета электромагнитных процессов в проводящих средах. Киев: Изд. Ин-та электродинамики НАН Украины, 1999. 363 с.
2. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Харьков: Вища школа, 1977. 189 с.
3. Миронов В.А. Магнитно-импульсное прессование порошков. Рига: Зинатне, 1980. 196 с.
4. Altenbach H., Morachkovsky O., Lavinsky D., Naumenko K. Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2016. Vol. 28. No. 5. P. 1421-1433.
5. Lavinskii D.V., Morachkovskii O.K. Elastoplastic Deformation of Bodies Interacting Through Contact Under the Action of Pulsed Electromagnetic Field. *Strength of materials*. 2016. - Vol. 48. No. 6. P. 760-767.
6. Lavinskii D.V., Bondar' S.V. Study of thermoelastoplastic contact deformation of production tooling mixed structures. *Strength of materials*. 2011. Vol. 43. No. 4. P. 447-454.

УДК 624.21.037:624.014.2:625.41  
ГРНТИ 67.29.63:67.11.35

**Senkin N.A.**

*Candidate of Technical Sciences,*

*Associate Professor of the department of metal and timber constructions  
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering*

**Filimonov A.S.**

*master student of the department of metal and timber constructions  
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering*

**Khalimbekov I.M.**

*master student of the department of metal and timber constructions  
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering*

### **SURVIVABILITY OF BUILDING STRUCTURES OF NAVAL PART OF A HIGH-SPEED TRANSPORT HIGHWAY FROM SHIP STRIKE**

**Сенькин Николай Александрович**

*Кандидат технических наук,*

*доцент кафедры металлических и деревянных конструкций*

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет*

**Филимонов Александр Сергеевич**

*Магистрант кафедры металлических и деревянных конструкций*

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет*

**Халимбеков Ислам Мурадович**

*Магистрант кафедры металлических и деревянных конструкций*

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет*

### **О ЖИВУЧЕСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МОРСКОГО УЧАСТКА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ МАГИСТРАЛИ ОТ НАВАЛА СУДНА**

**Summary.** The high-speed transport highway (HSTH) connecting St. Petersburg, its suburbs and Leningrad Region was developed in student research projects. The highway is a large-span and altitude cable-rod arch system of overpass design. The article deals with the problem of preserving the bearing capacity and safety of HSTH elements and protection against progressive collapse (PC) under the influence of special loads. The considered section of the highway is located in the Gulf of Finland between Kronstadt and B. Izhora. Possible different influences and loads during the operation of the section are given. A disaster scenario has been analyzed: the ship leaves the fairway and hits the elements of the column, which are destroyed or receive great efforts. Schemes with

destroyed elements are calculated for the special combinations of loads. As a result, the stress-strain state of structural elements is determined and indicates the impossibility of PC and ensures the survivability of the HSTH.

**Аннотация.** В рамках студенческих исследований выполнена разработка высокоскоростной транспортной магистрали, проходящей по линии связи Санкт-Петербурга, его пригородов и Ленинградской области. Магистраль представляет собой большепролетную и высотную вантово-стержневую арочную систему эстакадного исполнения. В статье рассмотрена проблема сохранения несущей способности и безопасности элементов конструкции и защиты от прогрессирующего обрушения при воздействии особых нагрузок. Приведены возможные воздействия, возникающие при эксплуатации участка магистрали, расположенного в акватории Финского залива между Кронштадтом и Большой Ижорой. Проанализирован сценарий катастрофы, при котором происходит удар или навал морского судна, выходящего за пределы ширины фарватера, приводящий к значительным усилиям в элементах конструкции и к их локальному разрушению. В результате расчета вторичных расчетных схем на особые комбинации нагрузок определено напряженно-деформированное состояние элементов конструкции, свидетельствующее об отсутствии прогрессирующего обрушения и обеспечении живучести магистрали.

**Keywords:** *high-speed transport highway, overpass of large-diameter pipes, cable-stayed and arched structures, progressive collapse and survivability.*

**Ключевые слова:** *высокоскоростная транспортная магистраль, эстакада из труб большого диаметра, вантовые и арочные конструкции, прогрессирующее обрушение и живучесть.*

Многომиллионный мегаполис Санкт-Петербург требует своевременного решения транспортной задачи по быстрому, удобному и безопасному перемещению жителей и гостей в любую точку города и его пригородов. Новые идеи вместе с современным подходом к решению данной задачи ждут воплощения в проектах и реальности [1]. Продолжается исследовательская и проектная работа по созданию сети высокоскоростной транспортной магистрали (ВСТМ) с транспортно-пересадочными узлами (ТПУ) [2].

Проектируемый морской участок ВСТМ проходит в акватории Финского залива и соединяет населенные пункты: Большая Ижора, Кронштадт и Сестрорецк с одноименными ТПУ, расположенными в непосредственной близости от них. Рассматривается участок между ТПУ «Ижора» и ТПУ «Кронштадт», пересекающий судовой ход в порты Санкт-Петербурга по Кронштадскому фарватеру (рисунок 1).

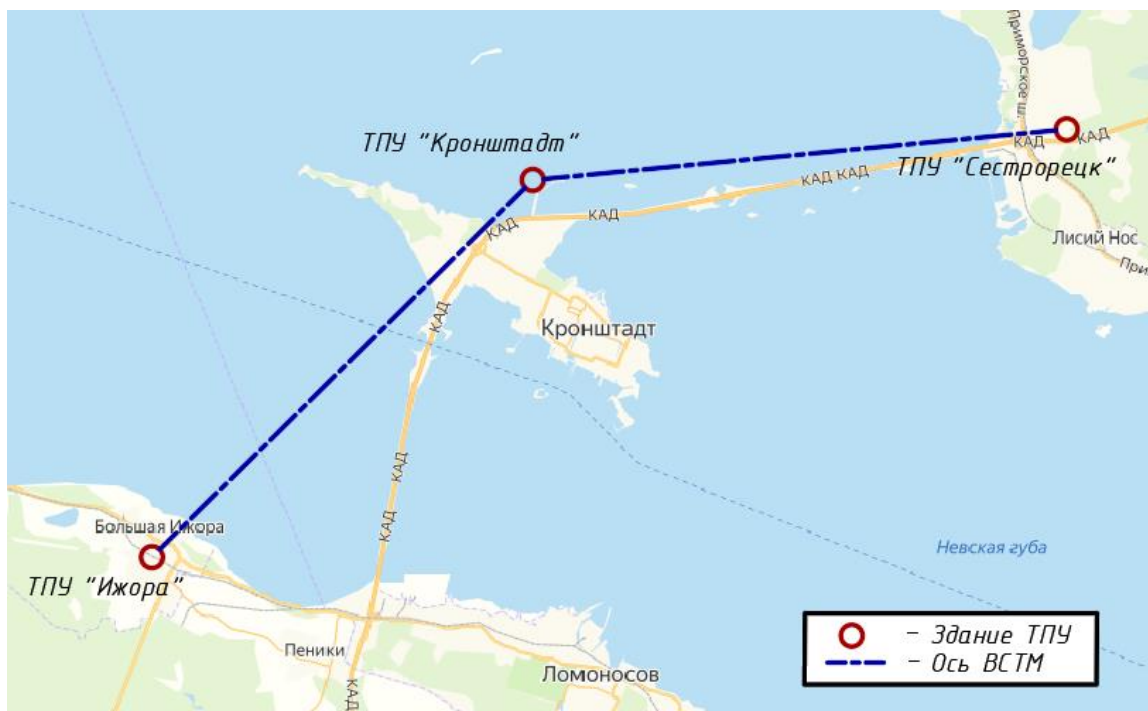


Рисунок 1. Морской участок магистрали

Конструкция магистрали представляет собой большепролетную и высотную вантово-стержневую арочную систему эстакадного исполнения: основной пролет которой составляет 360.0 м, дополнительный для арок в зоне подхода к ТПУ – 180 м, а отметка рельсового пути

проектируется на уровне +88.0 в Балтийской системе координат. Главный элемент магистрали – жесткая балка путепровода представляет собой четырехтрубное сечение с вакуумированной полостью, в которой осуществляется движение поездов с использованием перспективной

технологии Maglev [3]. Вантовые элементы системы, выполняющие стабилизирующие и несущие функции, разделены на несколько групп, различающихся местоположением и характером работы: оттяжки и подвески, в основном, предназначаются для передачи усилий с балки на

другие несущие конструкции, а опорные ванты являются элементами раскрепления для обеспечения расчетных длин, восприятия и передачи ветровых нагрузок на колонны (рисунок 2).

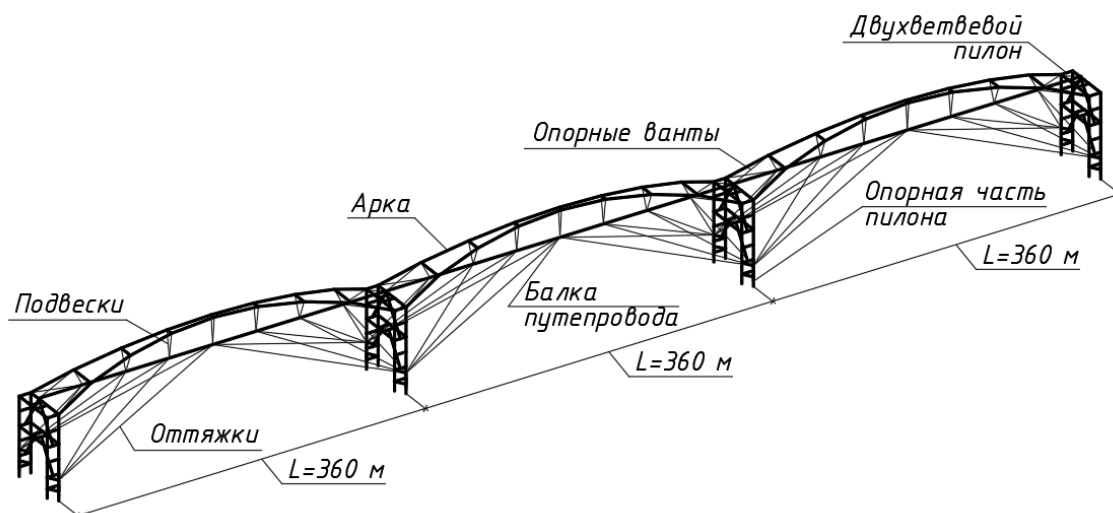


Рисунок 2. Конструкция морского участка магистрали

Для определения жизнеспособности конструкции проведён анализ и сбор действующих нагрузок, а также рассмотрены возможные аварийные ситуации в результате воздействия особых нагрузок, а также ледовых и волновых воздействий.

Ледовые воздействия и нагрузки, возникающие во время холодных зим на северо-западе России и приводящие к ледоставу и ледоходу в водах Финского залива, не должны вызывать значительного влияния на конструкцию магистрали в связи с комплексом дополнительных превентивных мер, поэтому в условиях настоящей задачи не учитываются. Так в целях защиты элементов предлагается установка барьеров (ледорезов) перед конструкциями, изменение формы опорных элементов в местах приложения ледовых нагрузок и повышенный контроль за ледовой обстановкой в опасных зонах. Комплексный анализ ледовых, а также волновых нагрузок и воздействий для условий расчётного шторма на опоры конструкции планируется провести в последующем исследовании.

