

НАУКА и ТЕХНИКА

Международный
научно-технический журнал

Издается с января 2002 года
Периодичность издания –
один раз в два месяца

Учредитель
Белорусский
национальный технический
университет



Science and Technique

International
Scientific and Technical Journal

Published from January 2002
Publication frequency –
bimonthly

Founder
Belarusian
National Technical
University

Vol. 24 / No 4 / 2025

Журнал включен в базы данных:
Web of Science (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE,
Google Scholar, РИНЦ, ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

The Journal is included in the following databases:
Web of Science (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE,
Google Scholar, RISC, Lan, CyberLeninka, Socionet

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение и машиноведение

- Devoino O. G., Gorbunov A. V., Shpackevitch D. A.,
Lapkovsky A. S., Gorbunova V. A., Koval V. A.,
Kovaleva S. A.**
On Energy Efficiency Characteristics
of Laser Erosion on Oxidic Surfaces of Carbon Steels,
Cast Iron and Low-alloy Non-ferrous Alloys
During Deoxidizing Cleaning. Part II
(Девоино О. Г., Горбунов А. В.,
Шпакевич Д. А., Лапковский А. С.,
Горбунова В. А., Коваль В. А., Ковалева С. А.)
О характеристиках энергоэффективности лазерной
эрозии при очистке от оксидов поверхностей
углеродистых сталей, чугуна и низколегированных
сплавов металлов. Часть 2) 261
- Анисович А. Г., Филатова И. И.**
Изменение текстуры деформированной меди
при воздействии холодной плазмы воздуха 270

CONTENTS

Mechanical Engineering and Engineering Science

- Devoino O. G., Gorbunov A. V., Shpackevitch D. A.,
Lapkovsky A. S., Gorbunova V. A., Koval V. A.,
Kovaleva S. A.**
On Energy Efficiency Characteristics
of Laser Erosion on Oxidic Surfaces of Carbon
Steels, Cast Iron and Low-alloy Non-ferrous Alloys
During Deoxidizing Cleaning. Part II 261
- Anisovich A. G., Filatova I. I.**
Change in Texture of Deformed Copper
Exposed to Cold Air Plasma 270

Качанов И. В., Филиппчик А. В., Шаталов И. М., Иванов Д. М., Жук А. Н.	
Повышение эффективности лазерной резки стальных материалов путем предварительной обработки гидроабразивным способом	278

Ambekar S. B., Pawar S. S., Dube A. S., Patil D. P., Kumar A.	
Enhancing Sustainability in Titanium Machining: Simulated and Experimental Insights into PVD & CVD Carbide Inserts Applications (Амбекар С. Б., Павар С. С., Дубе А. С., Патиль Д. П., Кумар А. Повышение устойчивости обработки титана: моделирование и экспериментальное изучение применения твердосплавных пластин с PVD- и CVD-покрытием)	284

Механика деформируемого твердого тела

Босаков С. В., Мелянюк М. А.	
Функция Грина для упругой полуполосы	292

Строительство

Низомов Д. Н., Каландарбеков И. К., Каландарбеков И. И.	
Моделирование системы «платформа – модель здания» с сейсмоизолирующим поясом	297
Грахов В. П., Кисляков М. А., Кисляков А. А.	
Анализ геологических и гидрогеологических условий при проведении реконструкции набережной Ижевского водохранилища	307

Транспорт

Морозов В. В., Чикишев Е. М.	
Моделирование транспортных потоков при помощи нейронных сетей	317

Энергетика

Капанский А. А., Грунтович Н. В.	
Многоуровневая стратегия размещения измерительных устройств в инженерных системах с распределенной нагрузкой на основе иерархического и кластерного анализа	327

Kachanov I. V., Filipchik A. V., Shatalov I. M., Ivanov D. M., Zyk A. N.	
Improving the Efficiency of Laser Cutting of Steel Materials by Pre-Treatment with Waterjet Method	278

Ambekar S. B., Pawar S. S., Dube A. S., Patil D. P., Kumar A.	
Enhancing Sustainability in Titanium Machining: Simulated and Experimental Insights into PVD & CVD Carbide Inserts Applications	284

Deformation in Solid Mechanics

Bosakov S. V., Melyanyuk M. A.	
Green's Function for Elastic Half-Strip	292

Civil and Industrial Engineering

Nizomov D. N., Kalandarbekov I. K., Kalandarbekov I. I.	
Modeling of the System “Platform – Building Model” with a Seismic Isolation Belt	297
Grakhov V. P., Kislyakov M. A., Kislyakov A. A.	
Analysis of Geological and Hydrogeological Conditions during the Reconstruction of the Embankment of the Izhevsk Reservoir	307

Morozov V. V., Chikishev E. M.	
Modeling Traffic Flows Using Neural Networks	317

Power Engineering

Kapanski A. A., Hruntovich N. V.	
Multi-Level Strategy for Placement of Measuring Devices in Engineering Systems with Distributed Loads Based on Hierarchical and Cluster Analysis	327

Главный редактор
Сергей Васильевич Харитончик

Редакционная коллегия

- Алексеев Ю. Г.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,
Леонович С. Н. (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,
Шелег В. К. (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,
Белый А. В. (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Бисби Л. (Эдинбургский университет, Эдинбург, Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии),
Виттманн Ф. Х. (Швейцарская высшая техническая школа Цюриха, Цюрих, Швейцарская Конфедерация),
Дидерихс У. (Ростокский университет, Росток, Федеративная Республика Германия),
Дмитриев С. М. (Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация),
Згуровский М. З. (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина),
Кондерс А. Б. (Дармштадтский технический университет, Дармштадт, Федеративная Республика Германия),
Косёр-Казберук М. (Белостокский технический университет, Белосток, Республика Польша),
Лю Тингуо (компания «Гаююань», провинция Хэнань, Китайская Народная Республика),
Макнами Р. Я. (Консультационное агентство по вопросам пожарной безопасности, Стокгольм, Королевство Швеция),
Максаров В. В. (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация),
Нгуен Тху Нга (Научный энергетический институт, Вьетнамская академия наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
Одиназода Х. О. (Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими, Душанбе, Республика Таджикистан),
Опяляк М. (Люблинский технический университет, Люблин, Республика Польша),
Пенязьков О. Г. (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),

Editor-in-Chief
Sergei V. Kharytonchyk

Editorial Board

- Aliakseyeu Yu. G.** (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,
Leonovich S. N. (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,
Sheleg V. K. (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,
Byeli A. V. (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
Bisby L. (University of Edinburgh, Edinburgh, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland),
Wittmann F. H. (ETH – Swiss Federal Institute of Technology Zürich, Zürich, Swiss Confederation),
Diederichs U. (University of Rostock, Rostock, Federal Republic of Germany),
Dmitriev S. M. (Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation),
Zgurovsky M. Z. (National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine),
Koenders A. B. (Technical University of Darmstadt, Darmstadt, Federal Republic of Germany),
Kosior-Kozberuk M. (Bialystok University of Technology, Bialystok, Republic of Poland),
Liu Tingguo (Gaoyuan Company, Henan Province, People’s Republic of China),
McNamee R. J. (Brandskyddslaget AB, Stockholm, Kingdom of Sweden),
Maksarov V. V. (Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation),
Nguyen Thu Nga (Institute of Energy Science, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),
Odinazoda H. O. (Tajik Technical University named after Academic M. S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan),
Opielak M. (Lublin University of Technology, Lublin, Republic of Poland),
Penyazkov O. G. (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),

Пимьента П. (Научно-технический центр строительной отрасли, Сен-Мартен-д'Эр, Французская Республика),
Родригес Ж. П. К. (Коимбрский университет, Коимбра, Португальская Республика),
Романиук Ф. А. (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Сидерис К. (Фракийский университет имени Демокрита, Комотины, Греческая Республика),
Соболев К. (Университет Висконсин-Милуоки, Милуоки, Соединенные Штаты Америки),
Сумров В. В. (компания «Интернет Коммуникаций Девелопмент Групп Лимитед», Рига, Латвийская Республика),
Феличетти Р. (Миланский технический университет, Милан, Итальянская Республика),
Хрусталева Б. М. (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Чжао Цзи (Северо-Восточный университет, Шэньян, Китайская Народная Республика),
Чижик С. А. (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
Ши Ли И (Научно-технологический парк Шанхайского университета, Шанхай, Китайская Народная Республика),
Эберхардштайнер Й. (Венский технический университет, Вена, Австрийская Республика),
Янковский А. (Технологический институт ВВС, Варшава, Республика Польша)

Ответственный секретарь редакционной коллегии
В. Г. Горбаш

Pimienta P. (Scientific and Technical Centre for the Building – CSTB Department, Saint-Martin-d'Hères, French Republic),
Rodrigues J. P. C. (University of Coimbra, Coimbra, Portuguese Republic),
Romaniuk F. A. (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
Sideris K. (Democritus University of Thrace, Komotini, Hellenic Republic),
Sobolev K. (University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, United States of America),
Sumrov V. V. (Internet Communication Development Group Ltd – ICD, Riga, Republic of Latvia),
Felicetti R. (Polytechnic University of Milan, Milan, Italian Republic),
Khroustalev B. M. (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
Zhao Ji (Northeastern University, Shenyang, People's Republic of China),
Chizhik S. A. (National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
Shi Li Yi (Science and Technology Park of Shanghai University, Shanghai, People's Republic of China),
Eberhardsteiner J. (Vienna University of Technology, Vienna, Republic of Austria),
Jankowski A. (Air Force Institute of Technology, Warsaw, Republic of Poland)

Executive Secretary of Editorial Board
V. G. Gorbash

Ведущий научный редактор
В. Н. Гурьянчик

Адрес редакции

Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65, корп. 2, комн. 327
220013, г. Минск, Республика Беларусь

Тел. +375 17 320-65-14

E-mail: sat@bntu.by
<http://sat.bntu.by>

Перерегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 декабря 2011 г.
Регистрационный номер 285

С 2002 г. издание выходило под названием «Вестник БНТУ»

ISSN 2227-1031. Подписные индексы 00662, 006622

Подписано в печать 31.07.2025. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 10,25. Уч.-изд. л. 9,73. Тираж 60 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 38200000006896 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

© Белорусский национальный технический университет, 2025

Lead Science Editor
V. N. Guryanchyk

Address

Belarusian National Technical University
Nezavisimosty Avenue, 65, Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus

Tel. +375 17 320-65-14

E-mail: sat@bntu.by
<http://sat.bntu.by>

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-261-269>

UDC 621.9.048.7: 621.375.826: 621.373.8: 546

On Energy Efficiency Characteristics of Laser Erosion on Oxidic Surfaces of Carbon Steels, Cast Iron and Low-alloy Non-ferrous Alloys During Deoxidizing Cleaning

Part II

O. G. Devoino¹⁾, A. V. Gorbunov¹⁾, D. A. Shpackevitch¹⁾, A. S. Lapkovsky¹⁾, V. A. Gorbunova¹⁾,
V. A. Koval¹⁾, S. A. Kovaleva²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. An analysis of the energy efficiency characteristics was performed for laser erosion cleaning (LC) processes developed last period for the application in metalworking sector for the wide group of carbon steels, cast iron and non-ferrous metal alloys to remove surface oxidic layers. The consideration of some characteristics of the LC-processes (energy consumption, energy criterion K_{enls} et al.) gives the opportunity for the evaluation of the effects of different mechanisms of the surface deoxidizing during the pulsed laser cleaning of MeO_x -layers. Analysis of LC-processes taking into account the efficiency characteristics was based on the massive of parameters of typical (in the field of LC of oxides) regimes of processing of samples of carbon steels with surface oxide layers (including using data from our experiments) with use of various pulsed lasers, as well as some samples of aluminum, copper and titanium alloys and cast iron with surface oxides. Our comparison of estimated values of the parameters for a number of recent LC-variants demonstrates that it can be supposed with a sufficient reliability that for the most typical LC-processing cases (preliminary studied in our experiments with cleaning steel samples from mill scale and also described for LC-processes with removal of oxides from some non-ferrous alloys), the first, i.e. the most energy-consuming (thermal ablation with heating to the melting temperature or even higher) of the cleaning mechanisms is more probable. For this processing group the level of the energy criterion values achieved in our experimental series with the LC of FeO_x -scale ($K_{enls} \approx 4.4$ and corresponding approximate value can, according to our kinetic estimates, be considered close to the threshold level, below which not only the LC thermal ablation will be realized in parallel, but also partially the other two deoxidizing mechanisms (not so high energy consumed ones). At the same time active realization of other, i.e. non-ablative mechanisms is feasible in a rarer group of LC-operating cases (e.g. in the laser removal of TiO_x -film from the titanium alloy, and also, possibly, in the regime of alumina removal from aluminium alloy for which the K_{enls} level is probably equivalent to the “transition zone” with substantial contribution of both non-ablative mechanisms and thermal ablation).

Keywords: laser erosion, cleaning of metal parts, oxidated surface, steels, non-ferrous metal alloys, energy efficiency characteristics, mechanisms of layer removal, oxides, surface deoxidizing, energy/power consumption

For citation: Devoino O. G., Gorbunov A. V., Shpackevitch D. A., Lapkovsky A. S., Gorbunova V. A., Koval V. A., Kovaleva S. A. (2025) On Energy Efficiency Characteristics of Laser Erosion on Oxidic Surfaces of Carbon Steels, Cast Iron and Low-alloy Non-ferrous Alloys During Deoxidizing Cleaning. Part II. *Science and Technique*. 24 (4), 261–269. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-261-269>

Адрес для переписки

Горбунова Вера Алексеевна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 67,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-71
ecology@bntu.by

Address for correspondence

Gorbunova Vera A.
Belarusian National Technical University
67, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-71
ecology@bntu.by

О характеристиках энергоэффективности лазерной эрозии при очистке от оксидов поверхностей углеродистых сталей, чугуна и низколегированных сплавов металлов

Часть 2

Докт. техн. наук, проф. О. Г. Девойно¹⁾, канд. техн. наук А. В. Горбунов¹⁾,
Д. А. Шпакевич¹⁾, А. С. Лапковский¹⁾, канд. хим. наук, доц. В. А. Горбунова¹⁾,
канд. техн. наук, доц. В. А. Коваль¹⁾, канд. техн. наук С. А. Ковалева²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси
(Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Проведен анализ показателей энергоэффективности процессов лазерной эрозионной очистки (ЛО), разрабатываемых в последнее время для применения в технологиях металлообработки многих углеродистых сталей, чугунов и сплавов цветных металлов, с целью удаления с них поверхностных оксидных слоев. Учет некоторых характеристик данных ЛО-процессов (энергозатраты, энергетический критерий K_{enls} , и др.) дает возможность оценить влияние различных механизмов поверхностного деоксидирования при импульсной лазерной очистке MeO_x -слоев. Анализ LC-процессов с учетом характеристик эффективности проводился на основе массива параметров типичных (в области ЛО от оксидов) режимов обработки образцов углеродистых сталей с поверхностными оксидными слоями (в том числе с использованием данных наших экспериментов) с применением различных импульсных лазеров, а также некоторых образцов алюминиевых, медных и титановых сплавов и чугуна с поверхностными оксидами. Проведенное нами сравнение расчетных значений параметров для ряда современных вариантов ЛО показывает, что с достаточной степенью надежности можно предположить, что для наиболее типичных случаев ЛО-обработки (предварительно изученных в наших экспериментах по очистке стальных образцов от прокатной окалины, а также описанных для ЛО-процессов по удалению оксидов с поверхности некоторых сплавов цветных металлов) более вероятен первый, т.е. наиболее энергозатратный (термическая абляция с нагревом до температуры плавления и даже выше) из механизмов очистки. Для этой группы процессов уровень значений энергетического критерия, достигнутый в нашей серии экспериментов с ЛО FeO_x -окалины со стали ($K_{enls} \approx 4,4$) и соответствующее ему приближенное значение можно, согласно нашим кинетическим оценкам, считать близким к пороговому уровню, ниже которого будет параллельно реализовываться не только ЛО-термоабляция, но и частично два других (менее энергозатратных) механизма деоксидирования. В то же время в более редкой группе случаев процессов ЛО (например, при лазерном удалении пленки TiO_x с титанового сплава, а также, возможно, в режиме удаления оксида алюминия с алюминиевого сплава, для которого уровень K_{enls} , вероятно, эквивалентен «переходной зоне» с существенным вкладом как неабляционных механизмов, так и термоабляции) возможна активная реализация иных, т.е. не термоабляционных механизмов.

Ключевые слова: лазерная эрозия, очистка металлоизделий, окисленная поверхность, стали, сплавы цветных металлов, характеристики энергоэффективности, механизмы удаления слоя, оксиды, деоксидирование поверхности, энергозатраты

Для цитирования: О характеристиках энергоэффективности лазерной эрозии при очистке от оксидов поверхности углеродистых сталей, чугуна и низколегированных сплавов металлов. Часть 2 / О. Г. Девойно [и др.] // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 4. С. 261–269. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-261-269>

Introduction and research objective

An important trend in current metalworking sector is a modernization of outdated mechanical and other processes for surface deoxidizing cleaning of various metal parts and structures from unwanted oxide layers (products of low-temperature or hot corrosion degradation), such as rust and scale on structural steels and oxidic layers (up to ≥ 1 mm thickness) on different non-ferrous me-

tal alloys, especially based on Al and Ti [1–9]. For these objective a number of groups of advanced technologies, such as laser-erosion ones (in pulse or continuous wave variants) and some others, can be applied, and these are actively designed last period for different grades of steels, cast iron and alloys (to remove the layers of FeO_x , Al_2O_3 , TiO_2 , CuO , ZnO , MgO , WO_x , PbO , Ag_2O , etc.) [1–21] and even partially commercialized for some industrial facilities, especially in China.

Consideration of some efficiency characteristics (energy consumption, energy criterion, etc.) gives the opportunity for the evaluation of potential of different mechanisms of the surface deoxidizing during the pulsed laser cleaning (LC). Corresponding analysis of the LC-processes based on this approach has recently been initiated using the characteristics mentioned for the empirical data massive of typical LC-regimes of processing of structural steels, measured in the experiments with the use of pulsed laser systems, as well as some cast iron and non-ferrous metal alloy surfaces with oxidic layers (including of iron oxides, alumina, titania, copper oxides) [22]. The K_{enls} criterion (or some other similar dimensionless parameters used typically for engineering analysis of high temperature systems), in accordance with some estimations (with use of experience of this criterion application in thermal plasma engineering for inorganic materials production, as was demonstrated before [23, 24]), in some cases can be suitable for modeling and technical scaling of the LC-processes with phase transitions in the condensed surface phase [22]. For the objective of our current research, the special comparison of the efficiency characteristics was chosen to estimate the effect of main possible physical mechanisms of surface deoxidizing of different layers during the analyzed group of LC-processes.

Research approach for the laser deoxidizing erosion of surface layers and data obtained

In our analysis of the LC-regimes for different oxides such special variant of energy criterion K_{enls} was used, which takes into account not only the conductive heating of the oxidic surface in the axial direction with laser beam, but also other mechanisms of heat transfer which occur in all directions in the laser removal/cleaning systems under consideration [22]. For this case the simplified expression can be used, by analogy with the energy efficiency parameter (the energy efficiency) of plasma-chemical systems [25, 26]:

$$K_{enls} = \frac{E_{lw}}{Q_{lw-ox}}. \quad (1)$$

Here E_{lw} – total value of energy consumption of the LC-processing (for such case of the process as laser heating to melting point of the surface layer) in units of J/(kg of removed material).

Additionally, the Peclet number Pe , characterized the surface rate of the laser cleaning of the oxidic surfaces, can be used for estimations of energy performance level of LC-processes [22]; in this the thermal diffusivity is used: $a = \kappa/(\rho \cdot c_p)$ (where ρ и c_p are the density and specific heat capacity for oxidic layer, averaged for specified temperature range).

For the determination of K_{enls} criterion the enthalpy difference ΔH can be obtained for the analyzed oxidic layer with the use for the case of LC-process with thermal ablation (heating to the level of evaporation or melting/fusion temperatures – T_b or T_m) standard expression:

$$\Delta H_1 = \int_{T_0}^{T_m} c_{p,s} dT + \int_{T_m}^{T_b} c_{p,l} dT + \Delta H_m + \Delta H_v \quad (2)$$

(the variant for the heating with the oxidic layer melting and next vaporization (ΔH_v – is the heat of vaporization)).

It is also significant that when calculating the values of the specific heating power and the energy criterion for various laser processing regimes, the value of the energy of the laser irradiation absorbed by the surface in general case should be determined using an expression of the following type [27]:

$$Q = (1 - R) \cdot I_o(x, y, t)A, \quad (3)$$

here R – the coefficient of the radiation reflection from the heated surface, $I_o(x, y, t)$ – the distribution of the laser beam energy (before contact with the surface) in a 2D coordinate system (x, y) and in time (t) , coefficient A (it is equal to 0.9 when modeling LC with a LI-pulse duration in different modes from 0.050 to 10.0 ms [27]) is the shielding coefficient of the surface from the beam in zone of near-surface laser-induced plasma (it is usually considered a quasi-spherical formation [28] and has a characteristic size of 0.14–1.8 mm on our estimations for the conditions of experimental LC-regimes with various oxide layers (with thickness of up to 330 μm), including those

given below in Table 1), and thus this value is the degree of conservation of the laser beam energy during its propagation/motion through the near-surface plasma.

The complete group of parameters that was selected to characterize the main physical mechanisms of removing oxide layers during LC of the steels and alloys was presented before in the paper [22], including the removing mechanisms with shock wave generation in laser-induced plasma zone near the irradiated oxidic surface. As shown in [29], under LC conditions with pulsed lasers, the “shock wave ejection mechanism” prevails at high intensive laser plasma (in terms of the dynamic effect on solid surfaces) rather than the mechanism of photon pressure from the beam of LI.

A comparative description of the obtained experimental data, including energy consumption parameters, for a number of typical variants of laser removal of oxidic corrosion products from steels and some alloys is briefly presented in [10], including the case of the results of a series of our experiments on lab-scale 30W LC-system from mill scale layers (30–50 μm thickness (δ)) on carbon steel samples. Figure 1 shows, as an example, a micrograph of the cross-section of carbon steel sample with oxidic scale layer before the scale removal with the laser processing. In this case, the LC-processing was carried out on experimental setup using the laser with high-frequency nanosecond pulses (HFNP) with single pulse energy ≤ 1 mJ and the pulse duration $t_p = 120\text{--}150$ ns [10]. The rate of LC-removal of the layer (containing mainly the magnetite phase Fe_3O_4 with an admixture of hematite Fe_2O_3 (and small impurities of other phases) in accordance with X-ray diffraction analysis performed for samples with mill scale in the OIM of NASB (laboratory of nanostructured and superhard materials), using the diffractometer from Bruker D8 ADVANCE (Germany) with CuK_α -radiation (the wavelength 0.15418 nm) in the optimal regime is at the level of no less than 0.005 dm^2 of the scale surface per second (at operating time-averaged thermal power of the beam $P_0 \approx 28$ W, emitting in IR-region of spectrum, and at five passes of the beam $\delta \approx 32$ μm). Carbon steel of St3 grade (with 0.14–0.22 wt. % C, 0.15–0.3% Si, 0.4–0.65 % Mn, ~ 97 % Fe) was used as the sample material in our

experiments on LC. The size of the plate samples was 90×70 mm, thickness $\delta = 4$ mm.

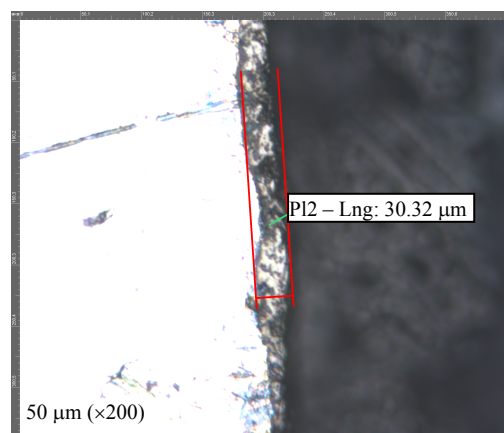


Fig. 1. Micrograph of a cross-section of the sample made of St3 carbon steel (light (left) part of the photo) with a layer of oxidic mill scale with ≤ 30.5 μm thickness, taken before the start of our experiment for laser cleaning. The scale bar (bottom left) in this micrograph represents 50 μm

The micrographs of the cross-sections of carbon steel samples with oxidic mill scale layer were obtained with the use of the metallographic optical inverted microscope ADF I350 (ADF Co. (China), with a digital camera of Aksalit Soft Co. (Russia)) with a magnification of up to 2000 times.

A special analysis of the experimental results obtained for laser surface deoxidizing [10] and other published empirical data for the LC-processes on different metal samples (oxidated steels, cast iron, alloys, – see the data for typical examples of the surface cleaning processes in Table 1) was carried out, using systematized data on the number of thermophysical and optical properties of important group of metal oxides, which were generalized by us in [22].

The obtained results on the parameters of laser cleaning in different regimes. In general, as we found, for comparative analysis of the efficiency of different (by the composition of the layers) laser processes it is advisable to use a group of parameters affecting energy consumption of LC processing: a) the criterion K_{enls} ; b) surface absorbed power N_0 of irradiation from the laser beam or/and the ratio of N_0 to the thermal conductivity of layer; c) the amplitude of the shock wave (SW) pressure in the laser plasma near the surface (P_{sw-p}). In accordance with our preliminary

data, it is possible to estimate the effect of main mechanisms for removal of the irradiated layers during the pulsed LC: 1) thermal ablation; 2) low temperature thermoelastic stress in the oxidic layer or at the “layer/substrate” interface (“exfoliation” or “spallation” mechanism); 3) effect of the pressure front of the laser induced SW on the oxidic surface. Our approximated estimation of the LC processes taking into account the data of the efficiency characteristics (some of the analyzed LC parameters are given below in a form of Table 1) was based on the parameters of a number of regimes of LC with pulsed lasers (with different laser power and pulse energies up to $E_p = 100$ mJ)

of samples from carbon steels, cast iron, and some aluminum, copper, titanium and other alloys containing surface oxides. Collation of levels of these special characteristics for different variants of LC allows us to select energy efficient regimes for the removal surface oxides from various metal substrates. It is also important, that for the regimes of removing oxide layers from carbon steel, the found value of such additional parameter characterizing the power efficiency of the LC-process as Peclet number (in the surface variant of the number) is at the level of $Pe \geq 1500$ –2000 when optimal interval of the operating modes was used.