При выполнении расчёта конечно-элементной схемы учтены и определены следующие нагрузки

природного и технологического характера: собственный вес конструкций ( $L1$ ), вес технологического оборудования ( $L2$ ), снеговое нагружение ( $L3$ ), ветровая нагрузка ( $L4$ ), воздействие от движения поезда, последовательно прикладываемое от колонны к середине пролёта ( $L5-L9$ ), а также особая нагрузка – ударная ( $L10$ ) от навала морского судна.

В соответствии с [4] при проектировании сооружений класса КС-3, характеризующимися значительными высотами и пролётами несущих строительных конструкций, следует учитывать аварийные ситуации, возникающие при действии особых нагрузок и воздействий. Подробно рассмотрен сценарий возможной катастрофы, при котором в несколько этапов определяются живучесть арочно-вантовой системы, проложенной над фарватером, при ударной нагрузке – навале судна на левую колонну (Этап 1) и последующего вывода из строя I-й группы несущих оттяжек-вант с их обрывом (Этап 2), а затем с обрывом II-й группы оттяжек-вант (Этап 3). Место приложения усилия от удара по высоте сооружения принято на ветвь колонны, расположенной на уровне борта судна (рисунок 3).



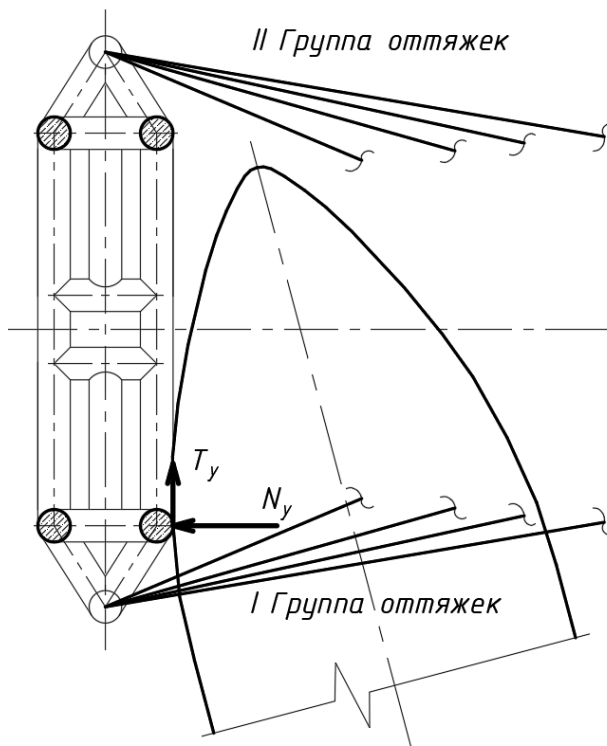


Рисунок 3. Приложение ударной нагрузки от навала судна

За расчётное судно принят крупнейший круизный лайнер MSC Meraviglia [5], ходивший в водах Финского залива. Длина лайнера составляет

$L=316,0$  м, а ширина и высота 43,0 и 72,0 м соответственно (рисунок 4).

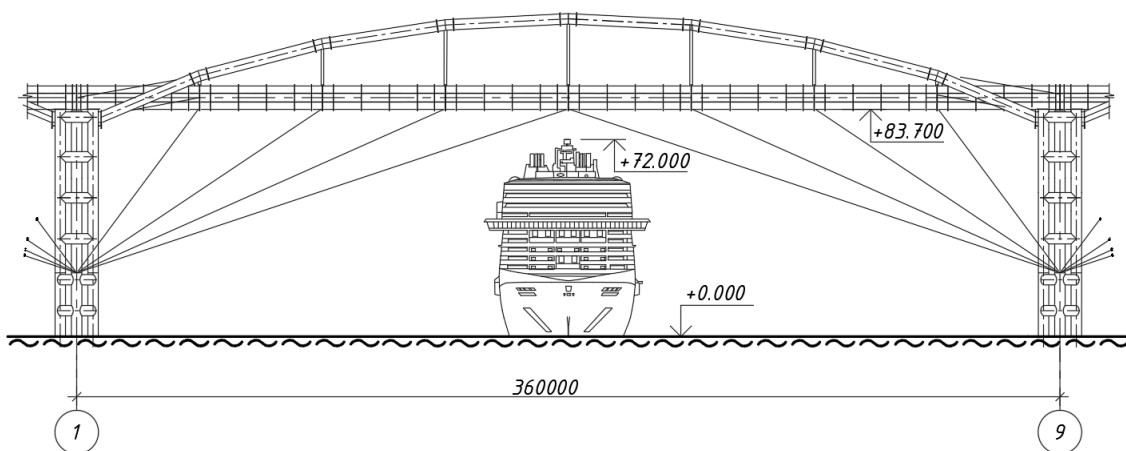


Рисунок 4. Сопоставление габаритов лайнера и магистрали

В исследовательских целях величина нагрузки принимается по нормативно-техническим документам для гидротехнических сооружений. В соответствии с [6] значение силы удара судна  $N_y$  на сооружение не должно превышать допустимого давления на корпус судна, тогда для лайнера как морского судна с ледовыми подкреплениями:

$$N_{y, \text{судн}} = N_d = 50 + 2.7(L - 10) = 50 + 2.7(316.0 - 70) = 714.2 \text{ т}$$

В соответствии с [7] учёт случайных столкновений, ошибок персонала, неисправностей, комбинации этих факторов осуществляется

применением коэффициента безопасности  $\gamma_s$ , тогда применительно к усилию:

$$N_y = \gamma_s N_{y, \text{судн}} g = 2.0 \cdot 714.2 \cdot 9.81 = 14.0 \text{ МН}$$

Сила  $T_y$ , направленная по касательной к сооружению:

$$T_y = N_y f_m = 14.0 \cdot 0.6 = 8.4 \text{ МН}$$

где  $f_m=0.6$  – коэффициент трения судна об резиновые отбойные устройства, которыми заблаговременно защищены колонны.

В соответствии с принятыми этапами развития предполагаемой катастрофы, а также, следуя требованиям нормативной базы [8], из расчётной схемы последовательно удалены разрушаемые элементы и произведен расчёт вторичных схем на

нагрузки в особых сочетаниях (постоянные и длительные нагрузки, длительные части кратковременных нагрузок, а также на нагрузки от подвижных составов) с понижающими коэффициентами сочетаний с целью обеспечения надежности конструкции и безопасности для пассажиров (таблица 1) [9,10].

Таблица 1

**Усилия в элементах и перемещения узлов расчетной схемы ВСТМ**

Расчётная комбинация усилий	Ветвь колонны			Балка путепровода			Арка	
	Усилия			Усилия		Перемещение <i>S</i> , мм	Усилия	
	<i>M</i> , МН·м	<i>N</i> , МН	<i>Q</i> , МН	<i>M</i> , МН·м	<i>N</i> , МН		<i>M</i> , МН·м	<i>N</i> , МН
<b>При основном сочетании нагрузок</b>								
$L1+L2+0.7L3+0.9L4+L5$	6.2	-19.3	0.4	61.2	3.7	530.7	-49.0	-46.2
$L1+L2+0.7L3+0.9L4+L9$	16.5	-12.5	1.5	91.1	14.1	598.7	-56.1	-70.0
$L1+L2+0.7L3+L4+0.9L5$	6.0	-19.0	0.4	55.0	3.6	551.8	-49.9	-46.4
$L1+L2+0.7L3+L4+0.9L9$	15.2	-12.9	1.4	81.7	12.9	598.3	-68.8	-54.6
<b>При особом сочетании нагрузок</b>								
$L1+L2+0.3L3+0.3L4+0.5L5+L10$	63.4	-25.1	10.3	25.4	2.9	397.3	-43.7	-41.6
$L1+L2+0.3L3+0.3L4+0.5L9+L10$	62.7	-21.7	10.8	43.4	8.3	391.5	-54.0	-46.1
$L1+L2+0.3L3+0.5L4+0.3L5+L10$	63.2	-24.4	10.2	23.4	2.7	438.7	-45.5	-42.1
$L1+L2+0.3L3+0.5L4+0.3L9+L10$	62.8	-22.4	10.6	38.2	5.7	423.8	-51.6	-44.8
<b>При потере вантовых элементов I группы</b>								
$L1+L2+0.5L3+L5$	5.1	-19.9	0.3	-31.8	2.1	330.9	-31.9	-36.0
$L1+L2+0.5L3+L6$	8.4	-19.9	0.7	-47.9	3.9	297.8	-34.2	-37.7
$L1+L2+0.5L3+L7$	11.4	-18.4	1.1	-70.6	6.6	199.4	-38.4	-40.1
$L1+L2+0.5L3+L8$	12.8	-16.2	1.2	-81.0	9.0	111.6	-43.2	-42.3
$L1+L2+0.5L3+L9$	12.2	-14.6	1.1	-69.9	9.9	150.5	-46.2	-43.1
<b>При потере вантовых элементов I и II групп</b>								
$L1+L2+0.5L3+L5$	4.9	-20.0	0.3	-41.5	2.3	497.8	-31.8	-36.2
$L1+L2+0.5L3+L6$	8.3	-20.0	0.7	-55.6	4.1	461.9	-34.3	-38.3
$L1+L2+0.5L3+L7$	11.3	-18.6	1.1	-74.7	6.9	350.1	-38.5	-40.8
$L1+L2+0.5L3+L8$	12.7	-16.3	1.2	-85.2	9.2	176.0	-44.0	-42.7
$L1+L2+0.5L3+L9$	12.1	-14.7	1.1	-79.2	9.9	85.9	-46.3	-43.3

Данные показывают, что во всех случаях перемещения узлов балки путепровода  $S$  не превышают предельных значений [1]:

$$S < [S] = \frac{L_{\text{прод}}}{600} = \frac{360.0 \cdot 10^3}{600} = 360.0 \text{ мм}$$

Выполнение условия по деформативности балки имеет важное значение: обеспечивается

возможность нормальной эксплуатации путепровода и безопасной эвакуации пассажиров при движении и остановке поездов в аварийных ситуациях на всех этапах.

Усилия при потере схемой вантовых элементов (рисунок 5) не превышают значений, полученных при расчёте на основные комбинации (рисунок 6), что в данном случае позволяет судить о сохранении несущей способности всех элементов

системы. При расчёте на особое сочетание наблюдается увеличение усилий в колонне в несколько раз, что требует применения вполне приемлемых конструктивно-технологических решений по их снижению, например, при помощи

установки демпфирующих устройств и посредством усиления трубобетонного сечения колонны посредством дополнительного армирования.