Table 1

Comparison of parameters and energy consumption for recent technologies for laser surface deoxidizing of some steels and low-alloy metal alloys

No	Material of processed metal products	Application area of the processed products, objective of laser processing	Composition of the layer removed during deoxidizing/cleaning; cleaning rate G	Type of laser processing system, operating and energy consumption parameters (radiation wavelength λ , etc.); value of the energy criterion for LC (assuming oxidic layer heating to the point of complete melting of irradiated layer); estimated parameter of possible laser induced shock wave (SW)	Technological features of the deoxidizing process (gas environment, etc.), auxiliary effects
1	2	3	4	5	6
1.	Structural carbon steel (SCS), plate-type samples [1]	Metalworking industry; the purpose of LC is to clean hot rolled parts/products before further mechanical processing (metalworking) operations	Removal of oxidic scale (FeO_x) from the steel surface; G – from 0.0023 $cm^2/(s \cdot W)$ (for SM-L with power $P = 0.5$ kW) to 0.0043 (for MM-L with $P = 1.0$ kW) and 0.0048 $cm^2/(s \cdot W)$ (for MM-L with $P = 2.0$ kW)	Pilot system for pulsed laser processing (with single-mode (SM-L) and multimode (MM-L) lasers with $\lambda \approx 1064$ nm with averaged thermal power of laser beam $P = 0.1$ –0.5 kW (SM-L) and 1.0–2.0 kW (MM-L). For the processing system with MM-L in the used operating regime: laser pulse duration $t_p = 85$ ns, pulse repetition frequency $f = 10$ kHz, diameter of laser beam spot $d_s = 0.85$ mm, beam scanning speed $v = 0.506$ m/s; individual pulse energy $E_p = 100.0$ mJ, total energy consumptions – $E' \approx 38.1$ MJ/(kg of the layer) and $E^* \approx 2.33$ MJ/(m^2 of the layer). Maximal pressure of a front of SW $P_{sw-p} \leq 21.0$ MPa. Criterion (approximate value) $K_{enls} \approx 20.25$ (††) (^)	Thickness of the removed (by ablation with melting and partial (or complete) vaporization) film of the oxidic mill scale $\delta = 15.0$ μm (with porosity on our estimation $P \approx 0.20$)
2.	SCS of Q235 grade, plate-type samples [4]	Metalworking industry; the purpose of LC – a cleaning of rusted parts/ products (mainly sheets) before further mechanical processing (metalworking)	Rust films/layers (composed of FeO_x -phases) from piped/municipal water and natural soil; no data for G presented	Pulsed laser cleaning unit with $P = 350$ W at $\lambda \approx 1064$ nm, maximal $E_p = 30$ –50 mJ, $d_s = 0.7$ mm, $f = 7$ –15 kHz, $t_p = 6$ ns; $E^* \approx 0.04$ kWh per 1 m^2 of the oxidic layer (assuming a single dose of the laser radiation per surface area unit)	There is no data on the thickness of the layer removed from the surface
3.	SCS of St3 grade, plate-type samples (authors' experience)	Metalworking industry; the purpose of LC is to clean hot rolled parts/products before further	Removal of oxidic mill scale (based on Fe_3O_4) from the steel surface; G – up to 0.0045 dm^2/s	Processing system with Ytterbium pulsed fiber laser RFL-P30QB (China) with $\lambda \approx 1070$ nm. In used operating regime: $f = 37$ kHz, $t_p = 120$ –150 ns; $d_s = 0.050$ mm, $v = 2.0$ m/s; pulse energy $E_p = 0.81$ mJ, $E' \approx 11.3$ MJ/kg of the layer, $E^* \approx 0.300$ MJ/ m^2 .	Thickness of the removed (by ablation with melting) part of the scale layer $\delta \approx 6.5$ μm (porosity $p \approx 0.20$), here total thickness

Continuation of Table 1

1	2	3	4	5	6
	mental data)	mechanical processing		Pressure of the shock wave front $P_{sw-p} \leq 2.01$ MPa. Criterion $K_{entls} = (6.02) \cdot 0.815 \cdot 0.9 = 4.41$ (accurate value) (††) (^)	of the layer was measured to be $\delta \leq 30-50$ μm
4.	Gray cast iron (with content of 3.5 wt. % C and with Cr fraction up to 0.45 %) [5]	Maintenance and repair of automotive equipment; the purpose of the LC-process is to remove rust from brake discs while rising the strength characteristics of the cleaned metal surface	Rust layer formed during an operation of transport equipment in humid air; $G \approx 0.065$ dm^2/s	Continuous wave (i.e. non pulsed) CO_2 -type laser ($\lambda = 10.6$ μm) with maximal $P = 85$ W; $d_s = 0.71-1.69$ mm; transverse moving speed of laser beam $v = 0.030-3.0$ m/s; $E^* \geq 0.033$ kWh/m^2 (at the values of operating parameters $P = 60$ W, $d_s = 0.72$ mm and $v = 0.9$ m/s)	The thickness of the removed rust layer $\delta \leq 330$ μm , the final roughness of cleaned cast iron surface $R_a \approx 1$ μm , its final microhardness is up to 235–306 on the HV scale (while the hardness of the original rusty parts is 93 on the HV scale)
5.	Aluminium alloy 5754 (with Mg content 2.6–3.6 wt. %), plate samples [11]	Metalworking; the process objective is to clean the surface of aluminium sheet before welding to improve a quality of the welding joints	Removal of Al_2O_3 -based oxide film from the alloy plate surface; $G \leq 0.06$ dm^2/s	Solid-state pulsed laser with $\lambda = 1064$ nm with $P = 40-100$ W, laser beam scanning speed $v = 0-12$ m/s. In used optimal regime: $f = 120$ kHz, $t_p = 100$ ns; $d_s = 0.050$ mm, $v = 12.0$ m/s; pulse energy $E_p = 0.833$ mJ, $E' \approx 20.9$ MJ/kg of the layer, $E^* \approx 0.1667$ MJ/m ² . Pressure of the shock wave front $P_{sw-p} \leq 3.2$ MPa. Criterion (approximate value) $K_{entls} \approx 6.13$ (††) (^)	Thickness of the removed (probably due to ablation and at least partly due to other mechanisms (i.e. spallation, SW)) part of the oxidic layer $\delta \approx 2.0$ μm
6.	Near-alpha titanium alloy TA15 (Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V), sheet form samples with $\delta = 2$ mm [7]	Preparation of oxidized surfaces of parts for aerospace and medicine applications for subsequent processing, including welding; the cleaned metal surface has better corrosion resistance	Removal of oxide film (from a mixture of phases of anatase and other oxides) and traces of oil stains from the surface of the alloy samples. At the LC-process $G = 0.0008$ dm^2/s	Solid-state YAG:Nd pulsed laser (IPG Photonics, USA) with $\lambda = 1064$ nm at beam scanning speed 0–12 m/s. In optimal used operating regime: $f = 10$ kHz, $t_p = 100$ ns; $d_s = 0.800$ mm, $v = 0.01$ m/s; pulse energy $E_p = 40.01$ mJ, $E' \approx 232.6$ MJ/kg of the layer, $E^* \approx 50.01$ MJ/m ² . Pressure of the shock wave front $P_{sw-p} \geq 12.0$ MPa. Criterion (approximate value) $K_{entls} \approx 108.2$ (††) (^)	The best surface properties were obtained in the optimal LC-regime with ablative removal of the oxide film (at laser beam speed of 0.005 m/s); the degree of oxidation and roughness of resulted surface were 2.08 wt. % and 37 μm , respectively. For removed (most likely with thermal ablation) film $\delta \approx 50$ μm
7.	Alpha-beta titanium alloy TC4 (i.e. Ti-6Al-4V) plate samples with $\delta = 4$ mm [33]	Metalworking; the purpose is to clean the surface of the alloy parts before welding and other technological operations.	Removal of TiO_x film to avoid such undesirable effects as porosity in the weld on products manufactured from the alloy, reduced mechanical properties, conductivity and weakened bonding of the plating with TC4-substrate. At the LC-process $G \leq 0.045$ dm^2/s	Solid-state pulsed laser with $\lambda = 1064$ nm with average $P = 30$ W, beam scanning speed 0.5–10.0 m/s. In used optimal operating regime: $f \approx 500$ kHz, $t_p \approx 5.0$ ns; $d_s = 0.050$ mm, $v = 9.0$ m/s; pulse energy $E_p = 0.06$ mJ, $E' \approx 5.19 \pm 1.04$ MJ/kg of the layer, $E^* \approx 0.067$ MJ/m ² . Pressure of the shock wave front $P_{sw-p} \leq 32$ MPa. Criterion (approximate value) $K_{entls} \approx 2.41$ (††) (^)	When the scanning speed at the LC is 9.0 m/s, oxygen content reaches its lowest value of 4.54 wt. % (i.e. the transformation of TiO_2 -phases to $\sim\text{TiO}_{0.25}$ was carried out). The oxide film was removed, and substrate is exposed. LC-process can improve the hardness and corrosion resistance of metal surface. Exfoliated TiO_x -fragments were found after the LC at regimes with $v \geq 9$ m/s. For the removed (at parallel thermal ablation and other deoxidizing mechanisms realization) film $\delta \approx 2-4$ μm
8.	Copper alloy (plate samples of museum storage,	Restoration of monuments containing elements of copper and its alloys, as well as cleaning	Oxidized layer of increased thickness, which contains cuprite (Cu_2O) and tenorite (CuO) phases	The following systems were used for LC-process: 1) pulsed YAG:Nd laser Smart Clean 2, and 2) ytterbium pulsed fiber laser Mini-Mar-ker2 M20 with maximum output power 20 W, both lasers with $\lambda = 1064$ nm. In the optimal	The problem of undesirable changes in the oxidized copper surface layer with the transition of the Cu_2O phase to the CuO phase of black or gray color

End of Table 1

1	2	3	4	5	6
	consisting of Cu with admixtures of As, Pb, Fe (~0.1 %) [14]	of oxidized surfaces of industrial copper-based metal products/parts	es; $G = 0.003 \text{ dm}^2/\text{s}$	LC-regime (with use of the Mini-Marker2 M20 laser) the energy consumption was: $E^* \approx 0.132 \text{ MJ/m}^2$ in the mode with $f = 20 \text{ kHz}$, $t_p = 100 \text{ ns}$; $d_s = 0.050 \text{ mm}$, $v = 0.60 \text{ m/s}$ and $E_p = 0.20 \text{ mJ}$. Pressure of the shock wave front $P_{sw-p} \leq 1.6 \text{ MPa}$	(it is a by-effect during LC of the copper surfaces) is eliminated using LC-processing in the conditions with protective nitrogen environment
9.	Thermally oxidized (in air) copper (99.99 % pure), plate samples [3]	Cleaning the surface of copper layers of components of semiconductor microelectronic products	Oxidic layer (CuO and Cu ₂ O phases) with thickness $\sim 1 \text{ }\mu\text{m}$; $G = 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ (at the LC with femtosecond pulse laser)	System based on solid-state femtosecond-pulsed laser with $\lambda = 800 \text{ nm}$; range of $Q = 1.7\text{--}4 \text{ kJ/m}^2$ (optimal level $\sim 3.1 \text{ kJ/m}^2$ (it is threshold value for complete removal of the oxidic layer)) in pulsed regime with $f = 1 \text{ kHz}$, $t_p = 50 \text{ fs}$, square laser spot area of $100 \text{ }\mu\text{m}^2$; $E^* \approx 3.10 \text{ MJ/m}^2$ (at the optimal total number of pulses ($n = 1000$) per unit surface area)	Femtosecond LC is preferable because it reduced the thickness of the oxide layer by 99 % to $\sim 20 \text{ nm}$ without by-effects. LC-variant with nanosecond laser either does not remove the entire layer or has a negative effect (formation of secondary oxidic layer of $\sim 0.15 \text{ }\mu\text{m}$)
Nomenclature: K_{enls} values are determined taking into account an absorptance value for the oxidic surface A ; (^) – the values are obtained with taking into account the degree of conservation of the laser beam energy during its propagation/motion through the near-surface plasma $A (\approx 0.90)$ [27]; †† – calculated with the use of the enthalpy difference value ΔH_2 (at $\Delta H_2 = 1.88 \text{ MJ/kg}$ – on energy consumption for heating of the Fe ₃ O ₄ phase (and 3.41 MJ/kg – on energy consumption for heating of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ phase and $\sim 2.15 \text{ MJ/kg}$ (for TiO ₂ phases (at the titania oxidic material with $\rho \approx 4300 \text{ kg/m}^3$ [27])) – up to melting temperature (including the phase transition).					

Our comparison of estimated values of operating parameters (including the values of cleaning rate G during the LC-process) and the energy consumption levels for a number of recent technologies for laser surface deoxidizing of a few steels and low-alloy metal alloys (based on the data of Table 1) demonstrates that it can be supposed with a sufficient reliability that for the most typical LC-processing cases (preliminary studied in our laser experiments with cleaning steel samples from mill scale and also described for LC-processes with different oxides removal from metals, for example in the data [1, 4, 5, 7, 8]), the first, i.e. the most energy-consuming (ablation with heating to the melting temperature or even higher) of the cleaning mechanisms is more probable. For this processing group the level of the energy criterion values achieved in our experimental series with the LC of FeO_x-scale ($K_{enls} \approx 4.4$ (accurate value) and corresponding approximate value (without taking into account the effect of the A and A coefficients) can, according to our kinetic estimates (based on the approach [30–32]), be considered close to the threshold level, below which (according to the values of K_{enls}) not only the LC thermal ablation will be realized in parallel, but also the other two deoxidizing mechanisms with

comparable intensity. At the same time active realization of other, i.e. non-ablative mechanisms is feasible in a rarer group of LC-operating cases (for example, in the published study of the authors [33] on laser removal of TiO_x-film from the corresponding alloy, and also, possibly, in the regime of alumina removal from aluminium alloy 5754 [11] for which the K_{enls} level is probably equivalent to the “transition zone” with substantial contribution of both non-ablative mechanism(s) and thermal ablation during laser cleaning process).

CONCLUSIONS

1. The values found for the specified group of the efficiency parameters of laser erosion deoxidizing of the analyzed group of surface oxidic layers on the commercial grades of carbon steels and low-alloy non-ferrous alloys gave an opportunity to estimate the degree of prevalence of one of the possible mechanisms of MeO_x-layer removal during LC.

2. A comparison of estimated values of operating parameters (including the values of cleaning rate during the LC-process) and the energy consumption levels (K_{enls} , etc.) for a number of recent technologies for laser surface deoxidizing of a few steels and low-alloy metal alloys shows that it can

be supposed with a sufficient reliability that for the most typical LC-processing cases (investigated in our laser experiments with cleaning steel samples from mill scale and also described for LC-processes with different oxides removal from metals, for example in the published data for LC of the steels, cast iron, Ti- and Cu-based alloys), the ablative, i.e. the most energy-consuming of the cleaning mechanisms is more probable.

3. The realization of the non-ablative physical mechanisms is probable in rarer cases of technological regimes, such as laser removal of some TiO_x - and Al_2O_3 -films [33, 11]. It is shown that a collation of the levels of these special characteristics for different LC variants allows to select approximately the most energy-efficient processing regimes for oxidized layer removal from metal substrates, and there is some potential for decreasing energy consumption for a number of LC modes with decomposition of zones with iron- and other metal oxides.

REFERENCES

1. Deschênes J. M., Fraser A. (2020) Empirical Study of Laser Cleaning of Rust, Paint, and Mill Scale from Steel Surface. Lee J., Wagstaff S., Lambotte G., Allanore A., Tesfaye F. (eds). *Materials Processing Fundamentals 2020. The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, Cham, 189–201. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36556-1_17.
2. Zhang J., Wang Y., Cheng P., Yao Y. L. (2006) Effect of Pulsing Parameters on Laser Ablative Cleaning of Copper Oxides. *Journal of Applied Physics*, 99 (6), 064902. <https://doi.org/10.1063/1.2175467>
3. Seo C., Ahn D., Kim D. (2015) Removal of Oxides from Copper Surface Using Femtosecond and Nanosecond Pulsed Lasers. *Applied Surface Science*, 349, 361–367 <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.05.011>.
4. Zaheer Ud Din S., Shi C., Zhang Q., Wei Y., Zhang W. (2023) Evaluation of the Laser Cleaning Efficacy of Q235 Steel Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Metals*, 13 (1), 59. <https://doi.org/10.3390/met13010059>.
5. Ogbekene Y., Shukla P., Zhang Y., Shen X., Prabhakaran S., Kalainathan S., Gulia K. (2018) Laser Cleaning of Grey Cast Iron Automotive Brake Disc: Rust Removal and Improvement in Surface Integrity. *International Journal of Peening Science and Technology*, 1 (2), 155–180.
6. Xie X., Huang Q., Long J., Ren Q., Hu W., Liu S. (2020) A New Monitoring Method for Metal Rust Removal States in Pulsed Laser Derusting via Acoustic Emission Techniques. *Journal of Materials Processing Technology*, 275, 116321. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116321>.
7. Li Z., Zhang D., Su X., Yang S., Xu J., Ma R., Shan D., Guo B. (2021) Removal Mechanism of Surface Cleaning on TA15 Titanium Alloy Using Nanosecond Pulsed Laser. *Optics & Laser Technology*, 139, 106998; <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.106998>.
8. Ren Y., Wang L., Ma M., Cheng W., Li B., Lou Y., Li J., Ma X. (2022) Stepwise Removal Process Analysis Based on Layered Corrosion Oxides. *Materials*, 15 (21), 7559. <https://doi.org/10.3390/ma15217559>.
9. Ma M., Wang L., Li J., Jia X., Wang X., Ren Y. (2020) Investigation of the Surface Integrity of Q345 Steel After Nd:YAG Laser Cleaning of Oxidized Mining Parts. *Coatings*, 10 (8), 716. <https://doi.org/10.3390/coatings10080716>.
10. Sheleg V. K., Shpakevich D. A., Gorbunov A. V., Lapkovskiy A. S., Lutsko N. I. (2024) Study of the Process of Laser Cleaning of Low-Carbon Steel from Corrosion Products. *Mashinostroenie: respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov* [Mechanical Engineering: Republican Interdepartmental Collection of Scientific Works]. Minsk, BNTU, 114–122 (in Russian).
11. Zhang G., Hua X., Huang Y., Zhang Y., Li F., Shen C., Cheng J. (2020) Investigation on Mechanism of Oxide Removal and Plasma Behavior during Laser Cleaning on Aluminum Alloy. *Applied Surface Science*, 506, 144666. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144666>.
12. Windmann M., Röttger A., Kügler H., Theisen W. (2016) Removal of Oxides and Brittle Coating Constituents at the Surface of Coated Hot-Forming 22MnB5 Steel for a Laser Welding Process with Aluminum Alloys. *Surface and Coatings Technology*, 285, 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.11.037>.
13. Wang X., Xu M., Wang Z., Shen L., Qiu M., Tian Z., Ahsan M., Wang C. (2019) Properties of Jet-Plated Ni Coating on Ti Alloy (Ti6Al4V) with Laser Cleaning Pretreatment. *Metals*, 9 (2), 248. <https://doi.org/10.3390/met9020248>.
14. Grigor'eva I. A., Parfenov V. A., Prokuratov D. S., Shakhmin A. L. (2017) Laser Cleaning of Copper in Air and Nitrogen Atmospheres (in Russian). *Journal of Optical Technology*, 84 (1), 1–4. <https://doi.org/10.1364/JOT.84.000001>.
15. Napadlek W. (2009) Ablative Laser Cleaning of Materials. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 16 (1), 357–366.
16. Hino M., Mitooka Y., Murakami K., Nishimoto K., Kana-dani T. (2011) Application of Laser Removal Processing on Magnesium Alloy Anodized from Phosphate Solution. *Materials Transactions*, 52 (6), 1116–1122. <https://doi.org/10.2320/matertrans.mc201005>.
17. Kumar A., Bhatt R. B., Behere P. G., Afzal M., Kumar A., Nilaya J. P., Biswas D. J. (2014) Laser-Assisted Surface Cleaning of Metallic Components. *Pramana*, 82 (2), 237–242. <https://doi.org/10.1007/s12043-013-0665-6>.
18. Kumar A., Sonar V. R., Das D. K., Bhatt R. B., Behere P. G., Afzal M., Kumar A., Nilaya J. P. (2014) Laser Cleaning of Tungsten Ribbon. *Applied Surface Science*

- ce, 308, 216–220. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.04.138>.
19. Prokuratov D., Samokhvalov A., Pankin D., Vereshchagin O., Kurganov N., Povolotckaia A., Shimko A., Mikhailova A., Balmashnov R., Reveguk A. (2023) Investigation towards Laser Cleaning of Corrosion Products from Lead Objects. *Heritage*, 6 (2), 1293–1307. <https://doi.org/10.3390/heritage6020071>.
 20. Schubert S., Barday R., Kamps T., Quast T., Sievert F., Varkhalov A., Nietubyc R., Smedley J., Weinberg G. (2012) Investigation on Laser-Cleaning Process on Lead Photocathodes. *Proceedings of IPAC2012*. New Orleans, LA, USA, 1515–1517. Available at: <https://accelconf.web.cern.ch/IPAC2012/papers/tuppd050.pdf>.
 21. Palomar T., Oujja M., Llorente I., Ramirez Barat B., Cñameres M.V., Cano E., Castillejo M. (2016) Evaluation of Laser Cleaning for the Restoration of Tarnished Silver Artifacts. *Applied Surface Science*, 387, 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.06.017>.
 22. Devoino O. G., Gorbunov A. V., Shpakevitch D. A., Lapkovsky A. S., Gorbunova V. A., Koval V. A., Kovaleva S. A. (2025) On Energy Efficiency Characteristics of Laser Erosion on Oxidic Surfaces of Carbon Steels, Cast Iron and Low-alloy Non-ferrous Alloys During Deoxidizing Cleaning. Part I. *Nauka i Tehnika = Science and Technique*, 24 (1), 12–23 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-12-23>.
 23. Suris A. L. (1989) *Plasma Chemical Processes and Apparatus*, Moscow, Khimiya Publ. 304 (in Russian).
 24. Marotta A., Gorbunov A. V., Mosse A. L. (2004) Heat and Mass Transfer During Plasmachemical Synthesis of Doped Lanthanum Chromite Powders for High-Temperature Semiconducting Materials. *Heat Transfer Research*, 35 (5-6), 427–430. <https://doi.org/10.1615/HeatTransRes.v35.i56.110>.
 25. Gorbunov A. V., Devoino O. G., Gorbunova V. A., Yatskevitch O. K., Koval V. A. (2021) Thermodynamic Estimation of the Parameters for C-H-O-N-Me-Systems as Operating Fluid Simulants for New Processes of Powder Thermal Spraying and Spheroidizing. *Nauka i Tehnika = Science and Technique*, 20 (5), 390–398. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-390-398>.
 26. Mourao R., Marquesi A. R., Gorbunov A. V., Petraconi Filho G., Halinouski A. A., Otani C. (2015) Thermochemical Assessment of Gasification Process Efficiency of Biofuels Industry Waste with Different Plasma Oxidants. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 43 (10), 3760–3767. <https://doi.org/10.1109/TPS.2015.2416129>.
 27. Li Z., Xu J., Zhang D., Shan D., Guo B. (2022) Finite Element Simulation of Temperature Field in Laser Cleaning of TA15 Titanium Alloy Oxide Film. *Scientia Sinica Technologica*, 2022, 52 (2), 318–332. <https://doi.org/10.1360/SST-2021-0059> (in Chinese).
 28. Lammers N. A., Bleeker A. (2007) Laser Shockwave Cleaning of EUV Reticles. *Proc. SPIE 6730, Photomask Technology 2007*, 67304P. <https://doi.org/10.1117/12.746388>.
 29. Yu H., Li H., Wu X., Yang J. (2020) Dynamic Testing of Nanosecond Laser Pulse Induced Plasma Shock Wave Propulsion for Microsphere. *Applied Physics A*, 126 (1), 63. <https://doi.org/10.1007/s00339-019-3243-z>.
 30. Carslaw H. S., Jaeger J. C. (1986) *Conduction of Heat in Solids*. 2nd ed. Oxford University Press. 520.
 31. Pinsker V. A. (2006) Unsteady-State Temperature Field in a Semi-Infinite Body Heated by a Disk Surface Heat Source. *High Temperature*, 44 (1), 129–138. <https://doi.org/10.1007/s10740-006-0015-1>.
 32. Devoino O. G., Gorbunov A. V., Lapkovsky A. S., Lutsko N. I., Shpakevitch D. A., Gorbunova V. A., Koval V. A. (2024) Data Sets Formation on the Physical Properties of Oxide Scale Components for Theoretical Assessment of Efficiency Parameters of Laser Cleaning of Carbon Steels and Related Processes. *Nauka i Tehnika = Science and Technique*, 23 (3), 192–203. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-192-203>.
 33. Liao D., Wang Q., Wang F., Chen H., Ji F., Wen T., Zhou L. (2023) Effect of Nanosecond Pulsed Laser Cleaning Scanning Speed on Cleaning Quality of Oxide Films on TC4 Titanium Alloy Surface. *Chinese Journal of Lasers*, 50 (4), 0402020. <https://doi.org/10.3788/CJL220819> (in Chinese).

Received: 24.04.2025

Accepted: 27.06.2025

Published online: 31.07.2025

Изменение текстуры деформированной меди при воздействии холодной плазмы воздуха

Докт. физ.-мат. наук, проф. А. Г. Анисович¹⁾, канд. физ.-мат. наук, доц. И. И. Филатова²⁾

¹⁾Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Государственное научное учреждение «Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Исследованы изменения микроструктуры и текстуры образцов меди М1 после пластической деформации прокаткой и воздействия низкотемпературной неравновесной плазмы высокочастотного емкостного разряда, возбуждаемого на частоте $f = 5,28$ МГц в воздухе при низком давлении ($p \sim 1$ Торр). Методом металлографического анализа показано, что изменения микроструктуры незначительны. Размер зерна не изменяется; улучшается визуализация структуры, повышается четкость выявления границ зерен после металлографического травления. Результаты рентгеноструктурного анализа свидетельствуют о том, что воздействие плазмы приводит к изменению относительной интенсивности интерференционных линий рентгенограммы. После деформации преобладающей является ориентировка (011), что характерно для текстуры прокатки меди. Воздействие плазмы в течение 5 мин приводит к повышению интенсивности линий (200), (220) и (311). При обработке в течение 10 мин относительная интенсивность линий также незначительно возрастает. Параметр кристаллической решетки после воздействия плазмы не изменяется. Установлено, что изменение интенсивности линий рентгенограммы не связано с действием микронапряжений, изменением размеров блоков когерентного рассеяния. Значение отношения $\sin\theta_{(200)}/\sin\theta_{(111)} = 1,15$ свидетельствует о том, что дефекты упаковки в процессе воздействия не образуются. Рентгеновские эффекты при воздействии плазмы аналогичны наблюдаемым при отпуске деформированных металлов, когда основные ориентировки текстуры деформации или сохраняются на уровне деформированного металла, или усиливаются. При воздействии плазмы реализуется начальный процесс релаксации напряжений, связанный с перемещением атомов на расстояния, меньшие межатомных, когда кристаллическая решетка совершенствуется. Основной причиной изменений являются напряжения 3-го рода, обусловленные смещениями атомов из положений равновесия.

Ключевые слова: пластическая деформация, плазменная обработка, микроструктура, текстура, возврат, напряжения, статические смещения атомов

Для цитирования: Анисович, А. Г. Изменение текстуры деформированной меди при воздействии холодной плазмы воздуха / А. Г. Анисович, И. И. Филатова // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 4. С. 270–277. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-270-277>

Change in Texture of Deformed Copper Exposed to Cold Air Plasma

A. G. Anisovich¹⁾, I. I. Filatova²⁾

¹⁾State Scientific Institution “Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾State Scientific Institution “B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The changes in the microstructure and texture of M1 copper samples after plastic deformation by rolling and exposure to low temperature non-equilibrium plasma of a high-frequency capacitive discharge excited at a frequency of $f = 5.28$ MHz

Адрес для переписки

Анисович Анна Геннадиевна
Государственное научное учреждение
«Институт прикладной физики
Национальной академии наук Беларуси»
ул. Академическая, 16,
220072, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 664-65-56
anna-anisovich@yandex.ru

Address for correspondence

Anisovich Anna G.
State Scientific Institution
“Institute of Applied Physics of the
National Academy of Sciences of Belarus”
16, Academic str.,
220072, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 664-65-56
anna-anisovich@yandex.ru

in air at low pressure ($p \sim 1$ Torr) have been studied in the paper. The metallographic analysis showed that changes in the microstructure of samples are insignificant. The grain size does not change; the visualization of the structure is improved, and the clarity of detection of grain boundaries is increased after metallographic etching. The results of X-ray structural analysis showed that the effect of plasma treatment leads to a change in the relative intensity of the interference lines of the X-ray diffraction pattern. After deformation, the prevailing orientation is (011), which is typical for the texture of copper rolling. After exposure to plasma for 5 minutes, the intensity of lines (200), (220) and (311) increases. A slight increase in the relative intensity of the lines is observed after plasma treatment for 10 minutes. The parameter of the crystal lattice does not change after exposure to plasma. It was found that the change in the intensity of the X-ray lines is not associated with the action of microstresses or a change in the size of coherent scattering blocks. The ratio $\sin\theta_{(200)}/\sin\theta_{(111)} = 1.15$ indicates that stacking faults are not formed during plasma treatment. X-ray effects under plasma exposure are similar to those observed during tempering of deformed metals, when the main orientations of the deformation texture are either maintained at the level of the deformed metal or are enhanced. Under plasma exposure, the initial process of stress relaxation is realized, associated with the movement of atoms over distances smaller than interatomic distances, when the crystal lattice is improved. The main reason of the changes is third-order stresses, caused by the displacement of atoms from their equilibrium positions.

Key words: plastic deformation, plasma treatment, microstructure, texture, recovery, stress, static displacements of atoms

For citation: Anisovich A. G., Filatova I. I. (2025) Change in Texture of Deformed Copper Exposed to Cold Air Plasma. *Science and Technique*. 24 (4), 270–277. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-270-277>

Введение

Одним из быстроразвивающихся направлений в технике является использование высокоэнергетических воздействий для улучшения свойств различных материалов. Значительное место в этом ряду занимают технологии на основе холодной плазмы с газокINETической температурой до 350 К, активно применяемые во многих отраслях, включая биотехнологию, биомедицину, текстильную и пищевую промышленность [1–3]. Плазменная обработка позволяет осуществлять нетермическую модификацию свойств материалов, является экологически чистой и экономически выгодной технологией, что важно для устойчивого развития экономики [1].

Исследования влияния холодной плазмы на структуру и свойства поверхностей и покрытий представлены в ряде работ [4–6]. Многие исследования доведены до промышленных технологий и используются, в частности, в обработке металлов для упрочнения рабочих поверхностей деталей и нанесения тонких покрытий различного функционального назначения [7]. В [8] показана высокая эффективность влияния плазменного воздействия на изменение морфологии поверхности гальванических покрытий, в результате чего износ снижается в 1,5–2 раза. Плазменные методы применяются для формирования защитных покрытий, упрочнения изделий в машиностроении. В качестве плазмообразующего газа, как правило, используют аргон, гелий, азот или воз-

дух. Обработка плазмой изменяет свойства поверхности, во многом определяющие качество изделий триботехнического назначения [9]. Показана принципиальная возможность управления структурой и напряженным состоянием покрытий, обработанных воздушной плазмой [10]. Выполнен анализ оптимальных режимов упрочняющей обработки для повышения эксплуатационных характеристик инструментов из быстрорежущих сталей, модифицированных потоком низкоэнергетической плазмы [11]. Выявлены изменения характеристик поверхностного слоя упрочненных инструментов и установлена зависимость величины микротвердости от режимов обработки.

Исследована трансформация структуры в плазме тлеющего разряда (He) и изменение пластичности сплавов на основе алюминия [12]. Причиной повышения пластичности сплавов алюминий–магний является повышение однородности структуры после воздействия плазмы. После термической обработки сплава, предварительно обработанного плазмой, в алюминиевых сплавах реализуется распад твердого раствора и изменение пористости.

Авторы [13] рассматривают плазменную обработку при низком давлении (300 Па, газ H_2 при 500 °С, длительность обработки 5 ч) как метод, позволяющий сформировать полностью плотный объемный диоксид циркония ZrO_{2-x} без значительных структурных модификаций. При этом с использованием спектроскопии диффузного отражения (DRS) обнаружено су-

щественное увеличение поглощения света: среднее увеличение абсолютного поглощения составляет 66,2 % и >65 % по всему спектру (200–3000 нм). Это свидетельствует о возможности использования плазменных методов в процессах создания экологически чистого производства материалов ZrO_{2-x} следующего поколения. В [14] предложена новая методология структурирования состава и микроструктуры диэлектрических тонкопленочных материалов с использованием Ag плазмы. В качестве основного механизма, ответственного за появление доменов с различной морфологией и химическим составом, рассматривается фокусированное попадание ионов Ag^+ плазмы на определенные участки подложки. Результаты, полученные в последнее время, дают основания утверждать, что использование высокоэнергетических физических воздействий на неметаллические материалы, в частности полимерные композиты, может являться эффективным методом управления их свойствами [15].

Несмотря на то что уже накоплен значительный опыт исследований в области применения холодной воздушной плазмы для изменения свойств металлов и сплавов, имеются проблемы в интерпретации полученных результатов, так как наблюдаемые микроструктурные эффекты воздействия незначительны или находятся на грани чувствительности метода. Есть основание полагать, что изменения свойств материалов, вызванные воздействием холодной плазмы, связаны с процессами, происходящими на уровне кристаллической решетки обрабатываемых образцов.

Целью данной работы является исследование влияния холодной воздушной плазмы на изменение текстуры деформированной меди.

Материалы и методики эксперимента

В качестве образцов для исследований выбран медь марки М1, являющаяся наиболее распространенным электротехническим материалом. Трансформация текстуры меди с использованием различных методов обработки изучена достаточно подробно, что повышает достоверность интерпретации полученных результатов.

Пластическую деформацию меди осуществляли холодной прокаткой со степенью обжатия 75 %. Затем деформированные образцы меди обрабатывали низкотемпературной неравновесной плазмой высокочастотного емкостного разряда 5 и 10 мин. Подробная схема экспериментальной установки представлена в [10].

Металлографический анализ проводился на инвертированном металлографическом микроскопе МИ-1. Шлифы для металлографических исследований изготавливали по общепринятой методике. Травление на микроструктуру осуществлялось реактивом состава: $FeCl_3$ – 20 г, HCl – 6 мл, C_2H_5OH – 100 мл. Фотографирование и количественную обработку микроструктур осуществляли в программе обработки изображения IMAGE SP. Для характеристики размера зерна использовали эквивалентный диаметр (диаметр круга, площадь которого равна площади зерна).

Рентгеноструктурные исследования проведены в излучении $Cu_{K\alpha}$ на дифрактометре ДРОН-3, оснащенный аппаратно-программным комплексом для управления дифрактометром и обработки результатов измерений. Фазовый анализ производился по общепринятой методике. Текстурированный анализ проведен методом обратных полюсных фигур по методу Морриса [16]

$$P_{hkl} = \frac{I_{hkl}/I'_{hkl}}{\sum_{\Delta} A_{hkl}(I_{hkl}/I'_{hkl})}, \quad (1)$$

где P_{hkl} – полюсная плотность; I_{hkl} и I'_{hkl} – интенсивности интерференционных линий текстурованного образца и эталона соответственно; A_{hkl} – фракция кристаллитов в бестекстурном образце, рассеивающая рентгеновские лучи от плоскости (hkl). Величины A_{hkl} для ГЦК-решетки даны в [16].

Определяли полюсную плотность при съемке с плоскости прокатки ($P_{||}$) и с плоскости, перпендикулярной плоскости прокатки ($P_{\perp}$).

Результаты и их обсуждение

Структура меди после деформации, представленная на рис. 1, характерна для пластической деформации прокаткой. Зерна вытянуты в направлении деформации, при травлении границы зерен выявляются не полностью (рис. 1а).

После воздействия плазмы структурные эффекты аналогичны наблюдавшимся в [17]. Размер зерна существенно не изменяется (рис. 1b; 2). Наблюдаются несколько лучшая травимость структуры и соответственно лучшая четкость границ зерен, что может считаться признаком стабилизации структуры.

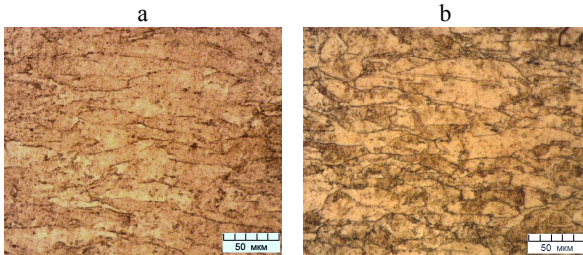


Рис. 1. Структура меди: а – после деформации прокаткой; б – после воздействия плазмы 5 мин

Fig. 1. Copper structure: а – after deformation by rolling; б – after exposure to plasma for 5 min

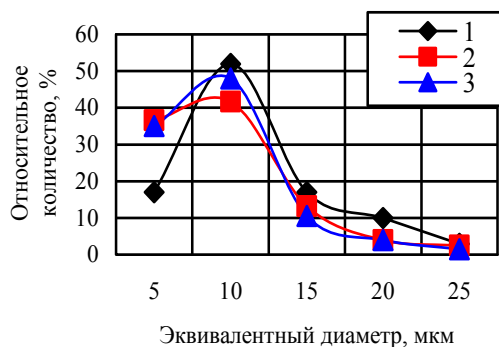


Рис. 2. Распределение зерен по размерам: 1 – после деформации; 2, 3 – после воздействия плазмы в течение 5 и 10 мин соответственно

Fig. 2. Distribution of grain sizes: 1 – after deformation; 2, 3 – after exposure to plasma for 5 min and 10 min, respectively

На рентгенограмме деформированной меди присутствуют 5 основных интерференционных линий (рис. 3а, табл. 1). Из анализа изменения относительной интенсивности линий видно, что преобладающей является ориентировка $\langle 011 \rangle$, что характерно для текстуры прокатки меди [18]. После воздействия плазмы в течение 5 мин наблюдается изменение относительной интенсивности интерференционных линий (табл. 1, рис. 3б). Интенсивность линий (200), (220) и (311) повышается. После обработки плазмой в течение 10 мин наблюдается незначительное изменение относительной интенсивности в сторону повышения (рис. 3с). Параметр кристаллической решетки после воздействия плазмы не изменяется.

Изменение интенсивности интерференционных линий рентгенограмм металлических материалов связано с изменением уровня микронапряжений и размеров блоков когерентного рассеяния, образованием дефектов упаковки и изменением текстуры. В отсутствие дефектов упаковки для ГЦК-решетки выполняется соотношение, не зависящее от изменения периодов кристаллической решетки [19]:

$$\frac{\sin \theta_{(200)}}{\sin \theta_{(111)}} = \frac{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}_{(200)}}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}_{(111)}} = 1,155. \quad (3)$$

Для образцов, обработанных плазмой, соотношение (3) не изменяется (табл. 2), что свидетельствует об отсутствии образования дефектов упаковки в процессе воздействия плазмы.

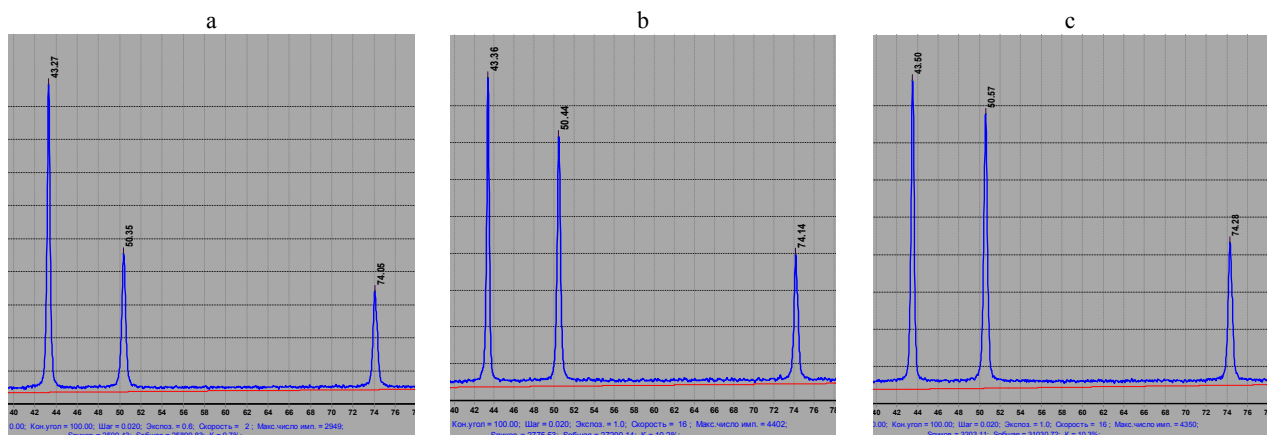


Рис. 3. Фрагменты рентгенограмм меди: а – после деформации; б, с – после 5 и 10 мин воздействия плазмы соответственно

Fig. 3. Fragments of X-ray diffraction patterns of copper: а – after deformation; б, с – after 5 and 10 plasma exposure, respectively

Таблица 1

Расшифровка рентгенограммы деформированной меди (рис. 3)

Decoding the radiograph of deformed copper (Fig. 3)

№ п/п	Табличные данные		Деформация			Плазма, 5 мин	Плазма, 10 мин
	<i>hkl</i>	<i>I</i> , %	2θ , град.	<i>d</i> , Å	<i>I</i> , %	<i>I</i> , %	<i>I</i> , %
1	111	100	43,27	2,089	100	100	100
2	200	46	50,35	1,811	46	82	88
3	220	20	74,05	1,279	34	41	46
4	311	17	89,80	1,091	19	23	25
5	222	5	95,16	1,043	4	3	4

Таблица 2

Углы дифракции и оценка вероятности образования дефектов упаковки

Diffraction angles and assessment of the probability of formation of packing defects

№ п/п	Вид обработки	Угол дифракции 2θ , град.		$\frac{\sin\theta_{(200)}}{\sin\theta_{(111)}}$
		(111)	(200)	
1	Деформация	43,27	50,35	1,151
2	Плазма, 5 мин	43,36	50,44	1,154
3	Плазма, 10 мин	43,50	50,57	1,151

Ранее было показано, что изменение интенсивности линий рентгенограммы не связано с действием микронапряжений, изменением размеров блоков когерентного рассеяния при воздействии холодной плазмы тлеющего разряда (аргон) [8]. Изменение интенсивности линий на рентгенограммах следует связывать с трансформацией текстуры деформации [20]. При воздействии плазмы характер текстуры сохраняется. Основным эффектом воздействия плазмы (табл. 3) является усиление полюсной плотности ориентировки $\langle 111 \rangle$ при некотором снижении полюсной плотности ориентировки $\langle 110 \rangle$ для $P_{\perp}$; усиление полюсной плотности ориентировки $\langle 200 \rangle$ и $\langle 220 \rangle$ для $P_{\parallel}$.

Изменение ориентировок текстуры деформации можно объяснить следующим образом. В [21] были развиты представления о том, что

в основе трансформации структуры металлов и сплавов при внешних воздействиях любой природы лежат «тепловой» и «деформационный» эффекты. Деформационный эффект ответственен за накопление дефектов кристаллического строения и повышение уровня напряжений, тепловой – обеспечивает развитие релаксационных процессов. Примером теплового эффекта, помимо собственно термической обработки, может служить тепловой эффект пластической деформации – динамический возврат. Вклад теплового или деформационного эффектов различен для разных воздействий. Соотношение тепловой и деформационной компонент в конечном итоге определяет вид сформировавшейся структуры.

Наклепанный металл термодинамически неустойчив при любой температуре [22]; его переход в более устойчивое состояние требует определенной энергии активации, которая передается металлу. При нагреве деформированных металлов и сплавов в процессе возврата искажения кристаллической решетки частично снимаются вследствие процессов релаксации [21]. Изменений структуры металла в процессе возврата на микроскопическом уровне еще не наблюдается, но изменения могут быть зафиксированы рентгенографически. Основным наблюдаемым эффектом при этом является усиление ориентировок текстуры деформации [23, 24]. На рентгенограммах также наблюдается сужение интерференционных линий, усиление их интенсивности и понижение фона, что является признаком снижения статических искажений кристаллической решетки. На этой стадии кристаллиты принимают исходную недеформированную форму за счет снятия упругих изгибов кристаллической решетки. Статические искажения связаны с отклонением атомов из положений равновесия, определяемых узлами кристаллической решетки, и возникают при наличии дефектов – дислокаций, внедренных атомов и вакансий.

Таблица 3

Полюсная плотность ориентировок текстуры

Pole density of texture orientations

Ориентировка <i>hkl</i>	Деформация		Плазма, обработка 5 мин		Плазма, обработка 10 мин	
	$P_{\parallel}$	$P_{\perp}$	$P_{\parallel}$	$P_{\perp}$	$P_{\parallel}$	$P_{\perp}$
$\langle 111 \rangle$	9,3	12,6	7,1	16,1	6,8	17,8
$\langle 200 \rangle$	6,7	6,1	8,2	6,2	8,6	6,3
$\langle 220 \rangle$	5,0	5,5	6,1	4,1	6,1	2,8
$\langle 311 \rangle$	6,7	5,1	5,2	4,5	5,0	4,9
$\langle 222 \rangle$	4,2	4,2	0	0	0	0

В исследуемом случае плазма воздуха может являться источником энергии, за счет которой реализуются изменения в текстуре деформации меди. При воздействии «теплового эффекта» плазмы реализуется начальный процесс релаксации напряжений, связанный с перемещением атомов на расстояния, меньшие межатомных, когда кристаллическая решетка металла совершенствуется. Это, предположительно, соответствует I стадии возврата при отжиге [23, 25], учитывая, что непосредственный нагрев в процессе обработки плазмой отсутствует [10]. В [23] рассматривались изменения в меди и латуни, вызываемые воздействием холодной плазмы, на различных структурных уровнях. Было показано, что холодная плазма не вызывает существенных изменений микро-, а также субструктуры (дислокационной структуры). Движущей силой процесса изменения интенсивности линий рентгенограммы под воздействием плазмы может быть смещение атомов из положений равновесия (или статических искажений кристаллической решетки), обуславливающих действие напряжений 3-го рода.

В настоящее время вопрос о напряжениях 3-го рода рассматривается, преимущественно, применительно к формированию твердых растворов, влиянию примесей на структуру и свойства материалов, а также фазовых превращений [26, 27]. Представления об атомных смещениях используются для описания механизмов мартенситного превращения [28, 29]. Статические атомные смещения связываются с наличием возбужденных состояний в сплавах; расчетным путем установлены наличие и величина атомных смещений, и обсуждается их возможное влияние на свойства сплавов. По величине статические смещения атомов в катодном никеле, вызванные воздействием плазмы, составляют порядка $0,03...0,09 \text{ \AA}$ [30], что по порядку величины согласуется с результатами, полученными для твердых растворов ($0,04 \text{ \AA}$) [31]. В [18] для отожженной меди, обработанной плазмой воздуха, были получены значения $\sim 0,075 \text{ \AA}$.

ВЫВОДЫ

1. Исследовано влияние холодной воздушной плазмы на трансформацию микроструктуры и текстуры меди, деформированной холодной прокаткой на 75 %. Установлено, что изменений микроструктуры не наблюдается. После обработки несколько улучшается визуа-

лизация границ зерен, что может считаться признаком стабилизации структуры.

2. Показано, что эффект воздействия плазмы проявляется, преимущественно, в усилении ориентировок текстуры деформации. При этом исключается формирование дефектов упаковки и измельчение областей когерентного рассеяния.

3. Наблюдаемый эффект следует связывать с развитием процессов, аналогичных возврату в деформированных металлах при их отжиге. Ответственными механизмами при этом являются напряжения 3-го рода, возникающие за счет изменения статических смещений атомов из положений равновесия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Review of the Cold Atmospheric Plasma Technology Application in Food, Disinfection, and Textiles: A Way Forward for Achieving Circular Economy / R. R. Reema [et al.] // *Frontiers in Physics*. 2022. Vol. 10. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.942952>.
2. Cold Atmospheric Plasma: A Powerful Tool for Modern Medicine / D. Braný [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. Vol. 21, No 8. P. 2932. <https://doi.org/10.3390/ijms21082932>.
3. Влияние режимов воздействия плазмы высокочастотного емкостного разряда на стимуляцию всхожести и фитосанитарное состояние семян / И. И. Филатова, В. В. Ажаронко, С. В. Гончарик [и др.] // *Журнал прикладной спектроскопии*. 2014. Т. 81, № 2. С. 256–262.
4. Zendeenam, A. Employing Cold Atmospheric Plasma (Ar, He) on Ag thin Film and their Influences on Surface Morphology and Anti-Bacterial Activity of Silver Films for Water Treatment / A. Zendeenam, J. Ghasemi, A. Zendeenam // *International Nano Letters*. 2018. No 8. P. 157–164. <https://doi.org/10.1007/s40089-018-0240-8>.
5. Amini, A. Changes of the TiO_2 thin Film Electro-Optical Properties in the Ar and N_2 Glow Discharge Plasma due to Effects of the Electric Field in Plasma's Sheath / A. Amini, M. S. Zakerhamidi, S. Khorram // *Physica B: Condensed Matter*. 2021. Vol. 612. P. 41282. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2021.412820>.
6. Surface Modification of ZnMgAl-Coated Steel by Dielectric-Barrier Discharge Plasma / S. Knust, [et al.] // *RSC Advances*. 2019. Vol. 9, No 60. P. 35077–35088. <https://doi.org/10.1039/c9ra07378g>.
7. The Effect of Low Temperature Nonequilibrium Air Plasma on the Structure and Properties of Copper and Chromium Electrodeposited Coatings / A. G. Anisovich, [et al.] // *International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology*. 2016. No 2. P. 42–49.
8. Трансформация структуры гальванического покрытия меди после воздействия плазмы тлеющего разряда / А. Г. Анисович [и др.] // *Электронная обработка материалов*. 2019. Т. 55. № 5. С. 31–37. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3522287>.
9. Григорьев, А. Я. Физика и микрогеометрия технических поверхностей / А. Я. Григорьев. Минск: Беларуская навука, 2016. 247 с.

10. Изменение структуры поверхности гальванических покрытий при воздействии холодной плазмы воздуха / А. Г. Анисович [и др.] // *Литье и металлургия*. 2019. № 2. С. 85–91. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-2-85-91>.
11. Липский, А. Э. Оптимальные режимы упрочняющей обработки рабочих поверхностей инструментов из быстрорежущих сталей на основе способа их модифицирования потоком низкоэнергетической плазмы / А. Э. Липский // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2007. № 4. С. 64–71.
12. Барвинок, В. А. Влияние низкоэнергетической плазменной обработки на физико-механические свойства и структуру алюминия и его сплавов / В. А. Барвинок, А. В. Рясный // *Вестник Самарского государственного технического университета*. Сер. Физико-математические науки. 2009. Т. 19, № 2. С. 193–199.
13. Plasma defect – engineering of bulk oxygen – deficient zirconia / B. Dashbozorg [et al.] // *Acta Materialia*. 2024. Vol. 262. P. 119457. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.119457>.
14. Plasmas and Acoustic Waves to Pattern the Nanostructure and Chemistry of thin Films / V. Rico [et al.] // *Acta Materialia*. 2023. Vol. 255. Art. 119058. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.119058>.
15. Bukharov, S. N. Tribotechnical Characteristics of Friction Polymer Composites / S. N. Bukharov, A. G. Anisovich, I. I. Filatova // *Journal of Friction and Wear*. 2021. Vol. 42, No 3. P. 139–145. <https://doi.org/10.3103/s106836662103003x>.
16. Лайнер, Д. И. Способ построения нормированных обратных полюсных фигур / Д. И. Лайнер, А. И. Радишевский, И. А. Комарова // *Кристаллография*. 1974. Т. 19, № 5. С. 942–945.
17. Трансформация структуры меди под воздействием неравновесной низкотемпературной плазмы воздуха / В. В. Ажаронк [и др.] // *Инженерно-физический журнал*. 2013. Т. 86, № 4. С. 731–738.
18. Вассерман, Г. Текстуры металлических материалов / Г. Вассерман, И. Гревен. М.: Металлургия, 1969. 654 с.
19. Русаков, А. А. Рентгенография металлов / А. А. Русаков. М.: Атомиздат, 1977. 480 с.
20. Изменение ориентировок текстуры электролитического никеля при обработке холодной плазмой воздуха / А. Г. Анисович [и др.] // *Литье и металлургия*. 2019. № 4. С. 107–114. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-4-107-114>.
21. Анисович, А. Г. Закономерности процессов структурообразования и термодинамический аспект организации структуры металлов при нестационарных энергетических воздействиях: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07; 01.04.14 / Анисович А. Г. Минск, 2005.
22. Ван Бюрен, К. Х. Дефекты в кристаллах / К. Х. Ван Бюрен. М.: Изд-во иностранной лит., 1962. 610 с.
23. Тофпенек, Р. Л. Разупрочняющие процессы в стареющих сплавах / Р. Л. Тофпенек. Минск: Наука и техника, 1979. 183 с.
24. Анисович, А. Г. Особенности релаксационного процесса в металлах при импульсных воздействиях / А. Г. Анисович // *Вестн. НАН Беларуси*. Сер. физ.-техн. наук. 2015. № 1. С. 16–21.
25. Анисович, А. Г. Изменение напряженного состояния медных сплавов под воздействием холодной плазмы воздуха / А. Г. Анисович, И. И. Филатова, С. В. Гончарик // *Инженерно-физический журнал*. 2020. Т. 93, № 6. С. 1637–1644.
26. Жернов, А. П. Влияние композиции изотопов на фоновые моды. Статические атомные смещения в кристаллах / А. П. Жернов, А. В. Инюшкин // *Успехи физических наук*. 2001. Т. 171, № 8. С. 827–854. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0171.200108b.0827>.
27. Peng, F. Modulated Fluctuation of atomic Displacement in a Crystal with a Single Impurity / F. Peng // *Physica B: Condensed Matter*. 2006. Vol. 373, No 2. P. 194–197. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2005.11.166>.
28. Cayron, C. Continuous Atomic Displacements and Lattice Distortion During fcc–bcc Martensitic Transformation / C. Cayron // *Acta Materialia*. 2015. Vol. 96. P. 189–202. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.06.010>.
29. Михайлов, Ю. Н. Длинноволновые статические смещения атомов в сплавах γ – FeNi / Ю. Н. Михайлов, С. Ф. Дубинин // *Физика твердого тела*. 2004. Т. 46, вып. 12. С. 2113–2118.
30. Анисович, А. Г. Изменение напряженного состояния электролитического никеля при воздействии плазмы / А. Г. Анисович // *Журнал Белорусского государственного университета*. Физика. 2021. № 1. С. 82–89. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2021-1-82-89>.
31. Хадиров, И. Г. Температура Дебая и статические смещения атомов в нестехиометрическом карбиде титана $TiC_{0.70}$ / И. Г. Хадиров, А. С. Парпиев // *Альтернативная энергетика и экология*. 2010. Т. 85, № 5. С. 31–34.