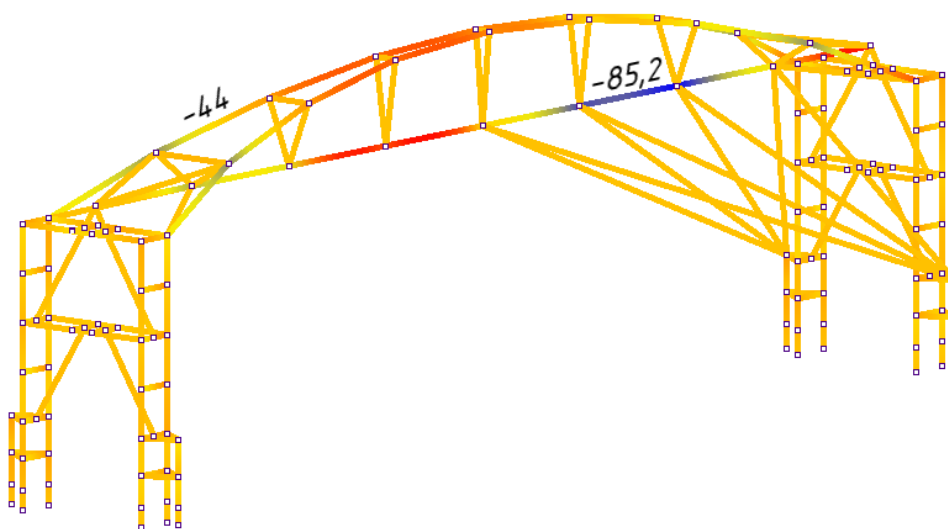


Рисунок 5. Максимальные изгибающие моменты в элементах магистрали при потере вантовых элементов I и II групп (МН·м)

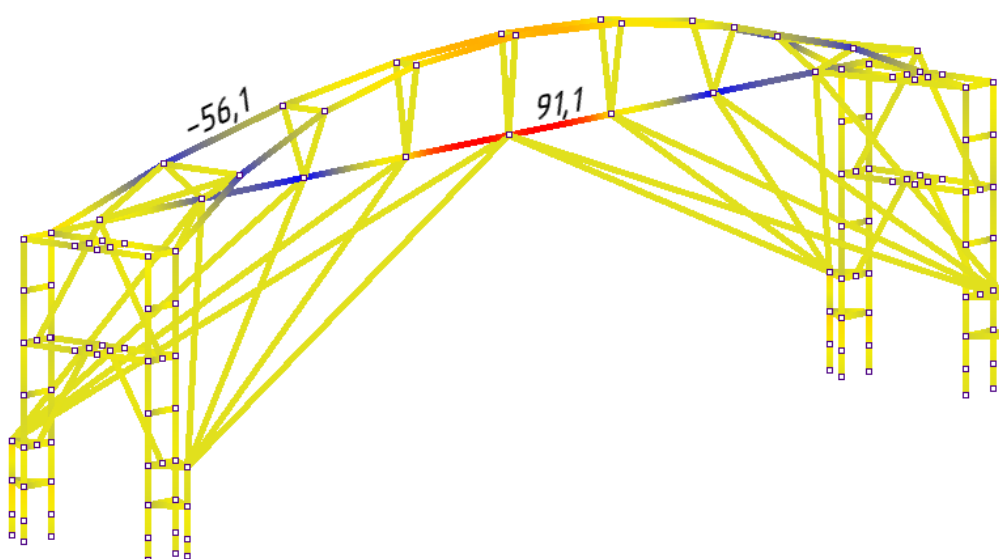


Рисунок 6. Максимальные изгибающие моменты в элементах магистрали при основном сочетании нагрузок (МН·м)

Вышеуказанные расчеты с определением внутренних сил в элементах и перемещений узлов сложной вантово-стержневой системы выполнялись с использованием программного комплекса “SCAD Office 21.1” на комплекс нагрузок в особых сочетаниях с учетом динамических воздействий и нелинейности.

Проведенный анализ и полученные результаты на данном этапе проектирования и исследований позволяют сделать вывод об устойчивости строительных конструкции морского участка высокоскоростной транспортной магистрали к прогрессирующему обрушению или ее живучести при нагрузках и воздействиях от навала судна с

обеспечением требований надежности и безопасности.

Комплексный анализ ледовых, а также волновых нагрузок и воздействий для условий расчётного шторма на опоры конструкции высокоскоростной транспортной магистрали планируется провести в последующем исследовании.

#### Список литературы

1. Сенькин Н.А., Филимонов А.С., Харитонов К.Е., и др. К вопросу создания высокоскоростной транспортной магистрали в Санкт-Петербурге // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5.

– № 4. – С. 73–95. [Senkin NA, Filimonov AS, Kharitonov KE, et al. On the Creation of a High-Speed Transport Highway in St. Petersburg. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(4):73-95.] <https://doi.org/10.17816/transsyst20195473-95>.

2. Сенькин Н.А., Филимонов А.С., Халимбеков И.М. и др. Предложения по строительству эстакадных конструкций и транспортно-пересадочных узлов для высокоскоростной магистрали в Санкт-Петербурге // *Транспортные системы и технологии*. – 2020. – Т. 6. – № 4. – С. 01–25. [Senkin NA, Filimonov AS, Khalimbekov IM, et al. Proposals for the construction of overpass structures and transport hubs for the high-speed highway in Saint Petersburg. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(4):00-00. (In Russ.)] <https://doi.org/10.17816/transsyst20206400-00>.

3. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А. Магнитолевитационная транспортная технология / под ред. В.А. Гапановича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с. [Antonov YuF, Zaitsev AA *Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya*. Gapanovich VA, editor. Moscow: FIZMATLIT; 2014. 476 p. ISBN 978-5-9221-1540-7 (In Russ.)].

4. СП 296.1325800.2017 Свод правил. Здания и сооружения. Особые воздействия. [SP 296.1325800.2017 *Svod pravil. Zdaniya i sooruzheniya. Osobyе vozdeystviya*. (In Russ.)].

5. Круизный суперлайнер MSC Meraviglia впервые зашел в Санкт-Петербург. URL: <https://www.atorus.ru/news/press-centre/new/44532.html>.

6. СН 144-60 Технические условия определения нагрузок от судов на причальные сооружения. [SN 144-60 *Tekhnicheskie uslovija opredelenija nagruzok ot sudov na prichal'nye sooruzhenija*. (In Russ.)].

7. СП 38.13330.2018 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). [SP 38.13330.2018 *Nagruzki i vozdeystviya na gidrotehnicheskie sooruzhenija (volnovye, ledovye i ot sudov)*. (In Russ.)].

8. СП 385.1325800.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. [SP 385.1325800.2018 *Zashhita zdaniy i sooruzhenij ot progressirujushhego obrusheniya. Pravila proektirovaniya. Osnovnye polozhenija*. (In Russ.)].

9. СП 20.13330.2016 Свод правил. Нагрузки и воздействия. [SP 20.13330.2016 *Svod pravil. Nagruzki i vozdeystviya*. (In Russ.)].

10. ГОСТ 27751-2014. Межгосударственный стандарт. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. [GOST 27751-2014. *Mezhgosudarstvennyj standart. Nadezhnost' stroitel'nyh konstrukcij i osnovanij. Osnovnye polozheniya*. (In Russ.)].

УДК 691.535  
ГРНТИ 67.09.33

*Тертычный Андрей Андреевич*  
*научный сотрудник кафедры*  
*Архитектуры зданий и сооружений*  
*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*  
*Шинкевич Елена Святославовна*  
*доктор технических наук, профессор*  
*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*  
*Мироненко Игорь Николаевич*  
*кандидат технических наук, доцент*  
*Одесский национальный морской университет*

## СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ АКТИВИРОВАННЫХ И НЕАКТИВИРОВАННЫХ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ СМЕСЕЙ И БЕТОНОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*Tertychny A.A.*  
*Assistant department of architecture of buildings and structures*  
*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*  
*Shynkevych E.S.*  
*doctor of technical sciences, professor*  
*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*  
*Mironenko I.N.*  
*candidate of technical sciences, docent*  
*Odessa National Maritime University*

**Аннотация.** На основе выполненных в работе исследований проведен сравнительный анализ изменения свойств смесей и мелкозернистых бетонов на их основе в зависимости от разной удельной поверхности тонкодисперсных наполнителей: трепела или песка; от содержания микронаполнителей: высокоактивного метаксаолина, волластонита и водоредуцирующих добавок-суперпластификаторов С-3 или Melflux. Смесей готовились при разных технологических параметрах. Первые смеси готовились в скоростных смесителях, вторые готовились в традиционных смесителях. Проведенные исследования

показывают широкие возможности модификации составов органоминеральными экологически безвредными добавками и свидетельствуют о рациональности разработок комплексных полифункциональных модификаторов отдельно для активированных и не активированных мелкозернистых бетонов. Показано, что при переходе на другой вид наполнителя, даже такого же химического состава, оптимальные дозировки всех компонентов и их соотношение необходимо корректировать. При переходе на другой вид приготовления смесей соотношение компонентов также изменяется. Практические результаты, полученные авторами, обеспечивают как повышенные по сравнению с нормированными, так и высокие дополнительные показатели качества. Проанализировано влияние типа, состава и дисперсности наполнителей на свойства строительных смесей с учётом технологических условий их приготовления и растворов на их основе.

**Abstract.** Based on the investigations that have been made, we have done a comparative analysis of changing properties of mixtures and fine concrete based on it depending from different specific surface of finely dispersed fillers: tripoli or sand; from the content of micro-fillers: highly active metakaolin, wollastonite and water-reducing additives-superplasticizers S-3 or Melflux. Mixtures have been prepared with different technological parameters. The first mixtures have been done using high-speed mixers, in the second mixtures traditional mixers have been used. The carried out researches show wide possibilities of modification of compositions by organomineral ecologically harmless additives and testify to rationality of development of complex additives separately for the activated and not activated finegrained solutions. It is shown that when switching to another type of filler, even the same chemical composition, the dosages of all components and their ratio should be adjusted optimally. When switching to another type of mixture preparation, the ratio of components also changes. Practical results obtained by the author provide the required and additional quality indicators, increase the physical and mechanical properties of finegrained solutions, increase productivity. The influence of type, structure and dispersion of fillers on the properties of building mixtures is analyzed taking into account technological conditions of their preparation and solutions based on that.

*Ключевые слова:* микро- и макронаполнители, полифункциональный модификатор, метакаолин, волластонит, математические модели, оптимизация.

*Keywords:* macro and micro fillers, multifunctional modifier, metakaolin, wollastonite, activation, mathematical models, optimization.

**Постановка общей проблемы и ее связь с важными научными и практическими задачами.** Современное строительство требует применения новых эффективных материалов, среди которых важное место занимают высококачественные мелкозернистые растворы на высокоподвижных смесях. Важным нововведением в технологии высокоподвижных смесей и растворов является применение высокоскоростных смесителей-активаторов. Активация обеспечивает высокую стойкость к трещинообразованию и высокую адгезию к различным основам, а на пористых наполнителях – еще и высокие теплозащитные и акустические свойства.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Получение мелкозернистых смесей высокой однородности, жизнестойкости и прочности невозможно без использования полифункциональных модификаторов (ПФМ). Наиболее эффективными ПФМ являются комплексы на основе суперпластификаторов и высокодисперсных минеральных добавок в виде разновидностей микрокремнезема. Однако препятствием к широкому применению таких комплексов в Украине является их высокая стоимость. Конкурентоспособной минеральной добавкой, как показано в работах Дворкина Л. И. [1], является высокоактивный метакаолин, представленный в виде дисперсного порошка в результате обжига обогащенных метакаолиновых глин. Различные кремнеземсодержащие активные микро- и макронаполнители с различными величинами площади удельной поверхности,

структурой и полиминеральным составом по-разному влияют на реологию смесей, процессы структурообразования и твердения растворов. [8, 9, 10]. В то же время вопросы совместного действия этих добавок и приоритетность их влияния на свойства изучены недостаточно.