Поступила 10.04.2025

Подписана к печати 23.06.2025

Опубликована онлайн 31.07.2025

REFERENCES

1. Reema, Khanikar R. R., Bailung H., Sankaranarayanan K. (2022) Review of the Cold Atmospheric Plasma Technology Application in Food, Disinfection, and Textiles: A Way Forward for Achieving Circular Economy. *Frontiers in Physics*, 10. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.942952>.
2. Braný D., Dvorská D., Halašová E., Škovierová H. (2020) Cold Atmospheric Plasma: A Powerful Tool for Modern Medicine. *International Journal of Molecular Sciences*, 21 (8), 2932. <https://doi.org/10.3390/ijms21082932>.
3. Filatova I. I., Azharonok V. V., Goncharik S. V., Lushkevich V. A., Zhukovsky A. G., Gadzhieva G. I. (2014) Effect of RF Plasma Treatment on the Germination and Phytosanitary State of Seeds. *Journal of Applied Spectroscopy*, 81 (2), 250–256. <https://doi.org/10.1007/s10812-014-9918-5>.
4. Zendehtnam A., Ghasemi J., Zendehtnam A. (2018) Employing Cold Atmospheric Plasma (Ar, He) on Ag thin Film and their Influences on Surface Morphology and Anti-bacterial Activity of Silver Films for Water Treatment. *International Nano Letters*, 8 (3), 157–164. <https://doi.org/10.1007/s40089-018-0240-8>.
5. Amini A., Zakerhamidi M. S., Khorram S. (2021) Changes of the TiO_2 thin Film Electro-Optical Properties in the Ar and N_2 Glow Discharge Plasma due to Effects of the Electric Field in Plasma's Sheath. *Physica B: Condensed Matter*, 612, 412820. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2021.412820>.
6. Knust S., Kuhlmann A., Arcos T. de los, Grundmeier G. (2019) Surface Modification of ZnMgAl-Coated Steel by Dielectric-Barrier Discharge Plasma. *RSC Advances*, 9 (60), 35077–35088. <https://doi.org/10.1039/c9ra07378g>.

7. Anisovich A. G., Azharonok V. V., Gologan V. F., Bobanova Zh. I. (2016) The Effect of Low Temperature Nonequilibrium Air Plasma on the Structure and Properties of Copper and Chromium Electrodeposited Coatings. *International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology*, (2), 42–49.
8. Anisovich A. G., Urban T. P., Tereshko I. V., Logvin V. A., Gologan V. F., Bobanova Zh. I. (2019) Transformation of the Structure of the Galvanic Coating of Copper after Exposure to Glow Discharge Plasma. *Elektronnaya Obrabotka Materialov = Electronic Processing of Materials*, 55 (5), 31–37 (in Russian).
9. Grigoriev A. Ya. (2016) *Physics and Microgeometry of Technical Surfaces*. Minsk, Belarusskaya Navuka Publ. 247 (in Russian).
10. Anisovich A. G., Filatova I. I., Goncharik S. V., Gologan V. F., Bobanova Zh. I. (2019) Change of the Structure of the Surface of Galvanic Coatings under Exposure to Cold Air Plasma. *Litiya i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*, (2), 85–91 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-2-85-91>.
11. Lipsky A. E. (2007) Optimal Modes of Hardening Treatment of Working Surfaces of Tools Made of High-Speed Steels Based on the Method of their Modification by a Low-Energy Plasma Flow. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo Universiteta = Belarusian-Russian University Bulletin*, (4), 64–71.
12. Barvinok V. A., Rysany A. V. (2009) The Influence of Low-Energy Plasma Treatment on the Physical and Mechanical Properties and Structure of Aluminum and Its Alloys. *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Fiziko-Matematicheskie Nauki = Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences*, 19 (2), 193–199 (in Russian).
13. Dashtbozorg B., Shi F., Tagliaferro A., Abela S., Falticeanu L., Dong H. (2024) Plasma Defect-Engineering of Bulk Oxygen-Deficient Zirconia. *Acta Materialia*, 262, 119457. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.119457>.
14. Rico V., Regodón G. F., Garcia-Valenzuela A., Alcaide A. M., Oliva-Ramirez M., Rojas T. C., Alvarez R., Palomares F. J., Palmero A., Gonzalez-Elise A. R. (2023) Plasmas and Acoustic Waves to Pattern the Nanostructure and Chemistry of thin Films. *Acta Materialia*, 255, 119058. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.119058>.
15. Bukharov S. N., Anisovich A. G., Filatova I. I., Akhmetov T. A., Sergienko V. P., Grigoriev A. Ya. (2021). Influence of Treatment with Non-Equilibrium Low-Temperature Plasma on Dynamic Mechanical and Tribotechnical Characteristics of Friction Polymer Composites. *Journal of Friction and Wear*, 42 (3), 139–145. <https://doi.org/10.3103/s106836662103003x>.
16. Layner D. I., Radishevsky A. I., Komarova I. A. (1974) Method for Constructing Normalized Inverse Pole Figures. *Kristallografiya = Soviet Physics. Crystallography*, 19 (5), 942–945 (in Russian).
17. Azharonok V. V., Anisovich A. G., Basalai A. V., Goncharik S. V., Filatova I. I., Chubrik N. I. (2013). Transformation of Copper Structure on Exposure to a Nonequilibrium Low-Temperature Air Plasma. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 86 (4), 781–788. <https://doi.org/10.1007/s10891-013-0895-y>.
18. Wassermann G., Grewen I. (1969) *Textures of Metal Materials*. Moscow, Metallurgiya Publ. 654 (in Russian).
19. Rusakov, A.A. X-ray diffraction of metals. M.: Atomizdat, 1977. 480 (in Russian).
20. Anisovich A. G., Urban T. P., Filatova I. I., Buynitskaya A. S., Goncharik S. V. (2020) Changer in the Texture Orientation of Electrolytic Nickel by Cold Air Plasma. *Litiya i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*, (4), 107–114. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-4-107-114> (in Russian).
21. Anisovich A. G. (2005) *Regularities of Structure Formation Processes and Thermodynamic Aspect of Metal Structure Organization under Non-Stationary Energy Effects* [Dissertation]. Minsk (in Russian).
22. Van Bueren H. G. (1960) *Imperfections in Crystals*. Amsterdam, North-Holland publ.
23. Tofpenets R. L. (1979) *Weakening Processes in Aging Alloys*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 183 (in Russian).
24. Anisovich A. G. (2015) Particularities of Relaxation Process in Metals Subjected to Pulses. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, (1), 16–21 (in Russian).
25. Anisovich A. G., Filatova I. I., Goncharik S. V. (2020) Variation in the Stress State of Copper Alloys Under the Action of Cold Air Plasma. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 93 (6), 1583–1590. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02263-9>.
26. Zhernov A. P., Inyushkin A. V. (2001) Effect of Isotopic Composition on Phonon Modes. Static Atomic Displacements in Crystals. *Physics-Uspekhi*, 44 (8), 785–811. <https://doi.org/10.1070/pu2001v044n08abeh000965>.
27. Peng F. (2006) Modulated Fluctuation of Atomic Displacement in a Crystal with a Single Impurity. *Physica B: Condensed Matter*, 373 (2), 194–197. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2005.11.166>.
28. Cayron C. (2015) Continuous Atomic Displacements and Lattice Distortion During fcc–bcc Martensitic Transformation. *Acta Materialia*, 96, 189–202. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.06.010>.
29. Mikhailov Yu. N., Dubinin S. F. (2004) Long-Wavelength Static Atomic Displacements in γ -FeNi Alloys. *Physics of the Solid State*, 46 (12), 2185–2190. <https://doi.org/10.1134/1.1841377>.
30. Anisovich A. G. (2021) Change of Tension State of Electrolytic Nickel Under Exposure to Plasma. *Journal of the Belarusian State University. Physics*, (1), 82–89. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2021-1-82-89> (in Russian).
31. Khadirov I. G., Parpiev A. S. (2010) Debye Temperature and Static Displacements of Atoms in Non-Stoichiometric Titanium Carbide $\text{TiC}_{0.70}$. *Alternativnaya Energetika i Ekologiya = Alternative Energy and Ecology*, 85 (5), 31–34 (in Russian).

Received: 10.04.2025

Accepted: 23.06.2025

Published online: 31.07.2025

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-278-283>

УДК 62-757.73

Повышение эффективности лазерной резки стальных материалов путем предварительной обработки гидроабразивным способом

Докт. техн. наук, проф. И. В. Качанов¹⁾, канд. техн. наук А. В. Филипчик²⁾,
инженеры И. М. Шаталов¹⁾, Д. М. Иванов²⁾, канд. техн. наук А. Н. Жук¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова
Белорусского государственного университета (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Высокая эффективность современных методов изготовления деталей машин и механизмов тесно связана с качеством предварительной очистки металлических поверхностей от коррозии. Добиться необходимого уровня обработки удастся благодаря применению струйных технологических решений, особенно в условиях лазерной резки, используемой на машиностроительных предприятиях Республики Беларусь. Одним из ключевых показателей, определяющих результативность лазерной обработки металлов, является скорость лазерной резки. В данной статье рассматривается инновационный подход к струйной очистке металлических материалов от коррозии с последующим применением в процессе лазерной резки. Отличительная особенность предложенного метода гидроабразивной обработки заключается во введении в высоконапорную струю воды специальных компонентов – бентонитовой глины, кальцинированной соды и сажу. Это обеспечивает не только эффективное удаление коррозии, но и формирует поверхность, оптимальную для лазерной резки. С целью анализа влияния параметров гидроабразивной обработки на скорость лазерной резки проведены промышленные испытания трех групп образцов из сталей марок Ст3, Ст20 и Ст45. Размеры образцов составляли 200×200 мм при толщине листа в диапазоне $S = 2\text{--}12$ мм. На основе результатов экспериментальных исследований была разработана модернизированная технология гидроабразивной очистки металлических материалов, предназначенная для удаления коррозии с последующей их обработкой методом лазерной резки. В предложенной технологии применяется рабочая жидкость, содержащая следующие компоненты: бентонитовую глину ($K_b = 1,5\text{--}2,5\%$), кальцинированную соду ($K_{\text{к.с}} = 1,8\text{--}2,2\%$), сажу ($K_{\text{сж}} = 11\text{--}13\%$) и воду. Применение данной рабочей жидкости позволило достичь повышения скорости лазерной резки на 8–12 % по сравнению с результатами, полученными при использовании аналогичной жидкости, содержащей полиакриламид вместо сажу, при этом без необходимости введения дополнительных технологических операций.

Ключевые слова: лазерная резка, струя, бентонитовая глина, металл, машины, механизмы, технология, машиностроение, механика, коррозия, покрытие, скорость, очистка, материал

Для цитирования: Повышение эффективности лазерной резки стальных материалов путем предварительной обработки гидроабразивным способом / И. В. Качанов [и др.] // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 4. С. 278–283. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-278-283>

Improving the Efficiency of Laser Cutting of Steel Materials by Pre-Treatment with Waterjet Method

I. V. Kachanov¹⁾, A. V. Filipchik²⁾, I. M. Shatalov¹⁾, D. M. Ivanov²⁾, A. N. Zyk¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The high performance of modern methods for manufacturing machine and mechanism components largely depends on the effective removal of corrosion from metallic surfaces. The required surface quality is achieved through jet-based

Адрес для переписки

Качанов Игорь Владимирович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 249-56-77
hidrokaf@bntu.by

Address for correspondence

Kachanov Igor V.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 249-56-77
hidrokaf@bntu.by

technological processes, particularly in laser cutting operations performed under industrial conditions at mechanical engineering enterprises in the Republic of Belarus. One of the key parameters used to assess the efficiency of laser treatment of metallic surfaces is the laser cutting speed. This study presents an innovative method of jet-based corrosion removal for metallic materials, followed by their utilization in the laser cutting operations. A distinctive feature of the proposed hydro-abrasive technique is the introduction of special components – bentonite clay, calcined soda, and carbon black – into a high-pressure water jet. This formulation not only ensures corrosion elimination but also conditions the surface for subsequent laser cutting. To investigate the influence of various hydro-abrasive processing parameters on laser cutting speed, industrial tests were conducted on three groups of samples made of steel grades St3, St20, and St45. The dimensions of each sample were 200×200 mm with a sheet thickness in the range $S = 2\text{--}12$ mm. Based on the results of experimental studies, an advanced hydro-abrasive cleaning technology was developed for corrosion removal from metallic materials intended for laser cutting applications. The proposed method uses a working fluid containing the following components: bentonite clay ($C_b = 1.5\text{--}2.5\%$), calcined soda ($C_{c.s.} = 1.8\text{--}2.2\%$), carbon black ($C_{cb} = 11\text{--}13\%$), and water. The use of this working fluid made it possible to increase the laser cutting speed by 8–12 % compared to the results obtained when using an alternative fluid containing polyacrylamide instead of carbon black – without the need to introduce additional processing operations.

Keywords: laser cutting, jet, bentonite clay, metal, machinery, mechanisms, technology, mechanical engineering, mechanics, corrosion, coating, speed, cleaning, material

For citation: Kachanov I. V., Filipchik A. V., Shatalov I. M., Ivanov D. M., Zyk A. N. (2025) Improving the Efficiency of Laser Cutting of Steel Materials by Pre-Treatment with Waterjet Method. *Science and Technique*. 24 (4), 278–283. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-278-283> (in Russian)

Введение

Высокое качество современных технологий изготовления деталей машин и механизмов во многом зависит от эффективной очистки металлических поверхностей от коррозии с последующей их защитой. Требуемое качество поверхности при этом достигается за счет использования струйных технологических процессов, например при лазерной резке (ЛР) деталей в производственных условиях машиностроительных предприятий Республики Беларусь [1–4].

Важным параметром для оценки эффективности лазерной обработки металлических поверхностей считается скорость лазерной резки [4].

Наиболее широко распространенными методами струйной очистки металлических поверхностей от коррозии с последующим их применением для лазерной резки являются песко- и дробеструйная обработки. Воздействие этих процессов на металл осуществляется за счет кинетической энергии, которую создают сжатый воздух и абразивный материал – такие как стальная либо чугунная дробь, а также песок, стеклянные шарики, алмазная крошка, пемза, карбид бора и другие [4].

Однако очистка металлоизделий от коррозии с применением песко- и дробеструйных технологий сопровождается рядом негативных факторов, таких как повторная коррозия на

очищенной поверхности за счет воздействия кислорода из воздушной среды, возрастание температуры в зоне контакта абразивных частиц с металлической поверхностью, при этом песок и дробь остаются на обработанной поверхности материала, что приводит к дополнительным операциям по очистке [4].

Для устранения перечисленных выше недостатков используются гидравлические методы, которые позволяют эффективно решить проблемы пылеобразования в воздухе и повышения температуры в зоне обработки. Такие методы включают гидродинамическую, кавитационную и гидроабразивную очистку.

Гидродинамические методы очистки заключаются в подаче воды на очищаемую поверхность металлоизделия с различными показателями давления [1–3, 5]:

- низкий уровень – до 1 МПа;
- средний уровень – от 1 до 5 МПа;
- высокий уровень – от 5 до 60 МПа.

Технология гидродинамической очистки исключает повреждения обрабатываемых металлоизделий и обеспечивает более высокое качество поверхностей по сравнению с такими методами механической обработки, как фрезерование или шарошение [1–3, 5].

Однако к недостаткам данного метода относятся:

- высокая стоимость оборудования;
- значительное потребление энергии;

- ускоренный износ струеформирующих устройств;

- необходимость применения дополнительных методов защиты от коррозии (защитные покрытия, антикоррозионные составы).

Кавитационная очистка использует энергию схлопывания парогазовых пузырьков при контакте с очищаемой поверхностью, что позволяет разрушать загрязнения. Однако этот метод также имеет недостатки [1–3, 5]:

- повышенный риск повторной коррозии;
- необходимость пассивирования очищенных поверхностей;
- усиленный износ оборудования.

Гидроабразивная очистка [5] с применением в струе воды бентонитовой глины, кальцинированной соды, полиакриламида является современным способом для устранения ржавчины, нагара и прочих загрязнений. В процессе обработки частицы абразива бентонитовой глины действуют в струе воды, увеличивая эффективность очистки и образуя защитное пленочное покрытие.

Преимущества гидроабразивной обработки:

- отсутствие пылеобразования;
- эффективный теплоотвод за счет циркуляции охлаждающей жидкости (воды);
- образование защитного пленочного покрытия.

Недостатком данной гидроабразивной технологии следует считать применение в составе рабочей жидкости полиакриламида, который легко подвергается деструкции в сопле-кавитаторе, что приводит к снижению эффективности силового воздействия струи на очищаемую поверхность.

Основная часть

На кафедре «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» БНТУ, в сотрудничестве с кафедрой «Энергоэффективных технологий» МГЭИ имени А. Д. Сахарова, проведены исследования нового способа очистки металлических материалов от коррозии с последующим использованием под лазерную резку. Данный метод гидроабразивной обработки (ГАО) отличается тем,

что за счет добавления специальных компонентов в высоконапорную струю воды (бентонит, кальцинированная сода, сажа) обеспечивается процесс очистки от коррозии с формированием поверхности под операцию лазерной резки [6]. При этом указанные компоненты в составе рабочей струи решали следующие задачи:

- бентонит (ГОСТ 28177–89) с концентрацией $K_6 = 1,5\text{--}2,5\%$ производил усиление силового воздействия;

- кальцинированная сода (ГОСТ 5100–85) с концентрацией $K_{\text{к.с}} = 1,8\text{--}2,2\%$ поддерживает рабочий раствор с бентонитовой глиной во взвешенном состоянии;

- сажа (ГОСТ 7885–86) с концентрацией $K_{\text{сж}} = 11\text{--}13\%$ способствует более интенсивному и преждевременному формированию кавитационных эффектов, что, в свою очередь, усиливает силовое воздействие струйного потока на очищаемую поверхность;

- вода исключает запыленность воздуха и снижает температуру в зоне обработки.

Промышленное использование процесса лазерной резки металлических материалов определяется такими характеристиками, как величина скорости резания $v_{\text{лр}}$, а также чистота обработанной поверхности, выражающаяся в отсутствии грата [4, 5].

В рамках производственной деятельности предприятия «Агродока» на высокотехнологичной установке HYPER GEAR 510 японской компании Yamazaki Mazak Optronics Corp (рис. 1) были выполнены экспериментальные работы, направленные на изучение воздействия процесса гидроабразивной очистки, с применением рабочей жидкости согласно составу [6], на изменение скорости лазерной резки.

Для изучения влияния различных параметров гидроабразивной обработки на скорость лазерной резки металлических поверхностей проведены производственные испытания трех групп образцов из сталей марок Ст3, Ст20 и Ст45. Образцы имели размеры 200×200 мм и толщину $S = 2\text{--}12$ мм. Данные марки сталей широко применяются для производства машин, механизмов, сварных конструкций в машиностроительном производстве, обладают высокими по-

казателями прочности, твердости, а также невысокой стоимостью.



Рис. 1. Внешний вид комплекса лазерной резки HYPER GEAR 510: 1 – дверь закрытия рабочей зоны; 2 – паллета; 3 – модуль лазерного станка

Fig. 1. External view of the HYPER-GEAR-510 laser cutting complex: 1 – the door closing the work area; 2 – pallets; 3 – laser machine module

Первую группу составляли образцы, не очищенные от продуктов коррозии. Результаты представлены на рис. 2.

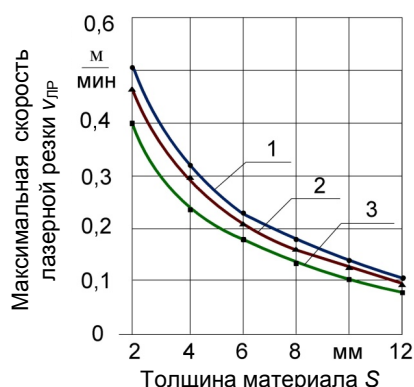


Рис. 2. Зависимость максимальной скорости лазерной резки от толщины листа (отсутствие очистки металла от продуктов коррозии) на комплексе HYPER GEAR 510: 1 – Ст3; 2 – Ст20; 3 – Ст45

Fig. 2. Dependency of the maximum laser cutting speed on the sheet thickness (no cleaning of the surface from corrosion products) on the complex HYPER-GEAR-510: 1 – St3; 2 – St20; 3 – St45

Вторую группу составляли образцы, очищенные до $R_a = 5\text{--}20$ мкм по гидроабразивной технологии [5], рабочая жидкость которой содержала бентонит ($K_b = 1,5\text{--}2,5$ %), полиакриламид ($K_{п} = 10^{-6}\text{--}10^{-4}$ %), кальцинированную соду ($K_{к.с} = 1,8\text{--}2,2$ %), остальное – вода. Рас-

стояние от сопла до очищаемой поверхности $L = 20\text{--}40$ мм, диаметр сопла $d_c = 1$ мм, скорость струи $v_{стр} = 300$ м/с. Результаты представлены на рис. 3.

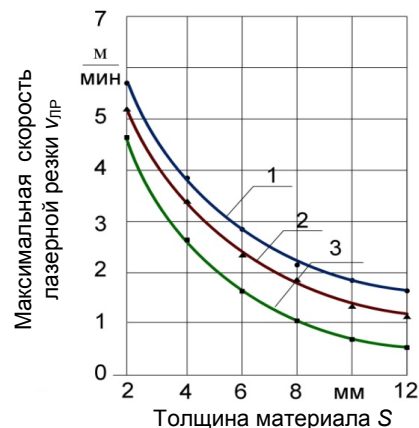


Рис. 3. Зависимость максимальной скорости лазерной резки от толщины листа (образцы, очищенные по гидроабразивной технологии [5]) на комплексе HYPER GEAR 510: 1 – Ст3; 2 – Ст20; 3 – Ст45

Fig. 3. Dependence of the maximum laser cutting speed on the sheet thickness (samples cleaned using waterjet technology [5]) on the complex HYPER-GEAR-510: 1 – St3; 2 – St20; 3 – St45

Третью группу составляли образцы, очищенные до $R_a = 5\text{--}20$ мкм по гидроабразивной технологии [6], рабочая жидкость которой содержала бентонитовую глину ($K_b = 1,5\text{--}2,5$ %), кальцинированную соду ($K_{к.с} = 1,8\text{--}2,2$ %), сажу ($K_{сж} = 11\text{--}13$ %), остальное – вода. Расстояние от сопла до очищаемой поверхности $L = 20\text{--}40$ мм, диаметр сопла $d_c = 1$ мм, скорость струи $v_{стр} = 300$ м/с. Результаты исследований приведены на рис. 4.

Графики 1–3, представленные на рис. 2–4, были построены на основе экспериментальных данных, полученных для стальных заготовок различных марок (1 – Ст3; 2 – Ст20; 3 – Ст45) при толщине листа от 2 до 12 мм.

Условием проведения испытаний являлось достижение максимальной скорости лазерной резки на установке HYPER GEAR 510 при полном отсутствии грата на линии реза. Для получения таких результатов применялись предварительно очищенные от коррозии образцы с параметрами шероховатости поверхности в диапазоне $Ra = 5\text{--}20$ мкм.

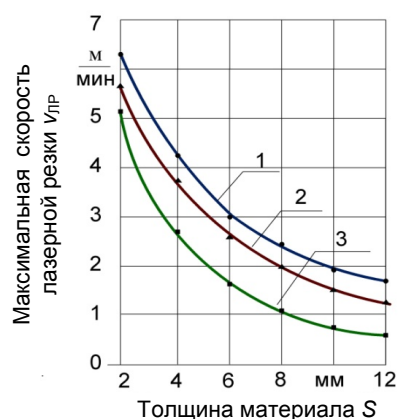


Рис. 4. Зависимость максимальной скорости лазерной резки от толщины листа (образцы, очищенные по гидроабразивной технологии [6]) на комплексе HYPER GEAR 510: 1 – Ст3; 2 – Ст20; 3 – Ст45

Fig. 4. Dependence of the maximum laser cutting speed on the sheet thickness (samples cleaned using waterjet technology [6]) on the complex HYPER-GEAR-510: 1 – St3; 2 – St20; 3 – St45

Результаты исследования и их обсуждение

В результате анализа проведенных испытаний установлено, что для отдельных групп образцов, таких как сталь марки Ст45 с толщиной листа $S = 4$ мм, наблюдалось значительное повышение скорости лазерной резки – от 0,26 м/мин (согласно кривой 3 на рис. 2) до 2,8 м/мин (кривая 3 на рис. 4). Данные значения были получены при условии отсутствия грат на боковой поверхности линии реза.

Сравнительный анализ образцов второй и третьей групп по параметру скорости лазерной резки показывает, что использование гидроабразивной очистки с применением водного раствора рабочей смеси, включающей бентонитовую глину, кальцинированную соду и сажу [6–10], в качестве предварительной обработки поверхности способствует увеличению скорости лазерной резки в среднем на 8–12 %.

Повышение скорости лазерной резки можно объяснить тем, что при использовании сажи в составе рабочей жидкости обеспечивается необходимое силовое воздействие на очищаемый металлический материал и одновременно с этим формируется поверхность с оптимальными светопоглощательными свойствами.

ВЫВОДЫ

1. На основе проведенных экспериментальных исследований, а также патентного источника [6] разработана усовершенствованная технология гидроабразивной очистки, предназначенная для удаления коррозии с металлических материалов с их дальнейшим использованием в процессах лазерной резки.

2. Данная технология, предполагающая использование рабочей жидкости, приготовленной на основе бентонитовой глины ($K_6 = 1,5–2,5$ %), кальцинированной соды ($K_{к.с} = 1,8–2,2$ %), сажи ($K_{сж} = 11–13$ %) и воды, позволила повысить скорость лазерной резки до 8–12 % (в сравнении с данными [5]) без выполнения дополнительных технологических операций.

ЛИТЕРАТУРА

- Донских, С. А. Основы современного материаловедения: учебное пособие для средних профессиональных и высших учебных заведений / С. А. Донских, В. Н. Сёмин; под общ. ред. С. А. Донских. 3-е изд., стер. М.: Директ-Медиа, 2025. 174 с.
- Шрубченко, И. В. Основы технологии сборки в машиностроении: учебное пособие / И. В. Шрубченко, Т. А. Дуюн, А. А. Погонин [и др.]. М.: ИНФРА-М, 2025. 235 с.
- Свиуднович, Н. А. Материаловедение. Перспективные машиностроительные и специальные материалы (с электронным приложением): учебное пособие / Н. А. Свиуднович, В. М. Константинов, П. А. Витязь [и др.]; под ред. Н. А. Свиудновича, В. М. Константинова. Минск: РИВШ, 2024. 628 с.
- Григорьянц, А. Г. Лазерная резка металлов / А. Г. Григорьянц, А. А. Соколов. М.: Директ-Медиа, 2021. 128 с.
- Применение технологии гидроабразивной очистки металлических поверхностей от коррозии для повышения скорости лазерной резки / А. В. Филиппик, В. С. Ковалевич, И. В. Качанов, И. М. Шаталов // Вестник ВГТУ. 2022. № 2. С. 64–70.
- Патент BY 17688, МПК B08B 3/04 (2006.01). Состав для подготовки металлической поверхности под лазерную резку: № а 20111188; заявлено 12.09.2011; опубл. 30.04.2013 / И. В. Качанов, А. В. Филиппик, А. С. Мойса, В. Н. Яглов, Я. В. Филиппик, В. В. Шаповалов; заявитель БГАТУ. URL: <https://by.patents.su/3-17688-sostav-dlya-podgotovki-metallicheskojj-poverhnosti-pod-lazernuyu-rezku.html>.
- Кельцев, В. В. Сажа: свойства, производство и применение / В. В. Кельцев, П. А. Теснер. Л.–М.: Гостоптехиздат, 1952. 172 с.

8. Печковская, К. А. Сажа как усилитель каучука / К. А. Печковская. М.: Химия, 1968. 215 с.
9. Зуев, В. П. Производство сажи: учеб. пособие / В. П. Зуев, В. В. Михайлов. М.: Химия, 1965. 329 с.
10. Буканов, А. М. Технический углерод: учеб. пособие / А. М. Буканов, Н. Я. Овсянников, Л. А. Ковалёва. М.: МИРЭА, 2018. 79 с.

Поступила 30.04.2025

Подписана в печать 02.07.2025

Опубликована онлайн 31.07.2025

REFERENCES

1. Donskikh S. A., Syomin V. N. (2025) *Fundamentals of Modern Materials Science: Teaching Aid for Secondary Vocational and Higher Education Institutions*. 3rd ed. Moscow, Direkt-Media Publ. 174 (in Russian).
2. Shrubchenko I. V., Duyun T. A., Pogonin A. A., Khurtasenko A. V., Voronkova M. N. (2025) *Fundamentals of Assembly Technology in Mechanical Engineering*. Moscow, INFRA-M Publ. 235 (in Russian).
3. Svidunovich N. A., Konstantinov V. M., Vityaz' P. A., Voitov I. V., Kuis D. V., Myurek M. N., Grigor'ev I. E. (2024) *Materials Science. Prospective Mechanical Engineering and Special Materials (with Electronic Appendix)*. Minsk, National Institute for Higher Education. 628 (in Russian).
4. Grigoryants A. G., Sokolov A. A. (2021) *Laser Cutting of Metals*. Moscow, Direkt-Media Publ. 128 (in Russian).
5. Filipchik A. V., Kovalevich V. S., Kachanov I. V., Shatalov I. M. (2022) Application of Waterjet Cleaning Technology of Metal Surfaces from Corrosion to Increase the Speed of Laser Cutting. *Vestnik VGTU = Bulletin of Vitebsk State Technological University*, (2), 64–70 (in Russian).
6. Kachanov I. V., Filipchik A. V., Moysa A. S., Yaglov V. N., Filipchik Ya. V., Shapovalov V. V. (2013) *Composition for Preparing Metal Surfaces for Laser Cutting*. Patent BY 17688 (in Russian).
7. Keltsev V. V., Tesner P. A. (1952) *Soot: Properties, Production and Application*. Leningrad, Moscow, Gostoptekhizdat Publ. 172 (in Russian).
8. Pechkovskaya K. A. (1968) *Carbon Black as A Rubber Reinforcer*. Moscow, Khimiya Publ. 215 (in Russian).
9. Zuev V. P., Mikhailov V. V. (1965) *Carbon Black Production*. Moscow, Khimiya Publ. 329 (in Russian).
10. Bukanov A. M., Ovsyannikov N. Ya., Kovalyova L. A. (2018) *Carbon Black*. Moscow, MIREA. 79 (in Russian).

Received: 30.04.2025

Accepted: 02.07.2025

Published online: 31.07.2025

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-284-291>

UDC 620.22

Enhancing Sustainability in Titanium Machining: Simulated and Experimental Insights into PVD & CVD Carbide Inserts Applications

S. B. Ambekar¹⁾, S. S. Pawar²⁾, A. S. Dube¹⁾, D. P. Patil¹⁾, A. Kumar³⁾

¹⁾Sandip Institute of Engineering and Management (Nashik, Republic of India),

²⁾RKDF Institute of Science & Technology, Sarvepalli Radhakrishnan University (Madhya Pradesh, Bhopal, Republic of India),

³⁾COEP Technological University (Pune, Republic of India)

Abstract. In this article we proposed, an extensive investigation of environmentally friendly methods for machining titanium alloy (Ti-6Al-4V), a vital component of the aerospace and biomedical sectors, is presented. The novelty of the proposed work is to improve sustainability by applying various technologies, particularly carbide inserts made by Physical Vapour Deposition (PVD) and Chemical Vapour Deposition (CVD). These components are essential for increasing machining productivity and reducing environmental impact. Moreover, to optimise the entire process, the experimental inquiry entails a methodical analysis of machining parameters, such as cutting speed, feed rate, and depth of cut. Apart from these we have also provides the superior machining performance with lower energy use and good surface roughness is the novelty of the work. Moreover, this work emphasizes the importance of feed rate, cutting speed, and depth of cut in obtaining greater energy efficiency during titanium alloy machining. PVD and CVD carbide inserts provide consistent performance across a wide range of tools, increasing their dependability and making them attractive options for energy-efficient and environmentally friendly machining methods. Furthermore, compared to CVD-coated inserts, which achieve an optimal surface roughness of 0.232 μm under cutting parameters of 75 mm/min feed rate, 0.035 mm/rev feed, and a 0.5 mm depth of cut, PVD-coated inserts exhibit an optimal surface roughness of 0.258 μm under similar conditions. The consistent performance of both PVD and CVD carbide inserts across a range of tools enhances their reliability and usefulness in green manufacturing applications. The research takes into account the environmental effects of PVD and CVD carbide inserts, in line with the ideas of green manufacturing.

Keywords: metamaterial, directivity, gain, split ring

For citation: Ambekar S. B., Pawar S. S., Dube A. S., Patil D. P., Kumar A. (2025) Enhancing Sustainability in Titanium Machining: Simulated and Experimental Insights into PVD & CVD Carbide Inserts Applications // *Science and Technique*. 24 (4), 284–291. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-3-284-291>

Повышение устойчивости обработки титана: моделирование и экспериментальное изучение применения твердосплавных пластин с PVD- и CVD-покрытием

С. Б. Амбекар¹⁾, С. С. Павар²⁾, А. С. Дубе¹⁾, Д. П. Патиль¹⁾, А. Кумар³⁾

¹⁾Сандипский институт инженерии и менеджмента (Нашик, Республика Индия),

²⁾Институт науки и технологий РКДФ, Университет Сарвепалли Радхакришнана (Штат Мадхья-Прадеш, Бхопал, Республика Индия),

³⁾Технологический университет СОЕР (Пуна, Республика Индия)

Реферат. В данной статье представлено обширное исследование экологически безопасных методов обработки титанового сплава (Ti-6Al-4V), являющегося важнейшим материалом аэрокосмической и биомедицинской отраслей. Новизна предлагаемой работы заключается в повышении устойчивости путем применения различных технологий, в частности твердосплавных вставок, изготовленных методами физического осаждения из паровой фазы (PVD) и химического осаждения из паровой фазы (CVD). Эти компоненты необходимы для повышения производительности обработки и снижения воздействия на окружающую среду. Более того, для оптимизации всего процесса эксперимен-

Адрес для переписки

Дипак Пандуранг Патиль
Сандипский институт инженерии и менеджмента
«Дип Амрит», Плот № 46+47/3
Гаджанан Чоук, Индранagri, Каматваде
Нашик, Республика Индия
Пин код 422008
dipak.patil@siem.org.in

Address for correspondence

Dipak Pandurang Patil
Sandip Institute of Engineering and Management
“DEEP AMRIT”, Plot No 46+47/3
Gajanan Chowk, Indranagri, Kamatwade
Nashik (MS), Republic of India
Pin Code 422008
dipak.patil@siem.org.in

тальное исследование включает в себя методический анализ параметров обработки, таких как скорость резания, скорость подачи и глубина резания. Помимо этого, обеспечивается превосходная производительность обработки при меньшем потреблении энергии и хорошая шероховатость поверхности, что является новизной. Кроме того, в работе подчеркивается важность скорости подачи, скорости резания и глубины резания для повышения энергоэффективности при обработке титановых сплавов. Твердосплавные пластины с покрытием PVD и CVD обеспечивают стабильную производительность для широкого спектра инструментов, повышая их надежность и делая их привлекательными вариантами для энергоэффективных и экологически чистых методов обработки. По сравнению с пластинами с покрытием CVD, которые обеспечивают оптимальную шероховатость поверхности 0,232 мкм при скорости подачи 75 мм/мин, скорости резания 0,035 мм/об и глубине резания 0,5 мм, пластины с покрытием PVD имеют оптимальную шероховатость поверхности 0,258 мкм при аналогичных условиях. Стабильная производительность твердосплавных пластин с покрытием PVD и CVD при использовании различных инструментов повышает их надежность и эффективность в экологически чистых производственных условиях. В исследовании учитывается воздействие твердосплавных пластин с покрытием, нанесенным методом PVD и CVD, на окружающую среду в соответствии с требованиями экологичного производства.

Ключевые слова: метаматериал, направленность, прирост, разрезное кольцо

Для цитирования: Повышение устойчивости обработки титана: моделирование и экспериментальное изучение применения твердосплавных пластин с PVD- и CVD-покрытием / С. Б. Амбекар [и др.] // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 4. С. 284–291. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-284-291>

Introduction

Now a days, in the automobile and others industries work on the titanium alloy (Ti–6Al–4V). Furthermore, because of its remarkable strength-to-weight ratio, resistance to corrosion, and biocompatibility, titanium alloy (Ti–6Al–4V) is a key component in fields including aerospace and biomedical engineering [1–6]. But machining titanium alloys can be quite difficult, necessitating the use of cutting-edge tools and techniques to maximise productivity and minimise environmental damage. This research explores how to improve sustainability in titanium alloy machining by applying experimental insights into the application of Physical Vapour Deposition (PVD) and Chemical Vapour Deposition (CVD) carbide inserts [4]. This research is in response to the growing emphasis on sustainable manufacturing practices.

The investigation of environmentally friendly solutions has been prompted by the high energy consumption, significant material waste, and tool wear associated with traditional machining procedures. PVD and CVD carbide inserts are attractive options for sustainable titanium alloy machining since they are state-of-the-art materials with superior hardness and wear resistance [5, 7–9]. The objective of this research is to methodically examine how the performance of PVD and CVD carbide inserts is affected by machining factors such as feed rate, depth of cut, and cutting speed [10, 11].

This research aims to reconcile the goals of high machining efficiency with green production practices by assessing tool wear, surface polish,

and environmental effects [12–16]. It is anticipated that the study's conclusions will offer insightful information about how to best machine titanium alloys, adding to the growing body of knowledge about environmentally conscious manufacturing practices and meeting the changing demands of sectors that place a high priority on environmental responsibility [17, 18]. Moreover, Author Bhvnesh Bharwdwaj et al. in [19], presented a refined surface roughness prediction model for EN 353 end milling using Box-Cox transformation integrated with response surface methodology (RSM). This analysis was conducted in two phases. Initially, a quadratic model was formulated using response surface methodology (RSM) based on a central composite rotatable design (CCRD), considering feed rate, cutting speed, depth of cut, and nose radius as input parameters [19]. Further, in [20], authors discussed in this study, experimental investigations were carried out to examine the influence of tool geometry (radial rake angle and nose radius) and cutting conditions (cutting speed and feed rate) on machining performance during dry milling using four-fluted solid carbide end mill cutters coated with TiAlN. Moreover, Experimental Modeling of Surface Finish and Material Removal Rate in CNC Milling Processes reported in [21]. This study explores how various process parameters influence the material removal rate and surface roughness during the milling of SAE52100 tool steel [21].

Table 1 illustrates the Chemical composition of Ti–6Al–4V. In table 1 we mention the materials and its percentage values. However, Table 2 provides the Mechanical Properties of Ti–6Al–4V

materials. In Table 2 we gives the various mechanical propertits and its values of theses Ti-6Al-4V materials.

Table 1
Chemical composition of Ti-6Al-4V
(Ezugwu and Wang, 1997)

Element	%	Element	%
C	<0.08	V	3.5-4.5
Al	5.5-6.75	N	<0.05
Fe	<0.4	H	<0.01
O	<0.2		
Ti	Balances		

Table 2
Mechanical Properties of Ti-6Al-4V
(Machado and Wallbank, 1990)

Work piece material	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation %	Modulus of Elasticity (GPa)	Hardness (HRC)
Ti-6Al-4V	993	830	14	114	36

Table 3 illustrates the Thermal Properties of Ti-6Al-4V composite materials. Table 3 gives the properties and its values. Methodology and Experimental Setup.

Table 3
Thermal Properties of Ti-6Al-4V
(Ezugwu and Wang, 1997)

Properties	Values
Specific heat capacit	0.5263 J/g °C
Thermal conductivity	6.7 W/mk
Annealing temperature	700-785 °C
Melting point	1604-1660 °C
Solidus	1604 °C
Liquidus	1660 °C
Beta transus	980 °C

Figure 1 depicts the Methodology for execution of experimentation.

Find and collect specimens of Titanium Alloy Ti-6Al-4V for testing, making sure that the material's characteristics are constant. Obtain carbide inserts made for titanium machining, such as PVD and CVD. Make sure the inserts fulfil the necessary standards by conducting pre-testing evaluations. Make use of a CNC machining centre that has the right fixtures and cutting tools. Create a controlled atmosphere to reduce outside influences on the results of machining. To establish a matrix of test situations, systematically alter cutting parameters such as depth of cut, feed rate, and cutting speed. Use a factorial design to tho-

roughly investigate the ways in which the parameters interact.

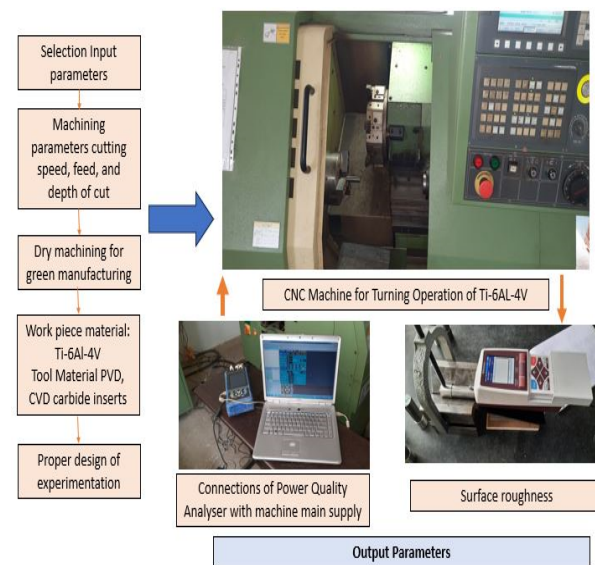


Fig. 1. Methodology for execution of experimentation

Measurements of surface roughness and profilometry are used to assess surface finish properties. Connect the machining settings to the surface finish. Keep systematic records of surface finish, and other pertinent metrics for every experimental run. Repeatedly measure and record data to ensure accuracy and dependability. Examine how machining techniques affect the environment by taking waste production and energy usage into account. Examine and contrast the effects of PVD and CVD carbide inserts on the environment. Utilise statistical techniques, such as analysis of variance (ANOVA), to pinpoint important variables and their interactions. Establish the ideal machining parameters to produce effective and lasting results. Keep detailed records of all experimental setups, outcomes, and observations. Write a thorough report including the results, conclusions, and suggestions. By considering both performance indicators and environmental effect, this methodology seeks to offer a methodical and rigorous way to investigating the sustainability of titanium alloy machining utilising PVD and CVD carbide inserts.

From the various literature review the researchers used different sizes of titanium alloy grade 5 i.e. Ti-6Al-4V for their experimental work so in this study 20 mm diameter and 75 mm length of material selected and PVD and CVD carbide inserts with cutting speed of 50, 75, 100 m/min, feed rate of 0.035, 0.046, 0.069 mm/rev. and the

depth of cut of 0.50, 0.75, 1.00 mm the machining parameters are used for the experimentation. The experiments were conducted on CNC machine Smart turn/Smart Jr (FANUC Oi MATE TD) Fanuc Simulation Controller, having the specification of max turning diameter 250 mm, max turning length 250 mm, spindle size 165 mm, capacity: swing over bed 480 mm, chuck diameter: 165 mm, machine size: front side 2275×1640 mm and machine weight: 2300 Kg with the power supply of voltage: Ac 415 ± 10 %, 3 Phase, frequency: 50 ± 1 and power of 15 kVA.

In the Taguchi L18 orthogonal array, the selection of machining parameters and their levels for the turning operation of a 20 mm diameter and 75 mm length using PVD and CVD carbide inserts done as follows.

Table 4 illustrates the input response of the various parameters. In this table we explore the various parameters such as, cutting speed, feed, depth of cut, and cutting tools.

Table 4

Input response parameters

Parameters	Level 1 Low	Level 2 Medium	Level 3 High
Cutting Speed	50 m/min	75 m/min	100 m/min
Feed	0.035 mm/rev.	0.046 mm/rev.	0.069 mm/rev.
Depth of Cut	0.5 mm	0.75 mm	1.00 mm
Cutting Tools	PVD Carbide Inserts	CVD Carbide Inserts	

With the Taguchi L18 orthogonal array, studies can be carried out with a small number of trials and the effects of various parameter combinations can still be recorded. Effectively investigate the effects of many parameters on the turning operation and determine the ideal parameter settings for better performance, such as reduced tool enhanced surface finish and energy efficiency (EE), by employing this design of experiments (DOE) approach.

In the Taguchi L18 array, every trial is a distinct set of parameter levels. Determine the primary impacts and interactions of the factors by carrying out the tests and evaluating the outcomes. This will enable you to optimise the turning process for the specified workpiece dimensions and carbide insert selection for PVD and CVD. It was discovered that a combination of greater feed, lower spindle speed, and deep cut depth proved

effective in lowering the energy consumption during turning. Elevated feed rates combined with moderate speeds and deep cutting depth were ideal for optimising energy efficiency. The optimal combination for power factor was high speed, feed, and depth of cut.

Table 5 shows the experimental results and S/N ratio values for Surface Roughness (Ra) with various parameters such as cutting speed, feed, depth of cut, SNRA and MEAN.

Table 5

Experimental results and S/N ratio values for Surface Roughness (Ra)

Experiment No	Type of Tool	Cutting Speed (m/min)	Feed (mm/rev.)	Depth of Cut. (mm)	Ra	SNRA	MEAN
1	PVD	50	0.069	0.5	0.422	7.493751	0.422
2	PVD	50	0.046	0.75	0.327	9.719676	0.3266
3	PVD	50	0.035	1	0.274	11.24499	0.274
4	PVD	75	0.069	0.5	0.414	7.659993	0.414
5	PVD	75	0.046	0.75	0.337	9.444825	0.3371
6	PVD	75	0.035	1	0.258	11.77603	0.25775
7	PVD	100	0.069	0.75	0.534	5.453242	0.53375
8	PVD	100	0.046	1	0.433	7.270242	0.433
9	PVD	100	0.035	0.5	0.296	10.56683	0.29625
10	CVD	50	0.069	1	0.560	5.036239	0.56
11	CVD	50	0.046	0.5	0.356	8.977102	0.35575
12	CVD	50	0.035	0.75	0.320	9.897	0.32
13	CVD	75	0.069	0.75	0.499	6.037989	0.499
14	CVD	75	0.046	1	0.430	7.340737	0.4295
15	CVD	75	0.035	0.5	0.232	12.70898	0.2315
16	CVD	100	0.069	1	0.635	3.94179	0.6352
17	CVD	100	0.046	0.5	0.356	8.964903	0.35625
18	CVD	100	0.035	0.75	0.328	9.695774	0.3275

Experimental results for S/N ratio

Rank 1 (Δ : 5.044): Feed rate has the most significant impact on the S/N ratio. Level 1 has the highest S/N ratio among the feed rates. Rank 2 (Δ : 1.627): Depth of cut has a moderate impact on the S/N ratio. Level 2 has the highest S/N ratio among the depths of cut. Rank 3 (Δ : 1.513): Cutting speed has a notable impact on the S/N ratio. Level 3 has the highest S/N ratio, suggesting that a specific cutting speed is associated with a better surface finish (lower Ra). Rank 4 (Δ : 0.892): There is little difference in the S/N ratio for different types of tools. All tools have similar S/N ratios. Table 6 illustrates the response for S/N ratio of surface roughness (Ra). While Table 7 discus-

ses the response for means of surface roughness (Ra).

Taguchi Analysis: Ra versus Type of Tool, Cutting Speed (m/min), Feed (mm/rev.), Depth of Cut (mm).

Table 6

Response table for S/N ratio of Surface Roughness (Ra)

Level	Type of Tool	Cutting Speed (m/min)	Feed (mm/rev.)	Depth of Cut (mm)
1	8.959	8.728	10.982	9.395
2	8.067	9.161	8.620	8.375
3		7.649	5.937	7.768
Δ	0.892	1.513	5.044	1.627
Rank	4	3	1	2

Table 7

Response Table for Means of Surface Roughness (Ra)

Level	Type of Tool	Cutting Speed (m/min)	Feed (mm/rev.)	Depth of Cut (mm)
1	0.3660	0.3764	0.2845	0.3460
2	0.4127	0.3615	0.3730	0.3907
3		0.4303	0.5107	0.4316
Δ	0.0467	0.0689	0.2262	0.0856
Rank	4	3	1	2

Rank 1 (Δ : 0.2262): Feed rate has the most significant impact on the means. Level 3 has the highest mean among the feed rates. Rank 2 (Δ : 0.0856): Depth of cut has a moderate impact on the means. Level 2 has the highest mean among the depths of cut. Rank 3 (Δ : 0.0689): Cutting speed has a minor impact on the means. Level 3 has the highest mean, indicating that a specific cutting speed is associated with a slightly better surface finish. Rank 4 (Δ : 0.0467): Similar to the S/N ratio table, there is little difference in the means for different types of tools. All tools have similar means. Figure 2 shows the plot of mean of S/N ratio vs Main Effects plot for S/N ratio of Surface Roughness (Ra).

Feed rate appears to be the most critical factor, affecting both S/N ratios and means significantly (Tab. 8). Level 1 of feed rate is associated with the highest S/N ratio and mean for achieving a better surface finish (lower Ra). Cutting speed and depth of cut also have noticeable impacts on the S/N ratios, with specific levels associated with better surface finish. Type of tool has little impact

on both S/N ratios and means in this context. Figure 3 illustrates the mean of means vs Main Effects plot for Means of Surface Roughness (Ra).

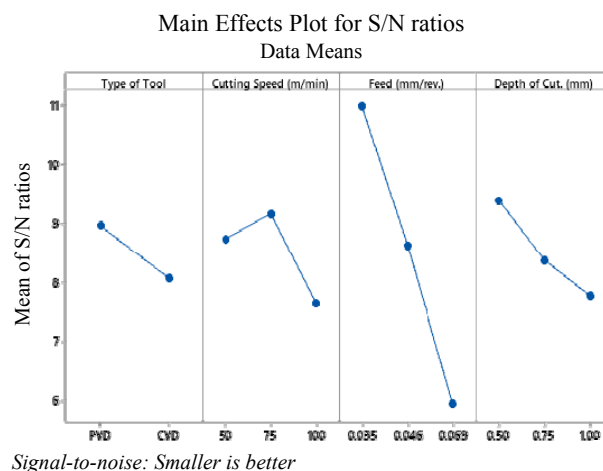


Fig. 2. Main Effects plot for S/N ratio of Surface Roughness (Ra)

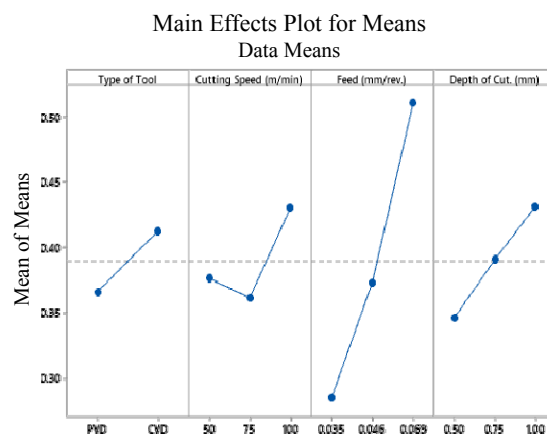


Fig. 3 Main Effects plot for Means of Surface Roughness (Ra)

Response Table for Signal to Noise Ratios EE versus Type of Tool, Cutting Speed (m/min), Feed (mm/rev.), Depth of Cut (mm) (Tab. 9).

Rank 1 (Δ : 5.03): Feed rate has the most significant impact on the S/N ratio. Level 1 has the highest S/N ratio among the feed rates. Rank 2 (Δ : 3.75): Cutting speed has a notable impact on the S/N ratio. Level 3 has the highest S/N ratio, suggesting that a specific cutting speed is associated with better energy efficiency. Rank 3 (Δ : 0.83): Depth of cut has a moderate impact on the S/N ratio. Level 2 has the highest S/N ratio among the depths of cut. Rank 4 (Δ : 0.24): There is little difference in the S/N ratio for different types of tools. All tools have similar S/N ratios.