**Цель исследования.** Разработка составов высокоподвижных смесей, модифицированных разными по происхождению и строению кремнеземистыми добавками микро- и макронаполнителями, анализ влияния технологических параметров приготовления смесей и получение на их основе растворов полифункционального назначения с высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- проанализировать по экспериментально-статистическим (ЭС) моделям закономерности влияния кремнеземсодержащих макро- и микронаполнителей различной природы, структуры, дисперсности и суперпластификаторов на свойства активированных и неактивированных растворов, приготовленных двумя разными способами.

- разработать оптимальные составы для оштукатуривания, монтажа, кладки и устройства элементов полов с улучшенными свойствами с учетом технологий их приготовления.

Для изготовления мелкозернистых смесей и растворов были использованы следующие материалы: портландцемент марки ПЦ I-500-D0;

песок карьерный Вознесенский з  $M_k=1,25$ ; в качестве водоредуцирующей добавки использована добавка СП (С-3); минеральный макронаполнитель - тонкомолотый трепел, размолотый до заданной удельной поверхности ( $S_{y0}$ ) - 300, 450 и 600 м<sup>2</sup>/кг; минеральный макронаполнитель для сравнения с аморфным трепелом - молотый кварцевый песок, также размолотый до  $S_{y0}$  - 300, 450 и 600 м<sup>2</sup>/кг; в качестве добавки, которая снижает процессы усадки повышает трещино- и деформационную стойкость использовался волластонит (ВЛ) МВ-05-96; с целью уплотнения структуры использовалась

тонкодисперсная минеральная добавка высокоактивный метакаолин (ВМК).

Методологической основой исследований является математическая теория планирования экспериментов. Математическая теория планирования экспериментов позволяет проводить анализ сложных систем и параметров технологических процессов по ЭС-моделям [11]. В данном исследовании общий вид ЭС-моделей представляет собой математическое уравнение вида:

$$Y = \begin{array}{|c|} \hline A_{11}v_1 + A_{12}v_1v_2 \\ \hline A_{21}v_2 + A_{13}v_1v_3 \\ \hline A_{31}v_3 + A_{23}v_2v_3 \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline D_{14}v_1x_4 + D_{15}v_1x_5 + D_{16}v_1x_6 \\ \hline D_{24}v_2x_4 + D_{25}v_2x_5 + D_{26}v_2x_6 \\ \hline D_{34}v_3x_4 + D_{35}v_3x_5 + D_{36}v_3x_6 \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline b_{44}x_4^2 + b_{45}x_4x_5 \\ \hline b_{55}x_5^2 + b_{46}x_4x_6 \\ \hline b_{66}x_6^2 + b_{56}x_5x_6 \\ \hline \end{array} \quad (1)$$

(a) (b) (c)

ЭС-модели можно использовать для принятия решений только после того, как алгебраический расчёт оценок коэффициентов будет дополнен статистическим анализом, как коэффициентов, так и модели в целом.

Комплексные исследования включали натурные эксперименты с использованием планируемых многофакторных экспериментов для получения экспериментально-статистических моделей. Построение и анализ ЭС-моделей, подбор оптимальных составов выполнялись с применением диалоговой системы COMPEX, специально синтезированных планов [11] и стандартных программ Microsoft Office.

**Анализ результатов экспериментальных исследований.** Рассчитаны и проанализированы ЭС-модели, которые описывают влияние кремнеземсодержащих добавок и наполнителей на свойства.

Реологические и физико-механические свойства высококачественных растворов зависят как от вида и содержания минеральных добавок – наполнителей, так и от состава и количества органических добавок. Важным фактором

являются технологические параметры приготовления смесей [2–7].

Для достижения улучшенных свойств смесей и растворов рассматривались разные технологические параметры их приготовления. В первом и втором экспериментах смеси готовились традиционным способом: подвижные неактивированные смеси с тонкомолотым плотным наполнителем в виде кварцевого песка (НАС/П) и лёгким в виде трепела (НАС/Т) с В/Ц=0,5. В третьем и четвертом экспериментах готовились высокоподвижные активированные смеси аналогичных составов с кварцевым песком (АС/П) и с трепелом (АС/Т) в скоростном смесителе с В/Ц=0,7.

На первом этапе исследований проведены оценка и анализ реологических свойств смесей с учетом технологических условий их приготовления. Технологическая эффективность опред. подв. Подвижность смесей, которая зависит от технологических условий приготовления, от состава и В/Ц отношения, изменяется в диапазоне ОК = (6÷16) см для подвижных и ОК = (20÷30) см для высокоподвижных смесей (рис. 1).



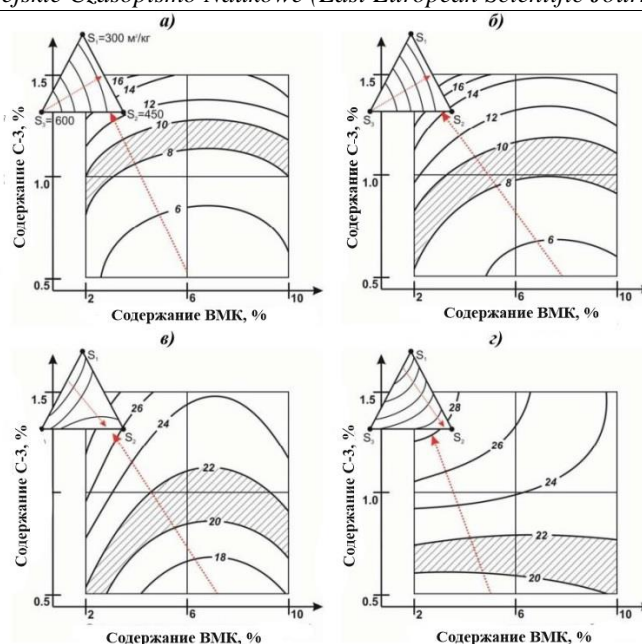


Рис. 1. Влияние содержания наполнителя ВМК и пластификатора С-3 на подвижность неактивированных смесей с тонкомолотым песком (а) и трепелом (б) и активированных с тонкомолотым песком (в) и трепелом (г)

Плотность смесей изменяется в пределах 40 % (рис. 2)

Показатель раслаиваемости по нормам ДСТУ не должен превышать 5%. Не активированные смеси (НАС) – не раслаиваемы. Для активированных смесей при содержании С-3 < 1 % и при отсутствии ВЛ показатель раслаиваемости превышает норму, что опосредованно может свидетельствовать о недостаточной в данном

случае пластификации смеси. Повышенное содержание С-3 до 1,0÷1,5 % способствует нормализации раслаиваемости независимо от содержания ВЛ и ВМК и может быть связано с высокоразвитой структурой порового пространства применяемых наполнителей. В данном случае ВЛ и ВМК в оптимальном количестве выполняют роль стабилизаторов смесей.

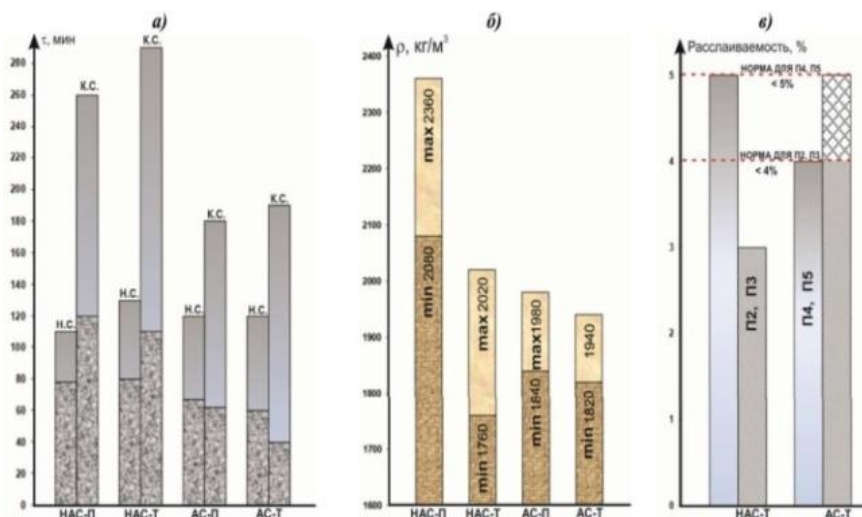


Рис. 2. Изменение абсолютных значений свойств растворных смесей: а) – сроков схватывания; б) – плотности; раслаиваемости – НАС/П и НАС/Т – 1 и 2 неактивированные; АС/П и АС/Т – 3 и 4 активированные

Раствороотделение для активированной смеси, модифицированной трепелом, значение раствоороотделения при норме  $\text{tg } \alpha > 0,25$  изменяется от 0,38 до 0,56. С учетом дисперсности наполнителей раствоороотделения растворной

смеси может быть уменьшен до значений  $\text{tg } \alpha = 0,6 \div 0,7$ .

Сроки схватывания составов корректируются содержанием добавок, наполнителей и условиями приготовления (рис.2). Повышенное содержание суперпластификатора С-3 отодвигает момент начала

схватывания. Однако введение добавки ВЛ (CaSiO<sub>3</sub>) совместно с ВМК приводит к ускорению периода гидратации цементных минералов [3]. Начало сроков схватывания находится в пределах 50±180 мин., а промежуток времени между началом и концом схватывания (период пригодности, или время жизнестойкости) составляет 120–270 мин. в зависимости от вида тонкомолотых наполнителей, подвижности и условий приготовления смесей. Неактивированные смеси с трепелом схватываются несколько медленнее, чем с кварцевым песком, что может быть связано, особенно в начальный момент времени, с увеличением содержания кремниевой кислоты и снижением рН.

Прочность на сжатие определялась на стандартных образцах-балочках. Совместное применение ВЛ и ВМК оказывает положительное влияние на  $R_{см}$ , повышая  $\delta R_{см}$  до 25 %. За счет взаимодействия всех компонентов состава в зависимости от условий приготовления (активированные/неактивированные) диапазон

изменения  $\delta R_{см}$  изменяется: с тонкомолотым трепелом – в 1,54 раза, с тонкомолотым песком – в 2,1 раза.

При выборе оптимальных составов следует учитывать важный вывод о том, что влияние удельной поверхности ( $S_{уд}$ ) макронаполнителей (трепел/песок) до 35 % выше совместного влияния микронаполнителей ВЛ, ВМК и С-3 и что максимальные значения  $R_{см}^{max}$  разных четырех смесей достигаются при различной  $S_{уд}$  песка или трепела.  $R_{см}^{max} = 37; 40; 38; 29$  МПа для четырех исследуемых составов смесей, соответственно. Прочность на растяжение при изгибе. Обращает на себя внимание тот факт, что ВЛ, который выполняет функцию микроармирования аналогично ВМК, синергетически взаимодействуют между собой, в результате диапазон изменения  $R_{изг}$  увеличивается до 2 раз. Превалирующее влияние на  $R_{изг}$  оказывает ВМК+ВЛ [11].