Table 8

Experimental results and S/N ratio values for Energy Efficiency

Expt. No	Type of Tool	Cutting Speed (m/min)	Feed (mm/rev.)	Depth of Cut. (mm)	EE	SNRA4	MEAN4
1	PVD	50	0.069	0.5	29.6716	-29.4468	29.6716
2	PVD	50	0.046	0.75	58.16422	-35.2931	58.16422
3	PVD	50	0.035	1	58.93	-35.4067	58.93
4	PVD	75	0.069	0.5	26.89199	-28.5925	26.89199
5	PVD	75	0.046	0.75	34.52036	-30.7615	34.52036
6	PVD	75	0.035	1	42.1406	-32.494	42.1406
7	PVD	100	0.069	0.75	22.581	-27.0749	22.581
8	PVD	100	0.046	1	27.40027	-28.7551	27.40027
9	PVD	100	0.035	0.5	30.97206	-29.8194	30.97206
10	CVD	50	0.069	1	26.60415	-28.499	26.60415
11	CVD	50	0.046	0.5	47.85885	-33.5992	47.85885
12	CVD	50	0.035	0.75	58.38051	-35.3254	58.38051
13	CVD	75	0.069	0.75	24.98615	-27.954	24.98615
14	CVD	75	0.046	1	36.40623	-31.2235	36.40623
15	CVD	75	0.035	0.5	48.8224	-33.7724	48.8224
16	CVD	100	0.069	1	22.89598	-27.1952	22.89598
17	CVD	100	0.046	0.5	31.92944	-30.0838	31.92944
18	CVD	100	0.035	0.75	40.36242	-32.1195	40.36242

Table 9

Signal to Noise Ratios for Energy Efficiency (EE)

Level	Type of Tool	Cutting Speed (m/min)	Feed (mm/rev.)	Depth of Cut. (mm)
1	-30.85	-32.93	-33.16	-30.89
2	-31.09	-30.80	-31.62	-31.42
3		-29.17	-28.13	-30.60
Δ	0.24	3.75	5.03	0.83
Rank	4	2	1	3

Table 10

Response Table for Means for Energy Efficiency (EE)

Level	Type of Tool	Cutting Speed (m/min)	Feed (mm/rev.)	Depth of Cut. (mm)
1	36.81	46.60	46.60	36.02
2	37.58	35.63	39.38	39.83
3		29.36	25.61	35.73
Δ	0.77	17.24	21.00	4.10
Rank	4	2	1	3

Rank 1 (Δ : 21.00): Feed rate has the most significant impact on the means. Level 3 has the highest mean among the feed rates. Rank 2

(Δ : 17.24): Cutting speed has a substantial impact on the means. Level 1 has the highest mean, indicating that a specific cutting speed is associated with higher energy efficiency. Rank 3 (Δ : 4.10): Depth of cut has a moderate impact on the means. Level 1 has the highest mean among the depths of cut. Rank 4 (Δ : 0.77): Similar to the S/N ratio table, there is little difference in the means for different types of tools. All tools have similar means. Figure 4 discussed the mean of S/N ratio vs main effect plot for S/N ratio of Energy Efficiency (EE). However, Figure 5 shows the mean of means vs Main Effects plot for Means of Energy Efficiency (EE).

Feed rate appears to be the most critical factor, affecting both S/N ratios and means significantly. Level 1 of feed rate is associated with the highest S/N ratio and mean for energy efficiency (Tab. 10). Cutting speed also has a notable impact, with Level 3 being associated with the highest S/N ratio and Level 1 being associated with the highest mean. Depth of cut has a moderate impact on both S/N ratios and means. Type of tool has little impact on both S/N ratios and means in this context.

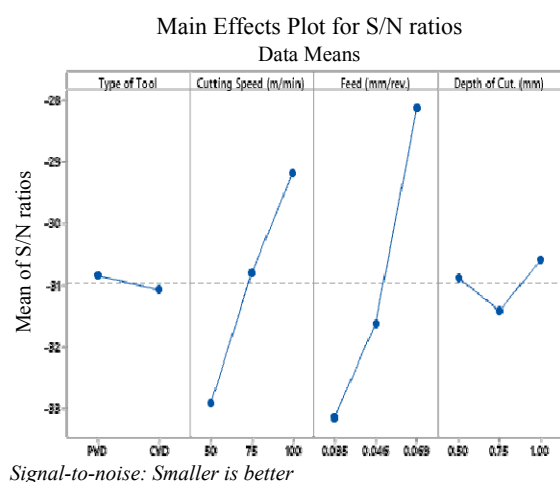


Fig. 4. Main Effects plot for S/N ratio of Energy Efficiency (EE)

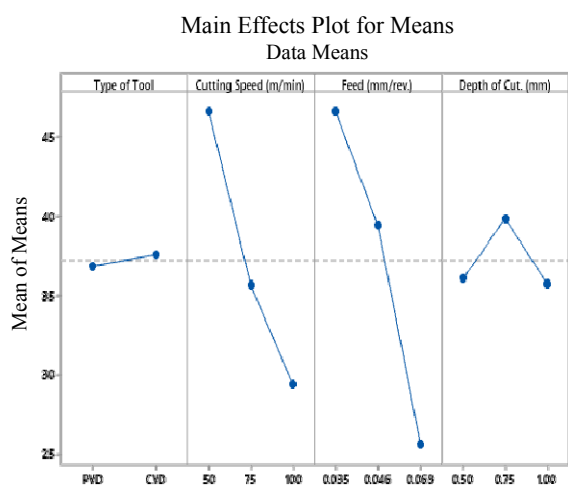


Fig. 5. Main Effects plot for Means of Energy Efficiency (EE)

CONCLUSION

In the work we proposed the significance of feed rate, depth of cut, and cutting speed in enhancing surface polish and sustainability in titanium alloy machining is underscored by the study. Surface roughness values for both cutting inserts varied in the experiment, and the CVD carbide insert has less value than the PVD carbide insert, according to the experimental data. In contrast to the CVD coated inserts, which have an optimal surface roughness of 0.232 when cutting parameters of 75 millimeter/minutes, feed 0.035 millimeter/rev, and depth of cut of 0.5 millimeter are observed, the PVD coated inserts have an optimal

surface roughness of 0.258 when cutting parameters. The consistent performance of PVD and CVD carbide inserts across a range of tools further bolsters their dependability and utility in green production processes. In terms of energy efficiency (EE), once more, the feed rate for turning operations for the chosen material has the greatest influence on the S/N ratio. This is followed by the spindle's cutting speed, which has a noticeable influence on the S/N ratio and suggests that a particular cutting speed is associated with better energy efficiency. The depth of cut also has a moderate influence on the S/N ratio, and lastly, there is minimal variation in the S/N ratio for different types of tools. These findings support the development of environmentally friendly titanium alloy machining methods by offering vital information for improving tool selection and machining parameter selection. This investigation highlights the significance of feed rate, cutting speed, and depth of cut in achieving enhanced energy efficiency during titanium alloy machining. PVD and CVD carbide inserts provide uniform performance across a variety of tools, so augmenting their dependability and making them appealing alternatives for energy-conserving and ecologically sustainable machining procedures. These findings are consistent with green manufacturing concepts and aid in the development of energy-efficient titanium alloy machining methods. Additionally, they provide vital information for optimising machining parameter.

REFERENCES

1. Faga M. G., Priarone P. C., Robiglio M., Settineri L., Tebaldo V. (2017) Technological and Sustainability Implications of Dry, Near-Dry, and Wet Turning of Ti-6Al-4V alloy. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 4 (2), 129–139. <https://doi.org/10.1007/s40684-017-0016-z>.
2. Lin H., Wang C., Yuan Y., Chen Z., Wang Q., Xiong W. (2015) Tool Wear in Ti-6Al-4V Alloy Turning under Oils on Water Cooling Comparing with Cryogenic Air Mixed with Minimal Quantity Lubrication. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81 (1–4), 87–101. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7062-x>.
3. Agrawal C., Khanna N., Pruncu C. I., Singla A. K., Gupta M. K. (2020). Tool Wear Progression and its Effects on Energy Consumption and Surface Roughness in Cryogenic Assisted Turning of Ti-6Al-4V. *The International*

- Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111 (5–6), 1319–1331. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06140-w>.
4. Kivak T. (2014). Optimization of Surface Roughness and Flank Wear Using the Taguchi Method in Milling of Hadfield Steel with PVD and CVD Coated Inserts. *Measurement*, 50, 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.12.017>.
5. Sivarao, Milkey K. R., Samsudin A. R., Dubey A. K., Kidd P. (2014) Comparison Between Taguchi Method and Response Surface. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 8 (1), 35–42.
6. Rostam O., Dimin M. F., Sivarao S., Luqman H. H., Said M. R., Keong L. K., Norazlina M. Y., Norhidayah M., Shaaban A. (2015) Assessing the Significance of Rate and Time Pulse Spraying in Top Spray Granulation of Urea Fertilizer Using Taguchi Method. *Applied Mechanics and Materials*, 761, 308–312. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.761.308>.
7. Camposeco-Negrete C. (2015) Optimization of cutting parameters using Response Surface Method for Minimizing Energy Consumption and Maximizing Cutting Quality in Turning of AISI 6061 T6 Aluminum. *Journal of Cleaner Production*, 91, 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.017>.
8. Balogun V. A., Mativenga P. T. (2017) Specific Energy Based Characterization of Surface Integrity in Mechanical Machining. *Procedia Manufacturing*, 7, 290–296. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.072>.
9. Yusoff A. R., Arsyad F. (2016) Evaluation of Surface Roughness and Power Consumption in Machining FCD 450 Cast Iron using Coated and Uncoated Irregular Milling Tools. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 114, 012017. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/114/1/012017>.
10. Lou Y. H., Zou J. Q., Huang J. Y., Jin Y. (2011) Impact of Cutting Tool Geometric Parameters on Milling Titanium Alloy TC4. *Advanced Materials Research*, 418–420, 1418–1422. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.418-420.1418>.
11. Kaldos A., Dagiloke I. F., Boyle A. (1996) Computer Aided Cutting Process Parameter Selection for High Speed Milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 61 (1–2), 219–224. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(96\)02490-9](https://doi.org/10.1016/0924-0136(96)02490-9).
12. Mori M., Fujishima M., Inamasu Y., Oda Y. (2011) A Study on Energy Efficiency Improvement for Machine Tools. *CIRP Annals*, 60 (1), 145–148. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.099>.
13. Liu N., Zhang Y. F., Lu W. F. (2015) A Hybrid Approach to Energy Consumption Modelling Based on Cutting Power: a Milling Case. *Journal of Cleaner Production*, 104, 264–272. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.049>.
14. Bilga P. S., Singh S., Kumar R. (2016) Optimization of Energy Consumption Response Parameters for Turning Operation Using Taguchi Method. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1406–1417. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.220>.
15. Calvanese M. L., Albertelli P., Matta A., Taisch M. (2013) Analysis of Energy Consumption in CNC Machining Centers and Determination of Optimal Cutting Conditions. Nee A., Song B., Ong S. K. (eds). *Re-engineering Manufacturing for Sustainability*. Springer, Singapore, 227–232. https://doi.org/10.1007/978-981-4451-48-2_37.
16. Bhushan R. K. (2013) Optimization of Cutting Parameters for Minimizing Power Consumption and Maximizing Tool Life During Machining of Al Alloy SiC Particle Composites. *Journal of Cleaner Production*, 39, 242–254. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.008>.
17. Aggarwal A., Singh H., Kumar P., Singh M. (2008) Optimizing Power Consumption for CNC turned Parts Using Response Surface Methodology and Taguchi's Technique—A Comparative Analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 200 (1–3), 373–384. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.09.041>.
18. Sivasakthivel P. S., Murugan V. V., Sudhakaran R. (2012) Experimental Evaluation of Surface Roughness for End Milling of Al 6063: Response Surface and Neural Network model. *International Journal of Manufacturing Research*, 7 (1), 9. <https://doi.org/10.1504/ijmr.2012.045241>.
19. Bhardwaj B., Kumar R., Singh P. K. (2014) An Improved Surface Roughness Prediction Model Using Box-Cox Transformation with RSM in End Milling of EN 353. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28 (12), 5149–5157. <https://doi.org/10.1007/s12206-014-0837-4>.
20. Reddy N. S. K., Rao P. V. (2005) A Genetic Algorithmic Approach for Optimization of Surface Roughness Prediction Model in Dry Milling. *Machining Science and Technology*, 9 (1), 63–84. <https://doi.org/10.1081/mst-200051263>.
21. Singh C., Bhogal S. S., Pabla D. B., Kumar P. (2014) Empirical Modeling of Surface Roughness and Metal Removal rate in CNC Milling Operation. *Journal of Information Technology Research (JITR)*, 2, 1120–1126.

Received: 24.04.2025

Accepted: 27.06.2025

Published online: 31.07.2025

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА DEFORMATION IN SOLID MECHANICS

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-292-296>

УДК 539.3

Функция Грина для упругой полуполосы

Доктор техн. наук, проф. С. В. Босаков¹⁾, магистрант М. А. Мелянюк¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. В представленной работе аналитически определяются вертикальные перемещения верхней грани упругой полуполосы с нижней шарнирно опертой гранью от действия вертикальной сосредоточенной силы, приложенной к верхней грани. При этом используется метод специальной аппроксимации, ранее эффективно применяемый в работах И. Снеддона и позднее В. М. Александрова. На нижней грани полуполосы принимаются равными нулю вертикальные перемещения и касательные напряжения. Искомое выражение для перемещений складывается из перемещений бесконечной полосы от действия двух симметрично приложенных вертикальных сил и самоуравновешенной нормальной горизонтальной нагрузки, приложенной к торцу полуполосы и равной нормальным горизонтальным напряжениям от действия двух симметрично приложенным силам к бесконечной полосе с обратным знаком. Перемещения от самоуравновешенной нагрузки по методу Ритца представляются в виде двойного ряда по классическим ортогональным функциям – полиномам Эрмита с весом и Лежандра с неопределенными коэффициентами, которые определяются из условия минимума функционала полной энергии деформаций полуполосы и работы торцевой самоуравновешенной горизонтальной нагрузки. Полученное выражение для перемещений содержит элементарные функции, имеет логарифмическую особенность в точке приложения силы и убывает на бесконечности. Приводятся графики вертикальных перемещений верхней грани полуполосы при различных положениях внешней вертикальной силы. Также графически показана точность принятой специальной аппроксимации. Полученные результаты могут найти применение при решении различных контактных задач для упругой полуполосы, нагруженной по верхней грани.

Ключевые слова: полуполоса, функция Грина, метод Ритца, вертикальные перемещения, ортогональные полиномы

Для цитирования: Босаков, С. В. Функции Грина для упругой полуполосы / С. В. Босаков, М. А. Мелянюк // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 4. С. 292–296. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-292-296>

Green's Function for Elastic Half-Strip

S. V. Bosakov¹⁾, M. A. Melyanyuk¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. In the presented work, vertical displacements of the upper face of an elastic half-strip with a hinged lower face are analytically determined under the action of a vertical concentrated force applied vertically to the upper face. In this case, the method of special approximation is used, previously effectively used in the works of I. Sneddon and, later, V. M. Alexandrov. On the lower face of the half-strip, vertical displacements and tangential stresses are assumed to be equal to zero.

Адрес для переписки

Босаков Сергей Викторович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-04
vm3_ftk@bntu.by

Address for correspondence

Bosakov Siarhei V.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-04
vm3_ftk@bntu.by

The desired expression for the displacements consists of the displacements of the infinite strip under the action of two symmetrically applied vertical forces and a self-balanced normal horizontal load applied to the end of the half-strip and equal to the normal horizontal stresses under the action of two symmetrically applied forces to the infinite strip with the opposite sign. The displacements under a self-balanced load according to the Ritz method are presented as a double series in classical orthogonal functions – Hermite polynomials with weight and Legendre polynomials with undetermined coefficients, which are determined under the condition of the minimum of the functional of the total energy of deformations of the half-strip and the work of the end self-balanced horizontal load. The obtained expression for displacements contains elementary functions, has a logarithmic singularity at the point of application of the force and decreases at infinity. Graphs of vertical displacements of the upper face of the half-strip are given for different positions of the external vertical force. The accuracy of the adopted special approximation is also shown graphically. The obtained results can be used to solve various contact problems for an elastic half-strip loaded along the upper face.

Key words: half-strip, Green's function, Ritz method, vertical displacements, orthogonal polynomials

For citation: Bosakov S. V., Melyanyuk M. A. (2025) Green's Function for Elastic Half-Strip. *Science and Technique*. 24 (4), 292–296. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-292-296> (in Russian)

Введение

В статье [1] приведена обширная библиография по исследованию напряженно-деформированного состояния упругой полуполосы. Авторы [2–5] рассматривали различные контактные задачи для полуполосы. Ниже получено аналитическое выражение для определения вертикальных перемещений верхней грани полуполосы от действия сосредоточенной силы (рис. 1).

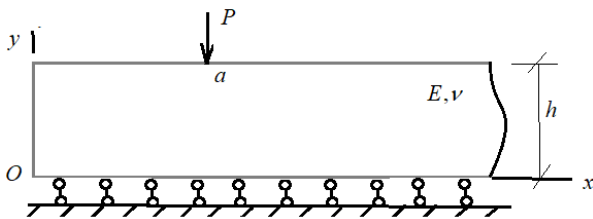


Рис. 1. Полуполоса под действием сосредоточенной силы

Fig. 1. Half-strip under concentrated force

Основная часть

Рассмотрим бесконечную полосу, симметрично нагруженную двумя силами P . По оси симметрии полосы будут действовать самоуравновешенные нормальные напряжения, выражение для которых можно определить по результатам Я. С. Уфлянда [6]:

$$\sigma_x = \frac{4P}{h\sqrt{2\pi}} \times \int_0^\infty \frac{(\mu \cosh \mu - \sinh \mu) \cosh \frac{y}{h} \mu - \mu \frac{y}{h} \sinh \mu \frac{y}{h} \sinh \mu}{2\mu + \sinh 2\mu} \times \cos \frac{a}{h} \mu d\mu. \quad (1)$$

Приложив к торцевой грани полуполосы нормальные напряжения (1) с обратным знаком и определив от них вертикальные перемещения верхней грани полуполосы, вместе с перемещениями полосы от действия двух сил P получим искомую функцию Грина.

Перемещения верхней грани полосы от сил P известны [7]

$$V(x) = \frac{2P(1-\nu^2)}{\pi E} \times \int_0^\infty L_1(u) \left(\cos u \frac{x-a}{h} + \cos u \frac{x+a}{h} \right) \frac{du}{u}, \quad (2)$$

$$L_1(u) = \frac{\cosh^2 u - 1}{2u + \sinh 2u}$$

где ν , E – коэффициент Пуассона и модуль упругости материала полуполосы.

Определим перемещения верхней грани полуполосы от самоуравновешенной торцевой нагрузки (1). Прежде всего заметим, что согласно принципу Сен-Венана [8] эти перемещения будут быстро убывать от места приложения нагрузки. Поэтому представим перемещения в виде двойных рядов по полиномам Эрмита с весом и Лежандра [9]:

$$U(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2}{h^2}\right) \sum_{m=0}^\infty \sum_{n=0}^\infty A_{2m, 2n} H_{2m}\left(\frac{x}{h}\right) P_{2n}\left(\frac{y}{h}\right); \quad (3)$$

$$V(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2}{h^2}\right) \sum_{m=0}^\infty \sum_{n=0}^\infty B_{2m, 2n+1} H_{2m}\left(\frac{x}{h}\right) P_{2n+1}\left(\frac{y}{h}\right),$$

где $H(z)$, $P(z)$ – полиномы Эрмита и Лежандра.

Найдем энергию деформаций полуполо-
сы [8] по выражениям (3)

$$\Phi = \int_0^h \int_0^\infty \left(\frac{E}{2(1-\nu^2)} \left(\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + 2\nu \frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \right. \\ \left. + \frac{E}{4(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right) dx dy. \quad (4)$$

Работа нормальных напряжений σ_x при $x = 0$

$$\Psi = \int_0^h \sigma_x U_{x=0} dy. \quad (5)$$

При учете первых восьми членов двойных
рядов (3) для (5) получаем:

$$\Psi = 3P \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty L_2(\mu) (A_{0,2} - 2A_{2,2}) \cosh\left(\frac{a}{h}\mu\right) d\mu, \quad (6)$$

$$L_2(\mu) = \frac{2 + 2\mu^2 - 2 \cosh 2\mu + \mu \sinh 2\mu}{\mu^3 (2\mu + \sinh 2\mu)}.$$

Для вычисления несобственных интегралов (2) и (6) используем способ специальной аппроксимации. Этот способ, видимо, впервые, использовал И. Снеддон при симметричной деформации толстой пластины [10], позднее – В. М. Александров [7] при решении контактных задач для полосы и клина. Поэтому на основании асимптотических свойств подынтегральных функций $L_1(u)$, $L_2(\mu)$ принимаем:

$$L_1(u) = \tanh \frac{u}{2} + \frac{u^3}{4 \cosh 2u}; \quad (7)$$

$$L_2(\mu) = 0,71 \frac{\tanh^2 0,41\mu}{4,2 + \mu^2}.$$

Точность аппроксимации (7) можно оценить по графикам рис. 2 и 3.

Далее используем формулы разложений и интегралов [9, 11]:

$$\int_0^\infty \frac{\tanh \alpha x}{x} \cos mx dx = \ln \operatorname{cth} \frac{\pi m}{4\alpha};$$

$$\tanh^2 \mu = 1 - \frac{1}{\cosh^2 \mu};$$

$$+ \sum_{k=1}^\infty e^{-\frac{(2k-1)\pi\beta}{2\alpha}} \frac{\left(2\left((1-2k)^2 \right)^{3/2} \pi^2 \alpha + 8d^2 (2k-1) \alpha^3 + (1-2k)^4 \pi^3 \beta - 4d^2 (1-2k)^2 \pi \alpha^2 \beta \right)}{(\alpha - 2k\alpha)^2 16 \left((1-2k)^2 \pi^2 - 4d^2 \alpha^2 \right)^2}.$$

$$\frac{1}{\cosh^2 \mu} = 8 \sum_{k=1}^\infty \frac{(2k-1)^2 \pi^2 - 4\alpha^2 \mu^2}{\left((2k-1)^2 \pi^2 + 4\alpha^2 \mu^2 \right)^2};$$

$$\int_0^\infty \frac{\cos \beta \mu d\mu}{\left((2k-1)^2 \pi^2 + 4\alpha^2 \mu^2 \right) (d^2 + \mu^2)} =$$

$$= -\frac{e^{-d\beta} \left((2k-1)^2 \pi + 2d e^{\frac{d\beta}{2\alpha} - \frac{(2k-1)\pi\beta}{2\alpha}} (2-1)k\alpha \right)}{2d(2k-1)^2 \left((2k-1)^2 \pi^2 - 4d^2 \alpha^2 \right)};$$

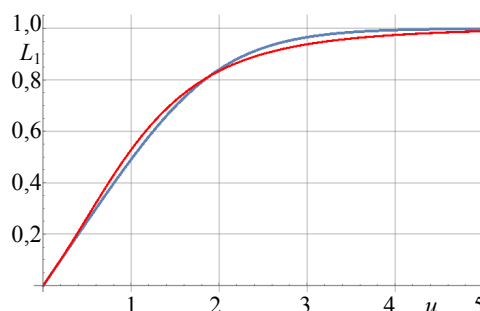


Рис. 2. Сравнение точного и аппроксимированного (красный цвет) выражений для $L_1(u)$

Рис. 2. Сравнение точного и аппроксимированного (красный цвет) выражений для $L_1(u)$

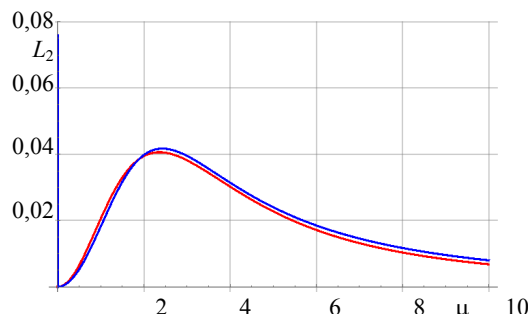


Рис. 3. Сравнение точного и аппроксимированного (красный цвет) выражений для $L_2(u)$

Fig. 3. Comparison of exact and approximate (red) expressions for $L_2(u)$

$$\int_0^\infty \frac{\mu^2 \cos \beta \mu d\mu}{\left((2k-1)^2 \pi^2 + 4\alpha^2 \mu^2 \right)^2 (d^2 + \mu^2)} =$$

$$= -\frac{e^{-d\beta} \pi \left(d\alpha \sec^2(d\alpha) - \operatorname{tg}(d\alpha) \right)}{128d^2 \alpha^3} +$$

Находилась энергия деформаций (4) и работа внешней нагрузки (6) с использованием представлений для перемещений (3), формул (8) для первых восьми членов двойного ряда. Затем полученное выражение дифференцировалось по каждому из неизвестных коэффициентов $A_{2m,2n}$, $B_{2m,2n+1}$ и, согласно методу Ритца [8], приравнявалось нулю. Решение образованной системы линейных алгебраических уравнений позволяет найти функцию Грина для определения вертикальных перемещений верхней грани полуполосы от действия сосредоточенной силы в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 V(x, h) = & -\frac{P(1-\nu^2)}{\pi E} \left(\ln \left(\operatorname{cth} \left(\pi \frac{|x-a|}{2h} \right) \right) + \right. \\
 & + \ln \left(\operatorname{cth} \left(\pi \frac{|x+a|}{2h} \right) \right) - \frac{\pi^3}{512} \left(-3 + \cosh \left(\frac{\pi(x-a)}{2h} \right) \right) - \\
 & - \frac{1}{512} \pi^3 \left(-3 + \cosh \frac{\pi(x-a)}{2h} \right) \operatorname{sech}^3 \frac{\pi(x-a)}{4h} - \\
 & - \frac{1}{512} \pi^3 \left(-3 + \cosh \frac{\pi(x+a)}{2h} \right) \operatorname{sech}^3 \frac{\pi(x+a)}{4h} \Bigg) + \\
 & + e^{-\frac{x^2}{2h^2}} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} B_{2m,2n+1} H_{2m} \left(\frac{x}{h} \right).
 \end{aligned}$$

Отметим, что формулы для коэффициентов $A_{2m,2n}$, $B_{2m,2n+1}$ имеют громоздкий вид и в статье не приводятся.

На рис. 4 показаны графики перемещений верхней грани полуполосы при различных положениях внешней силы и коэффициенте Пуассона материала полуполосы $\nu = 0,167$.

ВЫВОД

В работе приведено аналитическое выражение для вертикальных перемещений верхней грани упругой полуполосы с закрепленной нижней гранью от действия вертикальной сосредоточенной силы, приложенной к верхней грани. Выражение содержит элементарные функции и может быть использовано для решения разнообразных контактных задач для упру-

гой полуполосы. Подобный подход может быть использован для определения вертикальных перемещений полуполосы с иными граничными условиями по ее нижней грани.