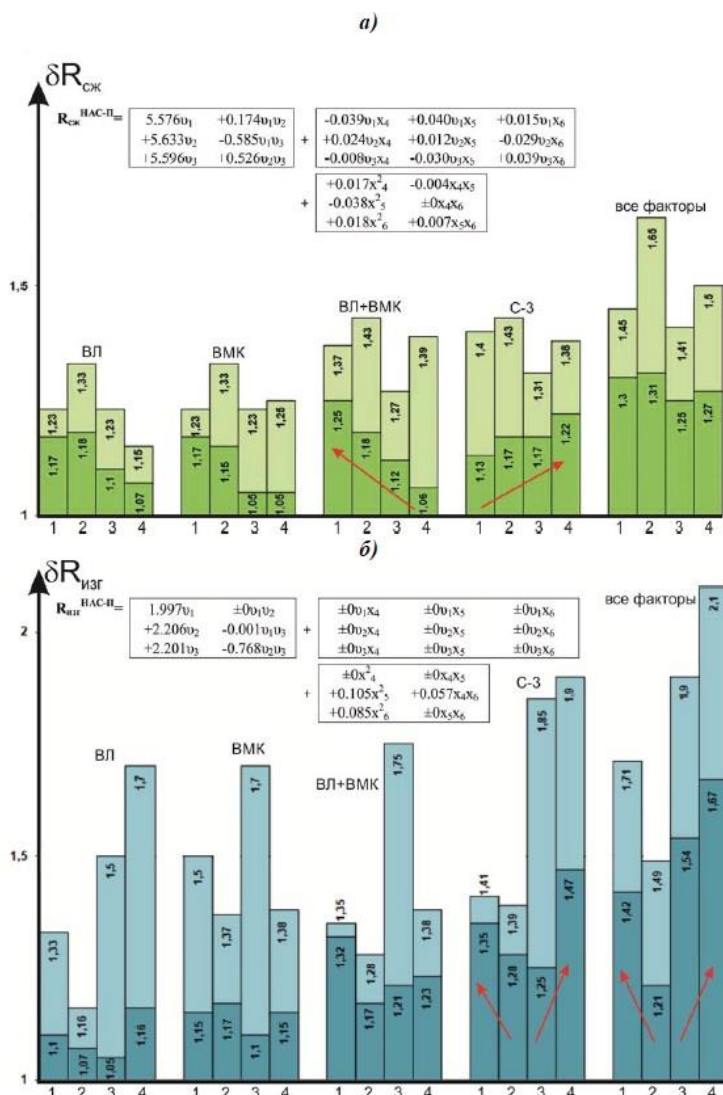


Рис 3. Изменение относительных значений  $\delta R_{сж}$  (а)  $\delta R_{изг}$  (б) под влиянием:

■, ■ - ВЛ и ВМК, С-3 и способа приготовления смесей – 1,2 - НАС (неактивированные смеси по традиционной технологии), 3, 4 – АС (активированные смеси в смесителе-активаторе);  
 -  $S_{уд}$  тонкомолотого песка – 1,3 и трепела – 2,4.

Максимальные и минимальные значения прочностей  $R_{сж}$  и  $R_{изг}$  значительно превышают значения, нормированные ДСТУ для растворов различного вида: элементов полов (стяжек СТ1, СТ2, СТ3–3,5; 4,5; 6,0 МПа, покрытий полов ПО1, ПО2–5,0 МПа, ремонтных составов РМ3  $\geq 5,0$  МПа, для замоналичивания швов  $\geq 7,0$  МПа, для кладки всех видов блоков МР2, МР3  $\geq 7,0$  МПа. В среднем значения  $R_{сж}$  и  $R_{изг}$  различаются более чем в 2,5 раза. Общие тенденции изменения для четырех видов смесей различны. Следует отметить положительный синергетический эффект от влияния как микронаполнителей (ВЛ, ВМК, С-3), так и дисперсности макронаполнителей.

На следующем этапе исследовались дополнительные свойства растворов, которые также являются важными показателями качества.

Трещиностойкость изменяется в 2 раза: от 0,5 до 1 МПа\*м<sup>0,5</sup>. Общие тенденции изменения трещиностойкости активированных и не активированных смесей различны. Максимальные значения трещиностойкости на не активированных смесях достигаются при максимальном содержании ВМК, С-3 и ВЛ.

Повышению трещино- и деформационной стойкости в том числе абразивной способствует микроволластонит CaSiO<sub>3</sub>e (pH=9,5÷10,5). Наблюдается нейтрализация значительного присутствия ВЛ модификациями кварца до pH=7,5–8,5 [12, 13].

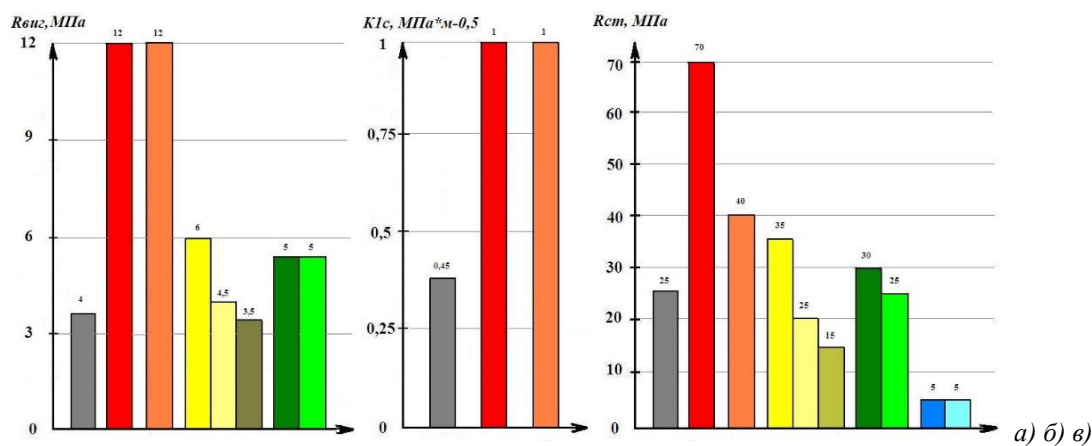


Рис 4. Сравнение полученных и нормируемых критериев качества

■ - контроль; ■ - max Melflux; ■ - max С-3; ■ - СТ3 (норма ДСТУ); ■ - СТ2 (норма ДСТУ); ■ - СТ1 (норма ДСТУ); ■ - ПО2 (норма ДСТУ); ■ - ПО1 (норма ДСТУ); ■ - МР2 (норма ДСТУ); ■ - МР1 (норма ДСТУ)

Водостойкость составов на трепеле выше, чем составов на тонкомолотом песке. Коэффициент размягчения в первом случае  $K_p=0,82 \div 1$ , что связано с образованием вторичных водостойких гидросиликатов кальция в результате взаимодействия аморфного кремнезема с портландцементом. Наибольшее влияние на  $K_p$  оказывает  $S_{уд}$ . Водопоглощение модифицированных бетонов, которое характеризует пористость и проникновение жидкостей и газов, не превышает 3–6 % за счет замены кварцевого молотого песка трепелом с  $S_{уд} = 300$  и  $600 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

Эксперименты по определению микротвердости по Бринеллю (**НВ**) проводились на

образцах из активированных смесей с тонкомолотым трепелом и песком. Шов между стяжкой СТ и покрытием ПО обрабатывался гидрофобным укрепляющей пропиткой. Микротвердость анализировалась в разных зонах стяжки, шва и покрытия (рис. 5 а). Предложена схема формирования контактного слоя между стяжкой и покрытием пола через прокладочный слой с учетом влияния наполнителей разного вида, которые обеспечивают углубленное проникновение праймера для повышения водо-, морозо- и трещиностойкости многослойного пола и кладочных составов.

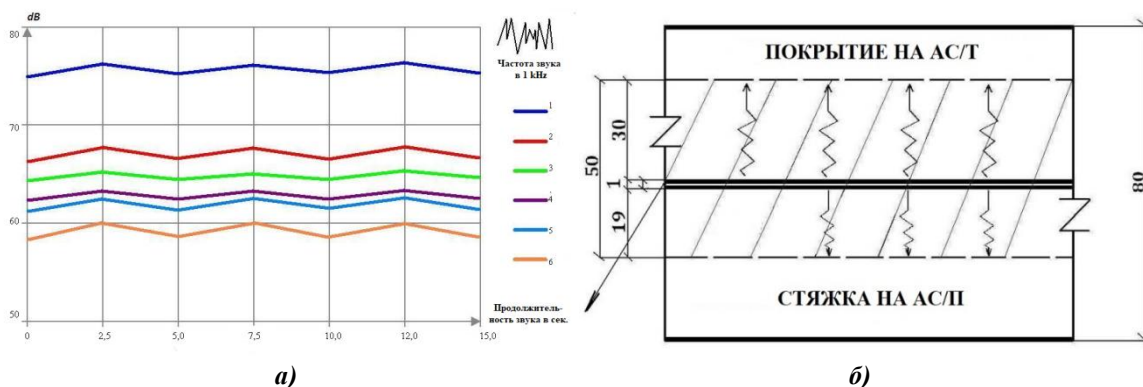


Рис 5. а) - схема проникновения праймера в структуру элементов пола  
б) - индекс звукоизоляции исследованных образцов:

- 1 – чистый, постоянный звук = 75-76 dB; 2 – брусок древесины = 67-68 dB;  
3 – эталонный образец = 64-65 dB; 4 – состав с активированным песком = 62-63 dB;  
5 – состав с неактивированным трепелом = 60dB; состав с активированным трепелом = 58dB.

На рис. 5 а) показано, что применяемый праймер значительно укрепляет стык, при этом ширина контактного слоя образцов с трепелом в 1,4 раза больше, чем образцов с кварцевым песком.

Эффективность звукоизоляции ( $R_w$ ) определялась на образцах изготовленных на активированных и неактивированных составах, которые содержат тонкомолотый трепел или песок, а также, для сравнения – на бруске древесины и эталонном образце. Наилучшим индексом звукоизоляции обладают образцы на активированных смесях с трепелом рис. 4 б), что связано с его суммарной пористостью.

На основании анализа результатов экспериментов и ЭС-моделирования рекомендовано 2 вида полифункциональных модификатора (ПФМ): для внутренних работ ПФМ/Т - с трепелом и для внешних работ ПФМ/ПК - с кварцевым песком. Эти составы по плотности классифицируются как облегченные и плотные, соответственно.

Разработаны и оптимизированы составы ПФМ для СССМ с учётом условий приготовления и эксплуатации в разных условиях. Для работ внутри помещений оптимальными по условиям высокоэффективной эксплуатации и обеспечения комфорта являются растворы ПФМ/Т, область применения которых: элементы многослойных полов – стяжки СТ1, СТ2, покрытия ПО1, ремонт полов РМ3, кладка блоков МР2, МР3 для работ внутри помещений высокоэффективными за основными и дополнительными показателями качества являются растворы с ПФМ/ПК, область применения: омоналичивание и монтаж конструкций МН1, элементы полов: стяжки СТ3, покрытия ПО2.

В соответствии с европейским стандартом EN1504 «Характеристики ремонтных материалов на цементной основе при конструкционном и неконструкционном ремонте» разработанный авторами ремонтный состав класса РМ3 соответствует классу R1.

Область применения состава класса R1 (РМ3): устранение дефектов и лечение трещин в процессе

возведения объектов, косметический ремонт эксплуатируемых бетонных и железобетонных конструкций, текущий ремонт конструкций, которые не требуют обновления их несущей способности. Отличительной особенностью разработанных составов является отсутствие полимеров в них. Отсутствие полимеров повышает экологичность составов, кроме того присутствие полимеров увеличивает коэффициент температурного линейного расширения ремонтного состава в 1,5-5 раз. Присутствие в ремонтных составах полимеров может привести к появлению значительных напряжений в контактной зоне и быть причиной растрескивания, искривления, шелушения ремонтного материала. В связи с этим тепловая совместимость ремонтного состава и основы должна рассматриваться очень внимательно.

**Заключение.** В результате выполненных исследований предложены составы индивидуальных сухих строительных смесей (ССС) и универсальные составы ПФМ для этих ССС [6, 7]. Предложенная условная классификация составов для внутренних работ на трепеле и внешних работ на песке позволяет более чем в 3 раза сократить расход энергоресурсов.

На основе полученных результатов рекомендованы оптимальные составы полифункциональных модификаторов для активированных и не активированных смесей, которые отличаются количественным соотношением компонентов при одинаковом качественном их составе. Предлагаемые составы обеспечивают повышенные по сравнению с ДСТУ показатели качества и условия комфортности для различных элементов конструкций.

### Литература

- Дворкин Л. И. Специальные бетоны / Л.И. Дворкин, А.Л. Дворкин // М: Инфра-Инженерия. - 2012. - 368 с.
- Шинкевич Е.С. Анализ взаимовлияния органоминеральных модификаторов на реологические и эксплуатационные свойства



мелкозернистых бетонов / Е.С. Шинкевич, А.А. Тертычный // Сборник научных трудов «Проблемы современного бетона и железобетона». – Беларусь, Институт «БелНИИС». – 2017. Вып. 9. с. 496-514.

3. Шинкевич Е.С. Экспериментально-статистическая оценка свойств активированных и неактивированных мелкозернистых смесей и бетонов / Е.С. Шинкевич, А.А. Тертычный, С.С. Закаблук, И.Н. Мироненко // Научный вестник ХНУБА. - 2017. - Вып. 4. - с. 92-99.

4. Shynkevych E. S. Assessment of the effectiveness of activation of fine grain mixture sand concretes modified with organic mineral fillers / E.S. Shynkevych, A.A. Tertychny, I.N. Mironenko // Materials of the XIII international scientific and practical conference «Fundamental and applied science». Sheffield, Science and education LTD. - 2017. - pp. 43-45.

[http://www.rusnauka.com/38\\_FPN\\_2017/Stroitelstvo/4\\_230176.doc.htm](http://www.rusnauka.com/38_FPN_2017/Stroitelstvo/4_230176.doc.htm)

5. Shynkevych E. S. Comparative analysis of activated and non-activated fine-grained mixture sand concretes modified with organic mineral fillers / E.S. Shynkevych, A.A. Tertychny, I.N. Mironenko // Материалы международного научно-технического семинара «Моделирование и оптимизация строительных композитов». Одесса, ОГАСА. - 2017. - pp. 86-88.

6. Тертычный А.А. Многокритериальная оптимизация составов мелкозернистых бетонных смесей / А.А. Тертычный, Е.С. Шинкевич // Сборник тезисов международной конференции «Структурообразование, прочность и разрушение композиционных строительных материалов и конструкций». – Одесса, ОГАСА. - 2018. - с.127-130.

7. Shynkevych E. Nanotechnological and energy-saving methods of production of building composites /

E. Shinkevych, Y. Lutskin, A. Tertychny, I. Bondarenko, I. Myronenko // Matec Web of Conferences, Transbud. Vol.116. Kharkiv. - 2017. - pp.10..(Scopus)..[https://www.mateconferences.org/articles/mateconf/abs/2017/30/mateconf\\_tr2017\\_01015/mateconf\\_tr2017\\_01015.html](https://www.mateconferences.org/articles/mateconf/abs/2017/30/mateconf_tr2017_01015/mateconf_tr2017_01015.html)

8. Sanytsky M. Modified composite cements and energetic aspects of wasteutilization / M. Sanytsky, T. Markiv, T. Kropyvnytska, T. Krutic // 3<sup>rd</sup> International Symposium «Non-Tradition Cement and Concrete » Brno. - 2008. — pp. 697-702.

9. Sanytsky M. Research of nanomodified Portland cement compositions with high early age strength / U. Marushchak, M. Sanytsky, T. Mazurak, Yu. Olevych // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. № 6/6. – 2016. - P. 50– 57.

10. Kostyuk T.A. The infusion of fibrous napovnyuvachiv on physical and mechanical power of cement compositions / T.A. Kostyuk, A.I.A. Plugin, A.A. Plugin // Materials of the International Science and Technology Conference “New Technologies, Ownership, Materials in Buddy and Transport”. - Kharkiv: Ukr.DAZT. - 2014. - pp. 52-54.

Вознесенський В.А. ЕС-моделі в комп'ютерному матеріалознавстві // В.А. Вознесенський, Т.В. Ляшенко. – Одеса, Астропрінт, 2006. – 116с.

Beushausen H. Early-age properties, strength development and heat of hydration of concrete containing various South African slags at different replacement ratios / H. Beushausen, M. Alexander, Y. Ballimb // Construction and Building Materials. – 2012. – Vol. 29. – pp.533–540.

Sopov V.P. High-mobility concrete mixes for concrete-filled steel tube structures of complex cross-section | Sopov V.P., Dolgiy V.P., Latorets K.V., Zhuravlov Yu.V. // International Journal of Engineering and Technology, 2018. – No.7 – pp.295-300 (Scopus).

**Яковлева Е.В.**

*кандидат сельскохозяйственных наук, доцент,  
заведующая кафедрой Техносферной безопасности,  
Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина*

**Фролов А.С.**

*аспирант кафедры Техносферной безопасности,  
Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина*

**Кузнецов П.А.**

*аспирант кафедры Техносферной безопасности,  
Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина*

## **АКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОБУЧЕНИЯ РАБОТНИКОВ ПО ОХРАНЕ ТРУДА В УСЛОВИЯХ ПАНДЕМИИ ВИРУСА COVID-19**

**Yakovleva E.V.**

*candidate of agricultural sciences, associate Professor,  
Head of the Department of Technosphere Safety,  
Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin*

**Frolov A.S.**

*postgraduate student of the Department of Technosphere Safety,  
Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin*

**Kuznetsov P. A.**

## ACTUAL METHODS OF TRAINING WORKERS ON LABOR PROTECTION IN THE CONTEXT OF THE COVID-19 VIRUS PANDEMIC

**Summary.** The research article is devoted to the consideration and comparison of current methods of training workers on labor protection in the context of the COVID-19 virus pandemic.

**Аннотация.** Научно-исследовательская статья посвящена рассмотрению и сравнению актуальных методов обучения работников по охране труда в условиях пандемии вируса COVID-19.

*Key words: labor protection, education, agriculture, technosphere safety, first aid, industrial injuries, modern technologies, continuity and continuity of training, covid-19.*

*Ключевые слова: охрана труда, обучение, сельское хозяйство, техносферная безопасность, первая помощь, производственный травматизм, современные технологии, непрерывность и преемственность подготовки, covid-19.*

### **Постановка проблемы.**

В условиях угрозы распространения коронавирусной инфекции большинство образовательных и промышленных организаций по рекомендации Министерства науки и высшего образования РФ приняли решение о переходе на дистанционное обучение.

В связи с этим все очные занятия были перенесены в онлайн-среду.

Преподаватели вынуждены организовывать учебный процесс посредством дистанционных технологий обучения на основе различных способов доставки электронного контента и доступных инструментов коммуникации обучающихся и преподавателей в электронной информационно-образовательной среде (ЭИОС).

### **Анализ последних исследований и публикаций.**

Мировой и российский опыт показывает, что обучение работников и руководителей безопасным приемам работы, требованиям охраны труда, оказанию первой помощи пострадавшим на производстве является эффективным инструментом снижения производственного травматизма и профзаболеваний.

Обучение безопасному выполнению работ сегодня представляет собой ведущий фактор обеспечения должного уровня охраны труда, поскольку основным ресурсом развития современного общества являются люди, способные к поиску и освоению новых знаний и принятию решений в нестандартных ситуациях.

В своей статье Сердюк В.С. и Крысов И.С. «Повышение эффективности обучения охране труда работников и профессиональной переподготовки специалистов по охране труда на основе системы дистанционного обучения и контроля знаний «EduCenter»» отмечают, что действия работников, нарушающих требования охраны труда, снижают эффективность труда, являются причиной аварий и несчастных случаев, профессиональных заболеваний, ведут к дополнительным финансовым затратам предприятия. Таким образом, обучение работников по от имеет не только социальное, но и экономическое значение.

Зиньковская С.М. в своей работе «Системное изучение человеческого фактора в опасных профессиях» писала, что обучающийся играет ведущую роль в формировании мотивации и определении целей обучения [9]. Поэтому изучение мотивационно-потребностной сферы сотрудников по различным направлениям системы управления охраной труда является необходимым условием целеполагания, отбора содержания, выбора форм и средств обучения.

Основные технические этапы, с которых обучающие организации начинают оказывать услуги по дистанционному обучению – это покупка техники и программного обеспечения. Также, как считают Шадрина Е.В., Ильвес Г.Н., Сергеева С.С., важен состав талантливых грамотных преподавателей и кураторов, умеющих использовать современные информационно-коммуникационные технологии, а также создать и удерживать на должном уровне необходимое учебно-методическое обеспечение, считают авторы работы

Для всех поступающих на работу лиц, а также для работников, переводимых на другую работу, работодатель или уполномоченное им лицо обязаны проводить инструктаж по охране труда, организовывать обучение безопасным методам и приемам выполнения работ и оказания первой помощи пострадавшим.

Суть любого обучения это — комплексный набор нескольких взаимосвязанных учебных процессов. Каждый из этих процессов выполняет свою функцию в получении обучающимися знаний и определяет для организатора обучения виды контроля, которые в свою очередь становятся средством углубления и закрепления знаний.

На данный момент по охране труда выделяются два основных вида обучения – это классическое и дистанционное обучение.

### **Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы.**

Экстренный перенос обучения в дистанционный формат в условиях пандемии имеет существенные отличия от правильно спланированного классического обучения и онлайн-обучения на основе массовых открытых



онлайн-курсов. Образовательные организации, вынужденные работать со слушателями дистанционно в целях снижения рисков распространения коронавируса, должны осознавать эту разницу при оценке эффективности так называемого "онлайн-обучения" с применением дистанционных образовательных технологий (ДОТ).

**Цель статьи.**

Целью научно-исследовательской статьи является выявление более эффективного и безопасного метода обучения работников по охране труда в условиях пандемии вируса COVID-19. Задачей является рассмотрение и сравнение между собой актуальных методов обучения работников по охране труда.