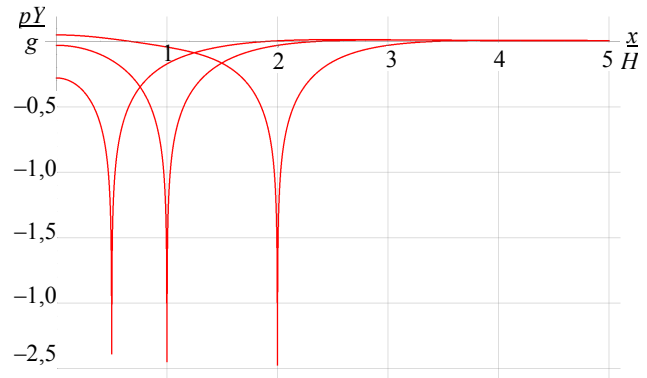


Рис. 4. Графики вертикальных перемещений верхней грани полуполосы от действия сосредоточенной силы для $a = 0,5h$; $a = h$; $a = 2h$ при коэффициенте Пуассона материала полуполосы 0,167

Fig. 4. Graphs of vertical displacements of the upper face of the half-strip under the action of a concentrated force for $a = 0,5h$; $a = h$; $a = 2h$ for the Poisson's ratio of the half-strip material of 0.167

ЛИТЕРАТУРА

1. Ворович, И. И. Некоторые задачи теории упругости для полуполосы / И. И. Ворович, В. В. Копасенко // Прикладная математика и механика. 1966. Т. 30, вып. 1. С. 109–115.
2. Нуллер, В. М. Об одной контактной задаче для упругой полуполосы / В. М. Нуллер // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 1973. № 5. С. 143–148.
3. Гомилко, А. М. Метод однородных решений в смешанной задаче для полуполосы / А. М. Гомилко, В. Т. Гринченко, В. В. Мелешко // Прикладная механика. 1990. Т. 26, № 2. С. 98–108.
4. Босаков, С. В. Контактная задача для упругой полуполосы / С. В. Босаков // Весці нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1997, № 4. С. 119–121.
5. Босаков, С. В. К решению контактной задачи для упругой полуполосы / С. В. Босаков // Наука и техника. 2021. Т. 20, № 5. С. 405–409. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-405-409>.
6. Уфлянд, Я. С. Интегральные преобразования в задачах теории упругости / Я. С. Уфлянд. М.–Л.: Наука, 1967. 402 с.
7. Развитие теории контактных задач в СССР / под ред. Л. А. Галина. М.: Наука, 1976. 493 с.
8. Александров, А. В. Основы теории упругости и пластичности / А. В. Александров, В. Д. Потапов. М.: Высш. шк., 1990. 400 с.

9. Градштейн, И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. М.: Физматгиз, 1963. 1100 с.
10. Снеддон, И. Преобразования Фурье / И. Снеддон. М.: Изд-во иностран. лит., 1955. 667 с.
11. Двайт, Г. Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы / Г. Б. Двайт. М.: Наука, 1969. 228 с.

Поступила 22.04.2025

Подписана к печати 23.06.2025

Опубликована онлайн 31.07.2025

REFERENCES

1. Vorovich I. I., Kopasenko V. V. (1966) Some Problems in the Theory of Elasticity for a Semi-Infinite Strip. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 30 (1), 128–136. [https://doi.org/10.1016/0021-8928\(66\)90062-1](https://doi.org/10.1016/0021-8928(66)90062-1).
2. Nuller V. M. (1973) On a Contact Problem for an Elastic Half-Strip. *Izvestiya RAN. Mekhanika Tverdogo Tela = Mechanics of Solids*, (5), 143–148 (in Russian).
3. Gomilko A. M., Grinchenko V. T., Meleshko V. V. (1990) Method of Homogeneous Solutions in a Mixed Problem for a Half-Strip. *Soviet Applied Mechanics*, 26 (2), 193–202. <https://doi.org/10.1007/bf00887116>.
4. Bosakov S. V. (1997) Contact Problem for an Elastic Halfstrip. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, (4), 119–121 (in Russian).
5. Bosakov S. V. (2021) To Solution of Contact Problem for Elastic Half-Strip. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 20 (5), 405–409. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-405-409> (in Russian).
6. Uflyand Y. S. (1968) *Integral Transformations in Elasticity Theory*. Leningrad, Nauka Publ. 402 (in Russian).
7. Galin L. A. (ed.) (1976) *Development of the Theory of Contact Problems in the USSR*. Moscow, Nauka Publ. 496 (in Russian).
8. Aleksandrov A. V., Potapov V. D. (1990) *Fundamentals of the Theory of Elasticity and Plasticity*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 400 (in Russian).
9. Gradshteyn I. S., Ryzhik I. M. (1963) *Tables of Integrals, Sums, Series and Products*. Moscow, Publishing House of Physical and Mathematical Literature. 1100 (in Russian).
10. Sneddon I. (1950) *Fourier Transforms*. New York, McGraw-Hill.
11. Dwight H. B. (1961) *Tables of Integrals and Other Mathematical Formulas*. 4th ed. New York, Macmillan.

Received: 22.04.2025

Accepted: 23.06.2025

Published online: 31.07.2025

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-297-306>

УДК 624.04

Моделирование системы «платформа – модель здания» с сейсмоизолирующим поясом

Чл.-кор. НАН Таджикистана, докт. техн. наук, проф. Д. Н. Низомов¹⁾,
докт. техн. наук, проф. И. К. Каландарбеков²⁾,
канд. техн. наук, доц. И. И. Каландарбеков³⁾

¹⁾Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии

Национальной академии наук Таджикистана (Душанбе, Республика Таджикистан),

²⁾Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими

(Душанбе, Республика Таджикистан),

³⁾Белорусский национальный технический университет – Таджикский технический университет
имени академика М. С. Осими (Душанбе, Республика Таджикистан)

Реферат. Разработаны алгоритмы численного решения динамических задач моделей зданий с сейсмоизолирующим поясом при расположении плоскости скольжения на различных уровнях. Алгоритмы учитывают нелинейное поведение конструкции, связанное с перемещениями в области скользящего слоя, и позволяют проводить моделирование с учетом различных параметров изоляции. Разработана компьютерная программа, реализующая предложенные алгоритмы. Она позволяет рассчитывать динамический отклик зданий при различных сейсмических воздействиях, учитывая геометрические и механические характеристики конструкции. В программе реализованы численные методы интегрирования уравнений движения, что обеспечивает точность и устойчивость вычислений. Проведены расчеты моделей зданий с сейсмоизоляцией при различных параметрах системы, включая высоту расположения плоскости скольжения, жесткость надземной части и характеристики демпфирования. Получены результаты, показывающие влияние этих факторов на поведение сооружения при сейсмических нагрузках. Анализ результатов показал, что расположение плоскости скольжения оказывает значительное влияние на динамическую реакцию здания. В частности, более низкое расположение слоя скольжения способствует снижению передаваемых на надземную часть ускорений, что приводит к уменьшению внутренних усилий и повышению общей сейсмостойкости конструкции. Предложенные алгоритмы и программа могут быть использованы при проектировании зданий с сейсмоизоляцией, а также при оценке их надежности в условиях различных сейсмических воздействий.

Ключевые слова: модель здания, скользящий пояс, сила трения, математическое моделирование, коэффициент жесткости, плоскость скольжения, коэффициент затухания

Для цитирования: Низомов, Д. Н. Моделирование системы «платформа – модель здания» с сейсмоизолирующим поясом / Д. Н. Низомов, И. К. Каландарбеков, И. И. Каландарбеков // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 4. С. 297–306. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-297-306>

Адрес для переписки

Каландарбеков Ифтихор Имоморбекович
Таджикский технический университет
имени академика М. С. Осими
просп. академиков Раджабовых, 10А,
734042, г. Душанбе, Республика Таджикистан
Тел.: +992 (372) 21-35-11
iftikhor791@mail.ru

Address for correspondence

Qalandarbekov Iftikhor Imomyorbekovich
Tajik Technical University
named after academician M. S. Osimi
10A, Academicians Rajabov's Avenue,
734042, Dushanbe, Republic of Tajikistan
Tel.: +992 (372) 21-35-11
iftikhor791@mail.ru

Modeling of the System “Platform – Building Model” with a Seismic Isolation Belt

D. N. Nizomov¹⁾, I. K. Kalandarbekov²⁾, I. I. Kalandarbekov³⁾

¹⁾Institute of Geology, Earthquake Engineering and Seismology of the National Academy of Sciences of Tajikistan (Dushanbe, Republic of Tajikistan),

²⁾Academician M. S. Osimi Tajik Technical University (Dushanbe, Republic of Tajikistan),

³⁾Belarusian National Technical University – Tajik Technical University named after Academician M. S. Osimi (Dushanbe, Republic of Tajikistan).

Abstract. Algorithms for the numerical solution of dynamic problems of building models with a seismic-isolating belts when the sliding plane is located at different levels have been developed. The algorithms take into account the nonlinear behavior of the structure associated with displacements in the area of the sliding layer, and allow for modeling taking into account various insulation parameters. A computer program implementing the proposed algorithms has been developed. It allows to calculate the dynamic response of buildings under various seismic effects, taking into account the geometrical and mechanical characteristics of the structure. The program implements numerical methods for integrating equations of motion, which ensures the accuracy and stability of calculations. Calculations of seismic-insulated building models with different system parameters, including the height of the sliding plane location, stiffness of the above-ground part and damping characteristics, have been carried out. The results showing the influence of these factors on the behavior of the structure under seismic loads have been obtained. The analysis of the results showed that the location of the sliding plane has a significant effect on the dynamic response of the building. In particular, the lower location of the sliding layer contributes to the reduction of accelerations transmitted to the above-ground part, which leads to a decrease in internal forces and an increase in the overall seismic resistance of the structure. The proposed algorithms and program can be used in the design of buildings with seismic insulation, as well as in the assessment of their reliability under various seismic effects.

Keywords: building model, sliding belt, friction force, mathematical modelling, stiffness coefficient, sliding plane, damping coefficient

For citation: Nizomov D. N., Kalandarbekov I. K., Kalandarbekov I. I. (2025) Modeling of the System “Platform – Building Model” with a Seismic Isolation Belt. *Science and Technique*. 24 (4), 297–306. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-297-306> (in Russian)

Введение

Сейсмоизолирующие опорные конструкции скользящего типа за счет сил сухого трения обеспечивают жесткую кинематическую связь сооружения с колеблющимся основанием до тех пор, пока суммарная инерционная сила в системе не превысит определенного уровня – порога срабатывания, величина которого зависит от коэффициента трения и конфигураций поверхностей скольжения фундамента [1–8].

Разработкой и исследованиями сейсмоизоляции зданий и сооружений занимались Б. М. Абрамов [9], А. М. Алексеев [10], Г. А. Джинчелашвили [11], О. А. Савинов [12, 13] и многие другие. Вопросы сейсмоизоляции с резино-металлическими опорами рассмотрены в работах А. М. Курзанова, О. В. Мкртычева, Д. Н. Низома и др.

Повышение сейсмической безопасности и снижение затрат на антисейсмические мероприятия возможны в случае интенсивного совершенствования методов, способов и технических средств защиты зданий и сооружений от сейсмических воздействий и является важной проблемой, решение которой имеет большое научно-практическое значение.

Можно отметить, что наиболее важным направлением современной науки о сейсмостойком строительстве становится разработка способов сейсмозащиты и расчетной оценки их эффективности на основе различных динамических моделей систем «сооружение – изоляция – фундамент – основание» с учетом характера сейсмического воздействия в форме инструментальных записей землетрясений.

Формирование расчетной модели

Рассматривается многомассовая расчетная модель здания с элементами сухого трения, где плоскость скольжения расположена между массами m_1 и m_2 . Масса m_2 расположена непосредственно над скользящим поясом. Предполагается, что модель здания в общем виде испытывает кинематическое возмущение в опорной части $z_0(t)$ и действие горизонтальной вибрационной нагрузки $p(t)$, приложенной к массе m_1 . Между массами m_1 и m_2 существует связь в виде сил сухого трения при смещении массы m_2 относительно масс m_1 в пределах зазора Δ_1 (рис. 1а).

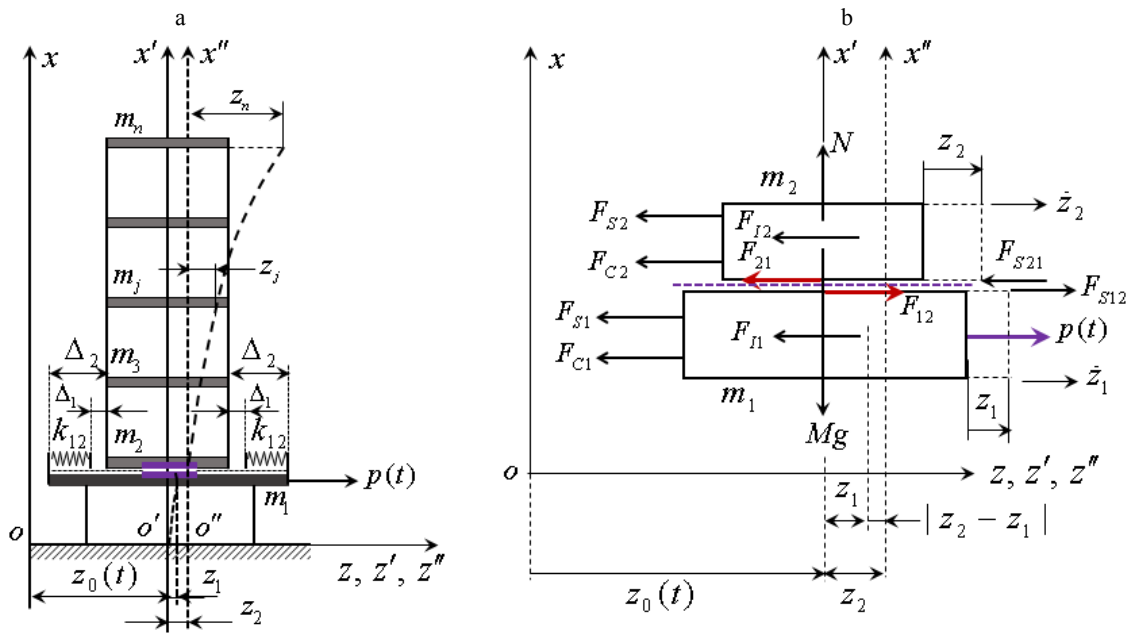


Рис. 1. Модель здания с сейсмоизолирующим поясом (а) и сила трения скольжения (б)

Fig. 1. Model of a building with a seismic-isolating belt (a) and the sliding friction force (b)

В момент времени, когда абсолютная величина относительного смещения при скольжении $|z_2 - z_1|$ становится больше Δ_1 , но при этом остается меньше Δ_2 , в работу включаются упругие демпферы с коэффициентом жесткости k_{12} .

Следовательно, при выполнении условий $\Delta_1 < |z_2 - z_1| \leq \Delta_2$ в уравнениях равновесия масс m_1 и m_2 , помимо сил инерции F_I , затухания F_C , упругости F_S , трения F_{I2} , входит сила упругости ограничителя F_{S12} . Исходя из условий динамического равновесия масс m_1 и m_2 при скольжении (рис. 1b) в соответствии с принципом Даламбера получим:

$$-F_{I1} - F_{C1} - F_{S1} + F_{I2} + F_{S12} + p(t) = 0; \quad (1)$$

$$-F_{I2} - F_{C2} - F_{S2} - F_{21} - F_{S21} = 0, \quad (2)$$

$$\text{где } F_{I1} = m_1(\ddot{z}_1 + \ddot{z}_0); \quad F_{C1} = c_1\dot{z}_1; \quad F_{S1} = r_{11}z_1; \quad (3)$$

$$F_{I2} = m_2(\ddot{z}_2 + \ddot{z}_0); \quad F_{C2} = c_2\dot{z}_2;$$

$$F_{S2} = r_{22}z_2 + r_{23}z_3; \quad (4)$$

$$F_{I2} = F_{21} = F_F \operatorname{sgn}(\dot{z}_2 - \dot{z}_1); \quad F_F = \mu N; \\ N = Mg; \quad M = m_2 + m_3 + \dots + m_n; \quad (5)$$

$$F_{S12} = F_{S21} = k_{12}(|z_2 - z_1| - \Delta_1) \operatorname{sgn}(z_2 - z_1) = \\ = F_R \operatorname{sgn}(z_2 - z_1); \quad (6)$$

$$F_R = k_{12}(|z_2 - z_1| - \Delta_1);$$

$$v_{21} = \dot{z}_2 - \dot{z}_1;$$

$$\operatorname{sgn}(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) = \operatorname{sgn}(v_{21}) = \begin{cases} 1, & v_{21} > 0; \\ 0, & v_{21} = 0; \\ -1, & v_{21} < 0; \end{cases} \quad (7)$$

μ – коэффициент трения скольжения; N – сила реакции опоры; c_j – коэффициенты затухания; F_F – сила трения скольжения; M – суммарная масса здания; v_{21} – разность скоростей движения массы m_1 и m_2 .

Для остальных степеней свободы уравнения динамического равновесия записываются в виде:

$$F_{I3} + F_{C3} + F_{S3} = 0; \quad (8)$$

$$\dots \dots \dots F_{In} + F_{Cn} + F_{Sn} = 0. \quad (9)$$

Внося (3)–(7) в (1), (2), (8) и (9), получаем систему дифференциальных уравнений:

$$m_1\ddot{z}_1 + c_1\dot{z}_1 + r_{11}z_1 - F_F \operatorname{sgn}(v_{21}) - \\ - F_R \operatorname{sgn}(z_{21}) = -m_1\ddot{z}_0(t) + p(t); \quad (10)$$

$$m_2\ddot{z}_2 + c_2\dot{z}_2 + r_{22}z_2 + r_{23}z_3 + F_F \operatorname{sgn}(v_{21}) + \\ + F_R \operatorname{sgn}(z_{21}) = -m_2\ddot{z}_0(t); \quad (11)$$

$$m_i\ddot{z}_i + c_i\dot{z}_i + \sum_{j=2}^n r_{ij}z_j = -m_i(\ddot{z}_0 + \ddot{z}_2), \\ i = 3, 4, \dots, n; \quad (12)$$

$$v_{21} = \dot{z}_2 - \dot{z}_1; \quad z_{21} = z_2 - z_1;$$

$$F_R = k_{02}(|z_{21}| - \Delta_1),$$

где r_{ij} – реакция, возникающая в i -й связи основной системы метода перемещений при единичном перемещении связи j ; c_j – коэффициент затухания.

Очевидно, что при условии $|z_2 - z_1| \leq \Delta_1$ реакция упругого ограничителя равняется нулю $F_R = 0$, а при условии $|z_2 - z_1| \geq \Delta_2$ в работу включаются жесткие упоры и движение системы прекращается.

Если модуль относительного смещения $|z_{21}| \neq 0$, то скольжение надземных конструкций относительно фундамента возможно в том случае, когда сумма сил, действующих на массы $m_2, m_3, \dots, m_n$, больше силы трения скольжения [1]:

$$|F_\Sigma| - F_F \geq F_1; \quad (13)$$

$$F_\Sigma = F_{It} + F_{It+\Delta t} + F_R \operatorname{sgn}(z_{21});$$

$$F_{It} = m_2 \ddot{z}_2(t) + \sum_{j=3}^n m_j [\ddot{z}_j(t) + \ddot{z}_2(t)];$$

$$F_{It+\Delta t} = \left(m_2 + \sum_{j=3}^n m_j \right) \ddot{z}_0(t + \Delta t);$$

$$F_F = \mu(m_2 + m_3 + \dots + m_n)g,$$

где F_1 – заданное минимальное значение силы инерции, при которой происходит скольжение массы m_2 относительно m_1 .

Применяя метод последовательной аппроксимации по времени (Низомов, 2000), где ускорение и скорость в момент времени t_i определяются по формулам:

$$\ddot{z}_i = \frac{\alpha_1}{\tau^2}(z_i - z_{i-1}) - \frac{\alpha_2}{\tau} \dot{z}_{i-1} - \alpha_3 \ddot{z}_{i-1}; \quad (14)$$

$$\dot{z}_i = \frac{\beta_1}{\tau}(z_i - z_{i-1}) - \beta_2 \dot{z}_{i-1} - \tau \beta_3 \ddot{z}_{i-1}, \quad (15)$$

из (10)–(12) получим систему алгебраических уравнений:

$$r_{11}^* z_1 = m_1 u_1 + c_1 v_1 + F_F \operatorname{sgn}(v_{21}) + F_R \operatorname{sgn}(z_{21}) - m_1 \ddot{z}_0(t) + p(t);$$

$$r_{22}^* z_2 + r_{23} z_3 = m_2 u_2 + c_2 v_2 - F_F \operatorname{sgn}(v_{21}) - F_R \operatorname{sgn}(z_{21}) - m_2 \ddot{z}_0(t);$$

$$r_{32} z_2 + r_{33}^* z_3 + r_{34} z_4 = m_3 u_3 + c_3 v_3 - m_3 (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_2); \quad (16)$$

$$r_{43} z_3 + r_{44}^* z_4 + r_{45} z_5 = m_4 u_4 + c_4 v_4 - m_4 (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_2);$$

...

$$r_{n,n-1} z_{n-1} + r_{nn}^* z_n = m_n u_n + c_n v_n - m_n (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_2);$$

$$r_{jj}^* = \left(m_j \frac{\alpha_1}{\tau^2} + c_j \frac{\beta_1}{\tau} + r_{jj} \right); \quad (17)$$

$$u_j = \frac{\alpha_1}{\tau^2} z_j + \frac{\alpha_2}{\tau} \dot{z}_j + \alpha_3 \ddot{z}_j; \quad (18)$$

$$v_j = \frac{\beta_1}{\tau} z_j + \beta_2 \dot{z}_j + \beta_3 \ddot{z}_j; \quad (19)$$

$$j = 1, 2, \dots, n.$$

Если перемещения $z_1, \dots, z_n$ в левой части системы (16) соответствуют моменту времени t_k , то u_j, v_j – ускорения и скорость массы m_j соответствуют предыдущему моменту времени $t_k - \tau$. Этому же моменту времени соответствуют сила трения и сила упругости ограничителя, входящие в правую часть первых двух уравнений системы (16). При этом заданные функции $\ddot{z}_0(t)$ и $p(t)$ соответствуют моменту времени t_k .

В случае, когда скользящая плоскость расположена на уровне фундаментной плиты (рис. 2), или если предположить, что жесткости стоек виброплатформы (рис. 1) стремятся к бесконечности, уравнение динамического равновесия массы m_1 (рис. 2b) представляется в виде

$$-F_{I1} - F_{C1} - F_{S1} - F_{I0} - F_{S01} + p(t) = 0, \quad (20)$$

$$\text{где } F_{I1} = m_1 (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1); \quad F_{C1} = c_1 \dot{z}_1; \quad F_{S1} = r_{11} z_1 + r_{12} z_2;$$

$$F_{I0} = F_F \operatorname{sgn}(v_1);$$

$$F_{S01} = k_{01}(|z_1| - \Delta_1) \operatorname{sgn}(z_1) = F_R \operatorname{sgn}(z_1);$$

$$F_F = \mu M g; \quad (21)$$

$$F_R = k_{01}(|z_1| - \Delta_1),$$

v_1 – скорость движения массы m_1 .

Уравнение (20) с учетом (21) приобретает вид

$$m_1 \ddot{z}_1 + c_1 \dot{z}_1 + r_{11} z_1 + r_{12} z_2 + F_F \operatorname{sgn}(v_1) + F_R \operatorname{sgn}(z_1) = -m_1 \ddot{z}_0(t) + p(t). \quad (22)$$

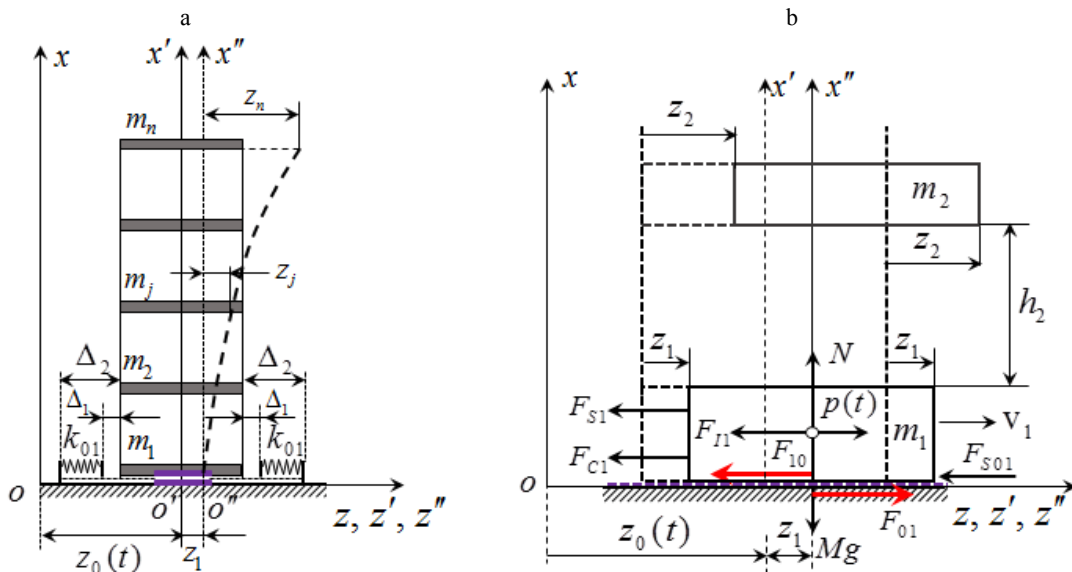


Рис. 2. Модель здания со скользящим поясом на уровне фундаментной плиты

Fig. 2. Model of a building with a sliding belt at the level of the foundation slab

Уравнения движений остальных масс модели, представленной на рис. 2а, записываются в общем виде:

$$m_j \ddot{z}_j + c_j \dot{z}_j + r_{j,j-1} z_{j-1} + r_{jj} z_j + r_{j,j+1} z_{j+1} = -m_j (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1); \quad (23)$$

$$j = 2, 3, \dots, n-1;$$

$$m_n \ddot{z}_n + c_n \dot{z}_n + r_{n,n-1} z_{n-1} + r_{nn} z_n = -m_n (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1). \quad (24)$$

Подставив (14) и (15) в (22)–(24), получим систему уравнений, которая представляется в виде:

$$r_{11}^* z_1 + r_{12} z_2 = m_1 u_1 + c_1 v_1 - p v_1 - p z_1 - m_1 \ddot{z}_0(t) + p(t);$$

$$p v_1 = F_F \operatorname{sgn}(v_1); \quad p z_1 = F_R \operatorname{sgn}(z_1);$$

$$r_{21} z_1 + r_{22}^* z_2 + r_{23} z_3 = m_2 u_2 + c_2 v_2 - m_2 (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1);$$

$$r_{32} z_2 + r_{33}^* z_3 + r_{34} z_4 = m_3 u_3 + c_3 v_3 - m_3 (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1); \quad (25)$$

$$r_{43} z_3 + r_{44}^* z_4 + r_{45} z_5 = m_4 u_4 + c_4 v_4 - m_4 (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1);$$

$$\dots$$

$$r_{n,n-1} z_{n-1} + r_{nn}^* z_n = m_n u_n + c_n v_n - m_n (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1).$$

По известным значениям $u, v, p v, p z$ в момент времени $t_{n-1} = (n-1)\tau$ и заданным значениям $\ddot{z}_0, p$ в момент времени $t_n = n\tau$, из реше-

ния системы уравнений (25) определяются вектор перемещений, соответствующий моменту времени $t_n = n\tau$, а затем для этого же момента времени по формулам (14), (15) вычисляются скорости $\dot{z}$ и ускорений $\ddot{z}$.