**Изложение основного материала.**

**Классическое обучение по охране труда**

Классическое обучение по охране труда является базовым и фундаментальным элементом

системы контроля и обучения работников вопросам охраны труда и безопасным методам, и приемам выполнения работ [2].

Лекции занимают одно из ведущих мест в учебном процессе при подготовке руководителей и специалистов, в т. ч. и по охране труда. Лекционные занятия, где слушатели изучают основополагающий учебный материал, излагаемый в развернутой, систематической, логически стройной и последовательной форме, проводятся по большинству вопросов примерной программы обучения [4].

По ряду вопросов, например, оказание первой помощи, практические занятия являются ведущей организационной формой обучения. Большие возможности совершенствования подготовки специалистов открывает характерный для практических занятий непосредственный контакт преподавателя и слушателей.



Рисунок 1. Классические форматы обучения по охране труда

Несмотря на активное развитие технологий в обучении, до сих пор многими людьми очный формат обучения воспринимается только на уровне аудитории и стоящего перед ней лектора, ведущего монолог. Но не стоит забывать о том, что в соответствии со статьей 2 Федерального Закона №273 «Об образовании в Российской Федерации» обучение – это целенаправленный процесс организации деятельности обучающихся по овладению не только знаниями, но и умениями и навыками. Очевидно, что посредством только прослушивания лекции приобрести умения и навыки невозможно, соответственно неотъемлемым элементом любого очного обучения должен быть практический блок [1].

Элементы практики внедряются в очное обучение различными методами. Часто используются рабочие тетради, практические задачи, ролевые игры, тренажеры, наглядные пособия и так далее. Практика позволяет не только достичь целей обучения, но и сделать семинар более интересным, слушателей – более вовлеченными, а результат – более эффективным [5].

Квест или иными словами игра «по станциям» – это наиболее активный вариант проведения очного обучения. Игровой формат подразумевает определенную развлекательную составляющую, но основой квеста в любом случае всегда являются

вопросы охраны труда. Так, например, в рамках квеста по охране труда участники отрабатывают навыки:

- идентификации опасностей и проведения измерений вредных факторов с использованием реальных средств измерений;
- тушения возгораний;
- оказания первой помощи пострадавшему (своему товарищу по команде или с использованием робота-тренажера);
- подбора средств индивидуальной защиты работнику с учетом условий и характера выполняемых работ;
- проведения поведенческих аудитов безопасности и так далее.

Коммуникационная игра – это наиболее интересный с точки зрения обучающихся вариант проведения очного обучения с самым высоким уровнем вовлеченности. Так же, как и квест, коммуникационная игра – это, прежде всего, мероприятие, направленное на развитие осознанности в вопросах безопасности, и только потом – развлечение [7].

Коммуникационные игры могут иметь различные сценарии. Наибольшей популярностью пользуются мероприятия, направленные на совместное решение участниками какой-либо общей задачи – например, построить из картона, бумаги, скотча и других канцелярских

принадлежностей какой-либо производственный объект, соблюдая при этом требования охраны труда и промышленной безопасности.

Главную роль в классическом обучении играют инструктажи по ОТ, так как, именно, от качества проведенного инструктажа зависит жизнь и здоровье работника.

Проведение инструктажей по охране труда включает: ознакомление работников с имеющимися опасными или вредными производственными факторами; изучение требований охраны труда, содержащихся в локальных нормативных актах организации, инструкциях по охране труда, технической, эксплуатационной документации; применение безопасных методов и приемов выполнения работ [6].

Специфика охраны труда и проведения инструктажей работников зависит от вида деятельности организации, наличия различных вредных и опасных факторов, воздействующих на работников и оказывающих влияние на организацию охраны труда и регулируется целевыми нормативными правовыми актами [9].

При работе с персоналом учитываются особенности рабочего места, сложность и значение оборудования, которое обслуживается, а также квалификация и должностные обязанности самих работников. Наряду с перечнями основных вопросов инструктажа на рабочем месте определены: форма журнала регистрации вводного инструктажа, форма протокола проверки знаний по нормам, правилам и инструкции по радиационной безопасности, форма протокола проверки знаний по охране труда, форма журнала регистрации инструктажей на рабочем месте, форма квалификационного удостоверения и др.

#### **Дистанционное обучение по охране труда**

В настоящее время дистанционное обучение (далее - ДО) занимает все большую роль в модернизации российского образования. Говоря о необходимости повышения заинтересованности как работодателей, так и работников, всего

персонала организации к вопросам обучения по охране труда, следует отметить, что для этого требуется активнее внедрять в практику образовательных услуг в области охраны труда дистанционные формы обучения, позволяющие успешно осваивать учебные программы вне зависимости от места нахождения слушателя, его занятости и положения в организации [4].

ДО - это обучение на расстоянии, когда преподаватель и обучаемый разделены пространственно и когда все или большая часть учебных процедур осуществляются с использованием современных информационных и телекоммуникационных технологий.

ДО через Интернет - это обучение, при котором предоставление обучаемым существенной части учебного материала и большая часть взаимодействия с преподавателем осуществляются с использованием технических, программных и административных средств глобальной сети Интернет [7].

Отличительной особенностью ДО является предоставление обучаемым возможности самим получать требуемые знания, пользуясь развитыми информационными ресурсами, предоставляемыми современными информационными технологиями. Информационные ресурсы: базы данных и знаний, компьютерные, в том числе мультимедиа, обучающие и контролирующие системы, онлайн-трансляции лекций, участие в вебинарах, видео - и аудиозаписи, электронные библиотеки - вместе с традиционными учебниками и методическими пособиями создают уникальную распределенную среду обучения, доступную широкой аудитории.

В нашей стране ДО постепенно и успешно дополняет классические форматы обучения. Модифицированные форматы обучения по охране труда сегодня рассматриваются как самое современное средство повышения эффективности и безопасности работ, имея под собой законодательную основу и право быть использованным образовательным учреждением при организации учебного процесса [11].

Таблица 1.

**Модифицированные форматы дистанционного обучения по охране труда**

Классические форматы обучения	Модифицированные форматы дистанционного обучения
Лекция	Предоставление электронных учебных материалов, включающих: - внутреннюю навигацию по разделам курса, в том числе развернутые гиперссылки; - внешнюю навигацию по интернет-источникам, содержащим информацию по курсу; - глоссарий; - анимационные модели; - 3D-модели. - Видеолекция; - Вебинар.
Семинар	Дистанционный семинар – обсуждение на форуме в режиме офлайн.
Практическое занятие	Электронные практикумы, тренажеры, атласы и др.
Самостоятельная работа	Обмен работами в электронной системе управления обучением, позволяющей организовать оперативную проверку и отправку присланной работы слушателю на доработку.

Текущий и итоговый контроль	Удаленное тестирование; Опрос по видеоконференцсвязи.
Консультации	Возможны в режимах офлайн и онлайн

Что касается преимуществ дистанционного обучения в целом по сравнению с другими формами и методами обучения, то здесь, прежде всего, можно назвать следующие:

- возможность обучения без отрыва от работы, снижение издержек работодателя;
- интерактивность и ориентированность на практику;
- удобный режим: обучение в любое время и в любом месте;
- возможность доступа к базам данных действующих нормативных правовых актов, формам документов, методическим анимационным разработкам;
- постоянное взаимодействие преподавателя и обучаемого с помощью современных информационных средств;
- участие в видеоконференциях с представителями Минздравсоцразвития России, контрольно-надзорных органов, Фонда социального страхования, ведущими экспертами в области охраны труда.

При организации дистанционного обучения необходимо учитывать тот факт, что каждый обучающийся обладает индивидуальными особенностями в части восприятия учебно-методических материалов – одни предпочитают изучать текстовую информацию, а другим необходимо аудиовизуальное сопровождение [12].

Согласно исследованиям АО «Клинский институт охраны и условий труда», проведенным на основании статистики учета действий пользователей в системе дистанционного обучения (выборка порядка 15 000 человек), 63,47 % пользователей потратили в два раза больше времени на просмотр видеолекций и презентаций, чем на изучение текстовых материалов. Это свидетельствует о том, что качественное дистанционное обучение невозможно без максимального охвата формата подачи учебных материалов – начиная от текстов и заканчивая видеороликами, в том числе в формате 3D и VR.

В настоящее время огромную популярность приобретают story-курсы, которые представляют собой, как правило, сюжетную презентацию с элементами игры, либо сюжетный видеоролик или видеоролик в формате интервью. Story-курсы построены таким образом, что у обучающихся возникает желание во что бы то ни стало пройти обучение от начала и до конца. Качественно сделанные story-курсы позволяют не только донести информацию до человека, но и мотивировать его на выполнение тех или иных действий, либо наоборот удерживают от совершения неверных поступков. С точки зрения обучения в области охраны труда такая функция story-курсов является крайне востребованной [3].

Зачастую дистанционное обучение воспринимается работодателями как формальное, то есть не как процесс, направленный на получение знаний, а как процесс мероприятия, целью которого является получение удостоверений без проведения обучения как такового.

При этом в соответствии со статьей 16 Федерального закона от 29.12.2012 № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации», обучение с использованием дистанционных образовательных технологий является нормативно закрепленной формой получения образования по различным направлениям подготовки за исключением случаев, прямо предусмотренных законодательством [1].

Так, приказом Минобрнауки от 20.01.2014 № 22 утверждены Перечни профессий и специальностей среднего профессионального образования, реализация образовательных программ по которым не допускается с применением исключительно электронного обучения, дистанционных образовательных технологий. Что касается обучения работников в области охраны труда, действующим законодательством не предусмотрено наличие каких-либо ограничений, связанных с применением дистанционных образовательных технологий.

Качественный электронный курс для обучения по охране труда – это результат работы большой группы специалистов.

В число этих специалистов входят люди совершенно разных профессий:

- специалисты информационного отдела, занимающиеся подборкой актуальной нормативной правовой базы;
- операторы, осуществляющие видеосъемку лекций;
- IT-специалисты, осуществляющие разработку, техническую поддержку и обновление системы дистанционного обучения;
- методисты, подбирающие и структурирующие лекционный материал;
- дизайнеры, представляющие учебно-методические материалы в наглядном и легком для понимания виде.

Разработка электронного курса не заканчивается на этапе его запуска. Самый большой массив работы заключается в его постоянной актуализации. Так, например, в период с 2015 по 2017 гг. только в сфере оценки условий труда было принято порядка 45 документов. За последние 5 лет Минтрудом России введено в действие 18 новых правил по охране труда для различных видов экономической деятельности. В целом, ежегодно в сфере охраны труда принимается более новых 80 документов, многие действующие нормативные правовые акты актуализируются с учетом современных реалий.

Соответственно актуализация электронного курса – это постоянный и дорогостоящий процесс, обуславливающий его стоимость, сопоставимую со стоимостью очного обучения [10].

### Сравнение методов и средств обучения по охране труда

Проводя анализ методов и средств обучения по охране труда, а именно сравнивая между собой

классическое, дистанционное, необходимо делать это в одинаковых и равных условиях для всех форм обучения [13].

Для данного исследования была разработана таблица критериев, с помощью которой можно сравнить формы обучения по охране труда.

Таблица 2.

Таблица критериев сравнения видов обучения по ОТ

Критерий сравнения	Виды обучения	
	Классическое обучение	Дистанционное обучение
Доступность информации	+	+
Актуальность информации	-	+
Модульность	-	+
Массовость	-	+
Разнообразие получаемой информации	-	+
Обучение независимо от времени и местонахождения	-	+
Самостоятельная проверка знаний	-	-
Контроль обучения	+	-
Обратная связь	+	-

Основными критериями сравнения выделены:

- Доступность информации – критерий, означающий, что получение и работа с информацией ничем не ограничена;
- Актуальность информации – критерий, означающий, что информация отвечает современным нормативно правовым документам;
- Модульность - каждая отдельная тема или ряд тем, которые освоены слушателем, создают целостное представление об определенной предметной области;
- Массовость – количество обучаемых может быть неограниченным;
- Разнообразие получаемой информации – критерий, означающий, что получаемая слушателями информация может быть представлена в разных форматах (видео, VR);
- Обучение независимо от времени и местонахождения – критерий, означающий, что слушатель может проходить обучение не только на рабочем месте или в учебном классе, но и в любом удобном для него месте;

• Самостоятельная проверка знаний – критерий, означающий, что обучаемый может самостоятельно проверить собственные знания, независимо от оценки и уровня подготовки;

• Контроль обучения – критерий, позволяющий специалисту по ОТ оценить качество проведенного обучения у работников;

• Обратная связь – критерий, означающий, что в процессе обучения работник может обратиться к специалисту, проводящему обучение, с любым тематическим вопросом [6].

Данная таблица наглядно демонстрирует плюсы и минусы каждой формы обучения. Благодаря этому можно сравнить каждый критерий между собой для каждого обучения.

### Выводы и предложения.

Проведя анализ форм обучения при помощи таблицы критериев видно, что Дистанционная форма обучения (рис. 2) по охране труда набрала 6 плюсов по таблице критериев, а классическое обучение 3.



Рисунок 2. Сравнение форм обучения ОТ по таблице критериев

Сравнивая между собой формы обучения по охране труда по таблице критериев, можно с уверенностью сказать, что обучение работников охране труда при помощи дистанционного обучения является наиболее эффективным и предпочтительным, особенно это актуально в условиях пандемии вируса COVID-19, по сравнению с классической формой обучения.

#### Список использованной литературы:

1. Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации» от 29.12.2012 N 273-ФЗ;
2. Барабанова С.Н. «О совершенствовании законодательной и нормативной базы в вопросах связанных с обучением охране труда», Орел, 2011. С. 164-167.
3. Васягина Н.Н. «Обучение взрослых: опыт и перспективы», Екатеринбург, 2012;
4. Габова О.В., Русаков А.А. Тестирование — одна из форм диагностики и проверки успешности обучения // Педагогическая информатика. — 2005. — № 3. — С. 13–17.;
5. Долгов Д.И. «Обучение и организация службы охраны труда на промышленном предприятии и ее влияние на конкурентоспособность продукции», Арктика: общество и экономика. 2012. № 7 (7). С. 107-112.
6. Елин А.М., Анохин А.В. «Современные принципы и подходы к обучению охране труда персонала организаций», Охрана и экономика труда. 2017. № 1 (26). С. 88-98;
7. Зиньковская С.М. «Системное изучение человеческого фактора в опасных профессиях». // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора психологических наук. Москва, 2007 – 328с.;
8. Ильин С.М. «Становление компетентностного подхода к государственным требованиям в области обучения специалистов

охране труда», Охрана и экономика труда. 2012. № 2 (7). С. 48-50;

9. Рудик Г.А. Прогнозирование и проектирование профессионально-технического образования в условиях перехода к рыночной экономике: Дис. . д-ра пед. наук в форме науч. докл. / Г.А. Рудик. Кишинев, 1994. – 58 с.;

10. Сердюк В.С., Крысов И.С. «Повышение эффективности обучения охране труда работников и профессиональной переподготовки специалистов по охране труда на основе системы дистанционного обучения и контроля знаний «educenter»»; ФГБОУ ВПО "Омский государственный технический университет", 2013;

11. Турченко В.Н. «О дистанционном обучении вопросам охраны труда», Охрана и экономика труда. 2011. № 1. С. 55-57.;

12. Файнбург Г.З., Потемкин В.И. Пошаговый контроль. О проверке качества основных видов обучения по охране труда // Журнал «Безопасность и охрана труда» № 1 (54), Нижний Новгород, 2013. – 52 с.;

13. Фролов А.С., Яковлева Е.В. Производственный травматизм в строительной отрасли орловской области // Сетевой научный журнал Орел ГАУ. №2(7) декабрь 2016. Стр. 143-147.

14. Шадрин Е.В., Ильвес Г.Н., Сергеева С.С. Об опыте внедрения дистанционной формы обучения по охране труда. УрМФ ФГБУ «ВНИИ охраны и экономики труда» Минтруда России, Екатеринбург, Россия;

15. Щенников Н.И., Курагина Т.И., Пачурин Г.В. Охрана труда на предприятиях Нижегородской области и совершенствование работы по профилактике травматизма // Сборник статей VI Международной научно-практической конференции. – Пенза, 2006. – С. 200-203.

#11(63), 2020 część 3

**Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe**  
(Ukraina, Kijów)

**Czasopismo jest zarejestrowane i publikowane w Polsce.** W czasopiśmie publikowane są artykuły ze wszystkich dziedzin naukowych. Czasopismo publikowane jest w języku polskim, angielskim, niemieckim i rosyjskim.

Artykuły przyjmowane są do dnia 30 każdego miesiąca.

Częstotliwość: 12 wydań rocznie.

Format - A4, kolorowy druk

Wszystkie artykuły są recenzowane

Każdy autor otrzymuje jeden bezpłatny egzemplarz czasopisma.

Bezpłatny dostęp do wersji elektronicznej czasopisma.

**Zespół redakcyjny**

**Redaktor naczelny - Adam Barczuk**

**Mikołaj Wiśniewski**

**Szymon Andrzejewski**

**Dominik Makowski**

**Paweł Lewandowski**

**Rada naukowa**

**Adam Nowicki (Uniwersytet Warszawski)**

**Michał Adamczyk (Instytut Stosunków Międzynarodowych)**

**Peter Cohan (Princeton University)**

**Mateusz Jabłoński (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**

**Piotr Michalak (Uniwersytet Warszawski)**

**Jerzy Czarnecki (Uniwersytet Jagielloński)**

**Kolub Frennen (University of Tübingen)**

**Bartosz Wysocki (Instytut Stosunków Międzynarodowych)**

**Patrick O'Connell (Paris IV Sorbonne)**

**Maciej Kaczmarczyk (Uniwersytet Warszawski)**

#11(63), 2020 part 3

**East European Scientific Journal**  
(Ukraine, Kiev)

**The journal is registered and published in Poland.** The journal is registered and published in Poland. Articles in all spheres of sciences are published in the journal. Journal is published in **English, German, Polish and Russian.**

Articles are accepted till the 30th day of each month.

Periodicity: 12 issues per year.

Format - A4, color printing

All articles are reviewed

Each author receives one free printed copy of the journal

Free access to the electronic version of journal

**Editorial**

**Editor in chief - Adam Barczuk**

**Mikołaj Wiśniewski**

**Szymon Andrzejewski**

**Dominik Makowski**

**Paweł Lewandowski**

**The scientific council**

**Adam Nowicki (Uniwersytet Warszawski)**

**Michał Adamczyk (Instytut Stosunków Międzynarodowych)**

**Peter Cohan (Princeton University)**

**Mateusz Jabłoński (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**

**Piotr Michalak (Uniwersytet Warszawski)**

**Jerzy Czarnecki (Uniwersytet Jagielloński)**

**Kolub Frennen (University of Tübingen)**

**Bartosz Wysocki (Instytut Stosunków Międzynarodowych)**

**Patrick O'Connell (Paris IV Sorbonne)**

**Maciej Kaczmarczyk (Uniwersytet Warszawski)**



**Dawid Kowalik (Politechnika  
Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**

**Peter Clarkwood(University College  
London)**

**Igor Dziedzic (Polska Akademia  
Nauk)**

**Alexander Klimek (Polska Akademia  
Nauk)**

**Alexander Rogowski (Uniwersytet  
Jagielloński)**

**Kehan Schreiner(Hebrew University)**

**Bartosz Mazurkiewicz (Politechnika  
Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**

**Anthony Maverick(Bar-Ilan  
University)**

**Mikołaj Żukowski (Uniwersytet  
Warszawski)**

**Mateusz Marszałek (Uniwersytet  
Jagielloński)**

**Szymon Matysiak (Polska Akademia  
Nauk)**

**Michał Niewiadomski (Instytut  
Stosunków Międzynarodowych)**

**Redaktor naczelny - Adam Barczuk**

**1000 kopii.**

**Wydrukowano w Ukraina, Kijów,  
Pobedy Avenu, 56/1, Biuro 115**

**Sp. z o.o."Grupa Konsultingowa  
"Образование и наука"**

**Ukraina, Kijów, Pobedy Avenu, 56/1,  
Biuro 115**

**E-mail: info@eesa-journal.com,**

**<http://eesa-journal.com/>**

**Reprezentacja czasopisma naukowego  
w krajach afrykańskich.**

**Republika Angoli.**

**ADAMSMAT\_SU\_LDA,**

**Sede: Rio Longa\_ prédio Z11 Quarteirão Z,  
N\*23, Município: BELAS, província: LUANDA**

**E\_mail: Adamsmat@mail.ru**

**Contribuinte n\* 5417331007**

**Tel:+244-929527658**

**Dawid Kowalik (Politechnika  
Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**

**Peter Clarkwood(University College  
London)**

**Igor Dziedzic (Polska Akademia  
Nauk)**

**Alexander Klimek (Polska Akademia  
Nauk)**

**Alexander Rogowski (Uniwersytet  
Jagielloński)**

**Kehan Schreiner(Hebrew University)**

**Bartosz Mazurkiewicz (Politechnika  
Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**

**Anthony Maverick(Bar-Ilan  
University)**

**Mikołaj Żukowski (Uniwersytet  
Warszawski)**

**Mateusz Marszałek (Uniwersytet  
Jagielloński)**

**Szymon Matysiak (Polska Akademia  
Nauk)**

**Michał Niewiadomski (Instytut  
Stosunków Międzynarodowych)**

**Editor in chief - Adam Barczuk**

**1000 copies.**

**Printed in the Ukraine, Kiev, Pobedy  
Avenue, 56/1, office 115**

**LLC "Consulting group  
"Образование и наука"**

**Ukraine, Kiev, Pobedy Avenue, 56/1,  
office 115**

**E-mail: info@eesa-journal.com,**

**<http://eesa-journal.com/>**

**Representation of a scientific journal in  
African countries:**

**Republic of Angola**

**ADAMSMAT\_SU\_LDA,**

**Sede: Rio Longa\_ prédio Z11 Quarteirão Z,  
N\*23, Município: BELAS, província: LUANDA**

**E\_mail: Adamsmat@mail.ru**

**Contribuinte n\* 5417331007**

**Tel:+244-929527658**