По найденным значениям перемещений, скоростей и ускорений формируются векторы правой части с компонентами $u, v, p v, p z$, соответствующие моменту времени $t_n = n\tau$. Далее решается система уравнений и определяются перемещения, соответствующие моменту времени $t_n = (n+1)\tau$ и т. д.

Уравнения (16) и (25) можно представить в матричной форме:

$$\mathbf{R}^* \mathbf{Z}_k = \mathbf{B}_k; \quad (26)$$

$$\mathbf{R}^* = \mathbf{R} + \mathbf{R}_1; \quad \mathbf{R}_1 = \operatorname{diag}(\kappa_1 \quad \kappa_2 \quad \dots \quad \kappa_n);$$

$$\kappa_j = \alpha_1 m_j / \tau^2 + \beta_1 c_j / \tau, \quad (27)$$

$$\mathbf{B}_k = \mathbf{M} \mathbf{U}_{k-1}^* + \mathbf{C} \mathbf{V}_{k-1}^* + \mathbf{F}_{k-1} - \mathbf{M} \ddot{\mathbf{Z}}_{0,k} + \mathbf{P}_k; \quad (28)$$

$$\mathbf{U}_{k-1}^* = \frac{\alpha_1}{\tau^2} \mathbf{Z}_{k-1} + \frac{\alpha_2}{\tau} \dot{\mathbf{Z}}_{k-1} + \alpha_3 \ddot{\mathbf{Z}}_{k-1}; \quad (29)$$

$$\mathbf{V}_{k-1}^* = \frac{\beta_1}{\tau} \mathbf{Z}_{k-1} + \beta_2 \dot{\mathbf{Z}}_{k-1} + \tau \beta_3 \ddot{\mathbf{Z}}_{k-1}; \quad (30)$$

$$\ddot{\mathbf{Z}}_{0,k} = \mathbf{I} \ddot{\mathbf{z}}_0(t_k); \quad \mathbf{P}_n = \{p_1 \quad p_2 \quad \dots \quad p_n\}_k^T; \quad (31)$$

$$\mathbf{F}_{k-1} = \mathbf{F}_{1,k-1} + \mathbf{F}_{2,k-1};$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, K.$$

Векторы силы трения-скольжения для моделей, показанных на рис. 1, 2, соответственно записываются в виде:

$$\mathbf{F}_{1,k-1} = \mu Q_1 \{ \text{sgn}(v_{21}) \quad -\text{sgn}(v_{21}) \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \}_{k-1}^T; \quad (32)$$

$$\mathbf{F}_{1,k-1} = \mu Q_2 \{ -\text{sgn}(v_1) \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \}_{k-1}^T, \quad (33)$$

где $v_{21} = v_2 - v_1$ – разность скоростей движения масс m_2 и m_1 , например, если $v_{21} > 0$, то $\text{sgn}(v_{21}) = 1$. Из (32) следует, что на массы m_2 и m_1 при других равных условиях действуют равные силы, но противоположенные по направлению. Сила трения в (33), соответствующая модели, представленной на рис. 2, зависит только от скорости движения массы m_1 относительно основания – v_1 . Векторы силы упругой реакции ограничителей для моделей, представленных на рис. 1 и 2, записываются в виде:

$$\mathbf{F}_{2,k-1} = F_{21} \{ \text{sgn}(z_{21}) \quad -\text{sgn}(z_{21}) \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \}_{k-1}^T; \quad (34)$$

$$\mathbf{F}_{2,k-1} = F_{10} \cdot \{ -\text{sgn}(z_1) \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \}_{k-1}^T; \quad (35)$$

$$F_{21} = k_{12}(|z_2 - z_1| - \Delta_1); \quad F_{10} = k_{01}(|z_1| - \Delta_1),$$

где $z_{21} = z_2 - z_1$ – разность относительных перемещений масс m_2 и m_1 для модели здания, установленной на виброплатформе (рис. 1), при условии $|z_{21}| \leq \Delta_1$; $F_{21} = 0$.

Сила упругой реакции F_{10} в (35) модели, представленной на рис. 2, также будет равняться нулю, если $|z_1| \leq \Delta_1$. Следовательно, в случае, когда модули z_{21} и z_1 становятся больше заданной величины Δ_1 , в правой части системы уравнений появляется дополнительная сила.

Векторы относительных ускорений и скоростей, полученных путем последовательных аппроксимаций, представляются в виде:

$$\mathbf{U}_k = \frac{\alpha_1}{\tau^2} (\mathbf{Z}_k - \mathbf{Z}_{k-1}) + \frac{\alpha_2}{\tau} \dot{\mathbf{Z}}_{k-1} + \alpha_3 \ddot{\mathbf{Z}}_{k-1}; \quad (36)$$

$$\mathbf{V}_k = \frac{\beta_1}{\tau} (\mathbf{Z}_k - \mathbf{Z}_{k-1}) + \beta_2 \dot{\mathbf{Z}}_{k-1} + \tau \beta_3 \ddot{\mathbf{Z}}_{k-1}, \quad (37)$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, K.$$

Вектор полных ускорений определяется как сумма векторов

$$\mathbf{W}_k = \mathbf{U}_k + \mathbf{I} \ddot{\mathbf{z}}_{0,k}, \quad (38)$$

где $\mathbf{I}$ – единичный вектор-столбец; $\ddot{\mathbf{z}}_{0,k}$ – ускорение основания, соответствующее моменту времени t_k .

Векторы-столбцы инерционных и упругих сил, а также изгибающий момент и поперечная сила в опорной части модели, соответствующие моменту времени t_k , могут быть представлены так:

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{M} \mathbf{U}_k; \quad \mathbf{Q}_k = \mathbf{R} \mathbf{Z}_k; \quad \mathbf{M}_{0,k} = \mathbf{X} \mathbf{S}_k; \quad \mathbf{Q}_{0,k} = \mathbf{e} \mathbf{S}_k; \quad (39)$$

$$\mathbf{X} = (x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n) \quad \mathbf{e} = (1 \quad 1 \quad \dots \quad 1),$$

где $\mathbf{X}$ – вектор-строка координат точек приложения сосредоточенных масс; $\mathbf{e}$ – единичный вектор-строка.

Алгоритм (26)–(39) реализован на различных примерах по расчету модели зданий со скользящим поясом.

Пример 1. Исследование свободных колебаний системы «виброплатформа – модель здания». Рассмотрим систему с четырьмя степенями свободы при отсутствии скольжения (рис. 3), где $m_1 = m_1^*$ состоит из суммы двух масс – массы стола виброплатформы и массы конструкции опорной части модели. Эти массы находятся в состоянии «залипания». Вибростол массой $1,223 \text{ тс}^2/\text{м}$ опирается на четыре стойки высотой $h_1 = 0,435 \text{ м}$, сечением $10 \times 5 \text{ см}$, модуль упругости материала $E_1 = 2,1 \cdot 10^7 \text{ т/м}^2$. Модель фрагмента каркасного здания состоит из сетки колонн $d \times 3d$, где $d = 1,5 \text{ м}$, и следующих данных: сечение колонн $10 \times 10 \text{ см}$; сечение ригелей $10 \times 5 \text{ см}$; толщина плиты 4 см ; высота этажей $h_2 = h_3 = h_4 = 0,75 \text{ м}$; модуль упругости материала $E_2 = 0,5 \cdot 10^6 \text{ т/м}^2$. Коэффициент жесткости стоек вибростола $k_1 = 4 \cdot 12 E_1 I_1 / h_1^3 = 0,13 \cdot 10^5 \text{ т/м}$. Коэффициенты жесткости стоек модели зда-

ния $k_2 = k_3 = k_4 = 8 \cdot 12 E_2 I_2 / h_2^3 = 0,95 \cdot 10^3$. Сосредоточенные массы имеют следующие значения: $m_1 = m_1^* = 1,256$, $m_2 = m_3 = 0,103$, $m_4 = 0,096$ тс²/м. Параметр затухания принят равным $\xi = 0,05$. Шаг по времени принят равным $\tau = 0,002$ с.

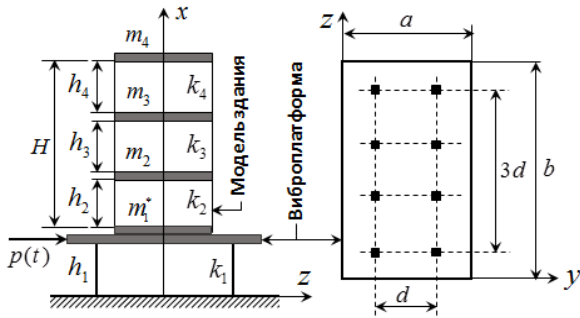


Рис. 3. Система «виброплатформа – модель здания»

Fig. 3. The “vibration platform – building model” system

На рис. 4 приведены графики свободных колебаний системы от действия мгновенного

импульса. При этом предполагается, что все массы исследуемого объекта приобретают одинаковую начальную скорость, равную $v_{01} = \dots = v_{04} = 0,1$ м/с. Можно заметить, что график колебания виброплатформы имеет простой затухающий гармонический характер с периодом $T = 0,063$ с. Колебания модели, например z_4 , происходят со значительно большей амплитудой и основным периодом свободных колебаний $T = 0,128$ с. По-видимому, это объясняется тем, что рассматриваемая система состоит из жесткой и массивной платформы и относительно гибкой модели.

На рис. 5 представлены графики изменения ускорений и сил инерции, полученных от действия мгновенного импульса. Видно, что ускорения масс m_4 и m_1 незначительно отличаются друг от друга, но силы инерции в них значительно отличаются.

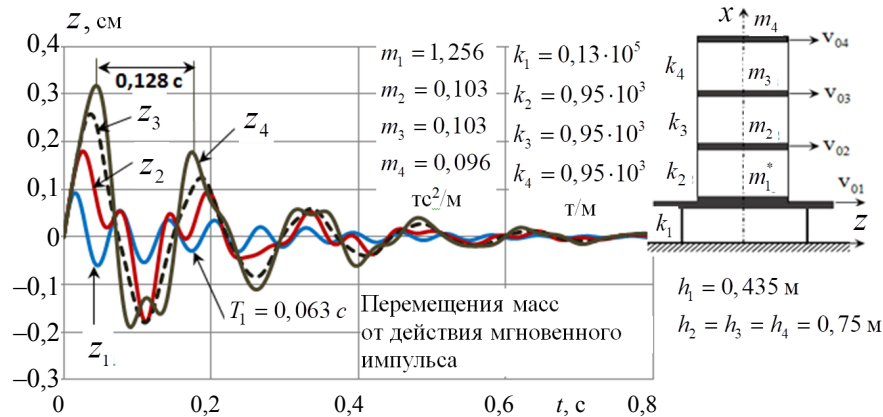


Рис. 4. Свободные колебания системы

Fig. 4. Free oscillations of the system

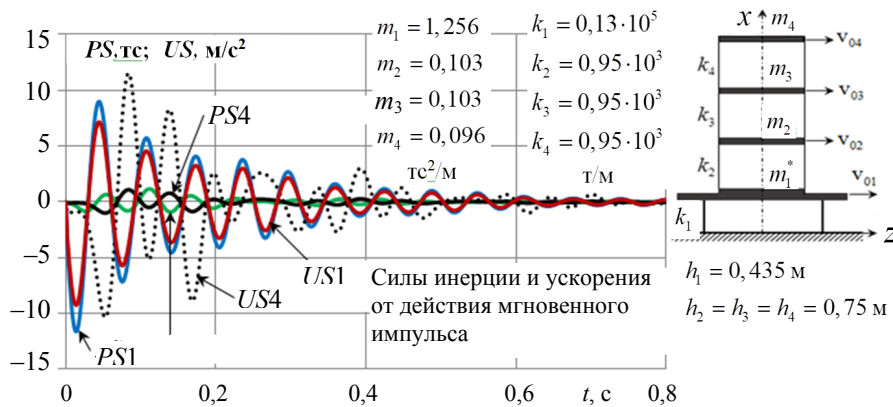


Рис. 5. Графики изменения ускорений и сил инерции в системе

Fig. 5. Graphs of changes in accelerations and inertial forces in the system

Пример 2. Исследование свободных колебаний системы «виброплатформа – модель здания» с учетом скольжения при исходных данных, приведенных в примере 1. Предполагается, что плоскость скольжения расположена между массами m_1 и m_2 , где $m_1 = 1,223$; $m_2 = 0,033$ тс²/м. В этой модели также рассматриваются действия мгновенного импульса, в результате которого все массы получают одинаковую начальную скорость, равную $v_0 = 0,1$ м/с, независимо от величин сосредоточенных масс. На рис. 6 приведены графики свободных колебаний системы, полученных от начальной скорости при различных значениях массы платформы. Результаты получены при коэффициенте трения $\mu = 0,1$ и параметре затухания $\xi = 0,05$. Кривые 1, 2, 3 получены при массе

платформы $m_1 = 1,223$ тс²/м, а кривые 4, 5, 6 – при $m_1 = 0,1223$ тс²/м. Здесь видно, что платформа (кривые 1 и 4) колеблется практически также, как в первой модели (пример 1). Что касается колебания модели, то она перемещается вправо на величину более 6 мм, а затем совершает колебательные движения с такой же частотой, как и платформа.

На рис. 7 показаны графики изменения ускорений массы m_1 , m_2 и m_5 системы, полученные от заданной начальной скорости, где вес платформы $Q_p = 12$ т. Аналогичные результаты получены и при $Q_p = 1,2$ т (рис. 8). Сравнение показывает, что уменьшение массы платформы приводит к значительному изменению ускорений платформы и модели.

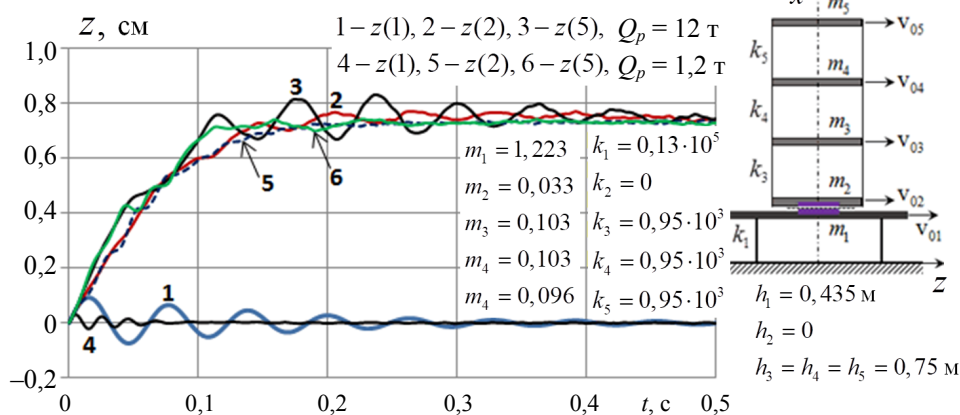


Рис. 6. Графики изменения перемещений

Fig. 6. Graphs of changes in displacements

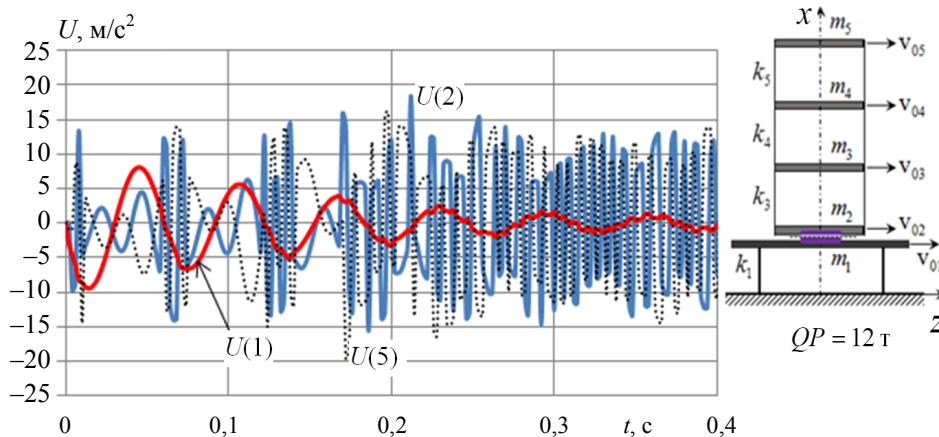


Рис. 7. Графики ускорений и сил инерции

Fig. 7. Acceleration and inertial force graphs

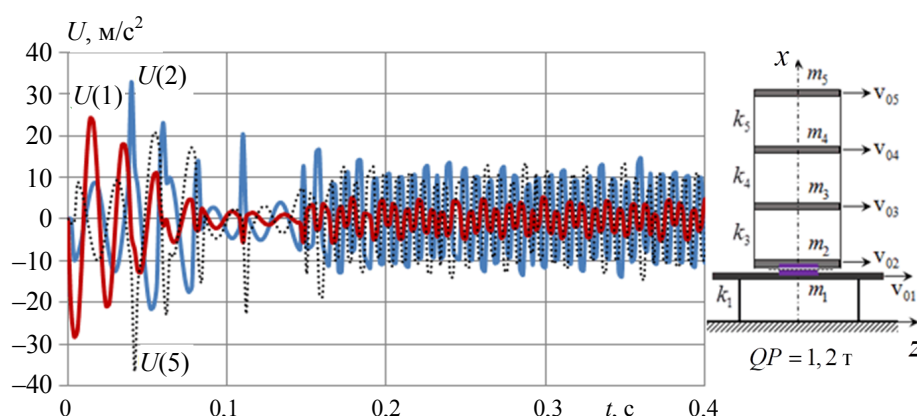


Рис. 8. Графики ускорений и сил инерции

Fig. 8. Acceleration and inertial force graphs

ВЫВОД

На основе разработанных алгоритмов и компьютерных программ получены результаты численного решения динамической задачи модели здания при различных граничных условиях и воздействиях. Свободные колебания модели в состоянии «залипания» с виброплатформой происходят с основным периодом $T = 0,128$ с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдурашидов, К. С. Сейсмостойкость сооружений / К. С. Абдурашидов, Я. М. Айзенберг, Т. Ж. Жунусов [и др.]. М.: Наука, 1989. 192 с.
2. Аубакиров, А. Т. Реакция зданий на свайных фундаментах с элементами сухого трения на воздействие реальных акселерограмм / А. Т. Аубакиров, С. Е. Ержанов // Совершенствование методов расчета и конструирования зданий и сооружений, возводимых в сейсмических районах: материалы Всесоюзного совещания. Алма-Ата, 1976. С. 12–19.
3. Низомов, Д. Н. Метод граничных уравнений в решении статических и динамических задач строительной механики / Д. Н. Низомов. М.: АСВ, 2000. 283 с.
4. Низомов, Д. Н. Численное моделирование сейсмоизолированных зданий с сухим трением / Д. Н. Низомов, И. К. Каландарбеков, И. И. Каландарбеков // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. 2018. Т. 61, № 1. С. 47–53.
5. Каландарбеков, И. К. Сравнительный анализ различных типов сейсмоизоляции в многоэтажных зданиях / И. К. Каландарбеков, Д. Н. Низомов, И. И. Каландарбеков // Известия Академии наук Республики Таджикистан. 2016. № 4 (165). С. 58–64.
6. Патент Республики Таджикистан № 78. Компьютерная программа численного решения динамической задачи сейсмоизолированного здания со скользящим поясом: опубл. 11.03.2019 / Низомов Д. Н., Каландарбеков И. К., Каландарбеков И. И.
7. Павлык, В. Г. Принцип проектирования сейсмостойких зданий с повышенными диссипативными свойствами / В. Г. Павлык // Материалы Всесоюзного совещания по проектированию и строительству сейсмостойких зданий и сооружений. Фрунзе, 1971. С. 210–218.
8. Экспериментальное исследование здания на сейсмоизолирующих опорах при действии динамических нагрузок (Япония) // Экспресс-Информ / ВНИИИС. Москва, 1984. Вып. 17. С. 8–10. (Сер. 14, Строительство в особых условиях. Сейсмостойкое строительство).
9. A Construction Method Providing High Earthquake-Resistance in Reinforced Concrete Building / O. Pekin, F. Sirmalifl, K. Özdenll, P. Rani. URL: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/6_vol2_2064.pdf.
10. Абрамов, Б. М. Динамический гаситель колебаний, вызываемых периодическими ударами / Б. М. Абрамов, А. Б. Абрамов // Механика машин: сб. ст. Тбилиси: Мецниереба, 1969. Вып. 20. С. 103–117.
11. Алексеев, А. М. О демпфировании колебаний импульсно-динамическим гасителем / А. М. Алексеев // Проблемы прочности. 1972. № 2. С. 52–54.
12. Джинчвелашвили, Г. А. Эффективность применения сейсмоизолирующих опор при строительстве зданий и сооружений / Г. А. Джинчвелашвили, О. В. Мкртычев // Транспортное строительство. 2003. № 9. С. 15–19.
13. Савинов, О. А. Сейсмоизоляция сооружений / О. А. Савинов // Динамические проблемы строительной техники: избранные статьи и доклады. СПб.: Изд-во ВНИИГ, 1993. С. 155–178.
14. Савинов, О. А. О некоторых особенностях применения систем сейсмоизоляции зданий и сооружений / О. А. Савинов, Т. А. Сандович // Известия ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева: сб. науч. трудов. Л.: Энергоатомиздат, 1982. Т. 161. С. 26–39.

Поступила 31.10.2024

Подписана в печать 09.01.2025

Опубликована онлайн 31.07.2025

REFERENCES

1. Abdurashidov K. S., Isenberg Ya. M., Zhunusov T. Zh., Skladnev N. N. (1989) *Seismic Resistance of Structures*. Moscow, Nauka Publ. 192 (in Russian).
2. Aubakirov A. T., Erzhanov S. E. (1976) Response of Buildings on Pile Foundations with Dry Friction Elements to the Impact of Real Accelerograms. *Sovershenstvovanie metodov rascheta i konstruirovaniya zdaniy i sooruzheniy, vozvodimyykh v seismicheskikh raionakh: materialy Vsesoyuznogo soveshchaniya* [Improving Methods of Calculation and Design of Buildings and Structures Erected in Seismic Areas: Proceedings of All-Union Conference]. Alma-Ata, 12–19 (in Russian).
3. Nizomov D. N. (2000) *The Method of Boundary Equations in Solving Static and Dynamic Problems of Structural Mechanics*. Moscow, ASB Publ. 283 (in Russian).
4. Nizomov D. N., Kalandarbekov I. K., Kalandarbekov I. I. (2018) Numerical Modeling of Seismically Isolated Buildings with Dry Friction. *Doklady Akademii Nauk Respubliki Tadjikistan = Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan*, 61 (1), 47–53 (in Russian).
5. Kalandarbekov I. K., Nizomov D. N., Kalandarbekov I. I. (2016) Comparative Analysis of Different Types of Seismic Isolation in Multi-Story Buildings. *Izvestiya Akademii Nauk Respubliki Tadjikistan* [Proceedings the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan], (4), 58–64 (in Russian).
6. Nizomov D. N., Kalandarbekov I. K., Kalandarbekov I. I. (2019) *Computer Program for Numerical Solution of Dynamic Problem of Seismically Isolated Building with Sliding Belt*. Patent Republic of Tajikistan No 78 (in Russian).
7. Pavlyk V. G. (1971) Design Principle of Earthquake-Resistant Buildings with Increased Dissipative Properties. Proceedings of the All-Union Conference on the Design and Construction of Earthquake-Resistant Buildings and Structures. Frunze, 210–218 (in Russian).
8. Experimental Study of a Building on Seismic Isolating Supports under Dynamic Loads (Japan). *Express-Inform. Series 14, Construction in special conditions. Earthquake-resistant construction*. Moscow, All-Union Scientific Research Institute of Certification, Is. 17, 8–10 (in Russian).
9. Pekin O., Sirmalifl F., Özdenll K., Rani P. A Construction Method Providing High Earthquake-Resistance in Reinforced Concrete Building. Available at: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/6_vol2_2064.pdf.
10. Abramov B. M., Abramov A. B. (1969) Dynamic Damper for Vibrations Caused by Periodic Impacts. *Mekhanika Mashin: sb. st. [Machine Mechanics: Collection of Articles]*. Tbilisi: Metsniereba, Is. 20, 103–117 (in Russian).
11. Alekseev A. M. (1972) Oscillation Damping by Pulsed Dynamic Dampers. *Strength of Materials*, 4 (2), 179–181. <https://doi.org/10.1007/bf01527575>.
12. Dzhinchvelashvili G. A., Mkrttychev O. V. (2003) Efficiency of Using Seismic Isolation Supports in the Construction of Buildings and Structures. *Transportnoe Stroitelstvo = Transport Construction*, (9), 15–19 (in Russian).
13. Savinov O. A. (1993) Seismic Isolation of Structures. *Dinamicheskie Problemy Stroitelnoy Mekhaniki. Izbrannye Statyi i Doklady* [Dynamic Problems of Structural Mechanics. Selected Articles and Reports]. Saint-Petersburg, Vedeneev VNIIG, 155–178 (in Russian).
14. Savinov O. A., Sandovich T. A. (1982) On Some Features of the Application of Seismic Isolation Systems for Buildings and Structures. *Izvestiya VNIIG imeni B. E. Vedeneeva: sb. nauch. Trudov* [News of All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering named after B. E. Vedeneev: Collection of Scientific Works]. Leningrad, Energoatomizdat Publ. Vol. 161, 26–39 (in Russian).

Received: 31.10.2024

Accepted: 09.01.2025

Published online: 31.07.2025

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-307-316>

УДК 33.332.3

Анализ геологических и гидрогеологических условий при проведении реконструкции набережной Ижевского водохранилища

Докт. экон. наук, проф. В. П. Грахов¹⁾, асп. М. А. Кисляков¹⁾,
канд. техн. наук, доц. А. А. Кисляков

¹⁾Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова» (Ижевск, Российская Федерация)

Реферат. Данная статья посвящена особенностям геологических и гидрогеологических условий при разработке проекта реконструкции набережной Ижевского водохранилища. Исследование проведено на левобережье Ижевского водохранилища (Набережная зодчего Дудина), в границах набережной от лестничного схода монумента «Дружба народов» до устья речки Подборенки и частично примыкающего к ней коренного склона до улицы Милиционной с переулком Широкий. Отсыпанный участок набережной шириной до 30 м ранее являлся частью акватории водохранилища. Формирование территории проводилось в 2010–2011 гг. преимущественно путем отсыпки песчаных грунтов высотой до 5,0 м и более, при этом от водохранилища участок отделен шпунтовой стенкой. Поверхность новой набережной ровная и практически плоская, с незначительным уклоном в сторону водохранилища. Гидрогеологические условия данной территории характеризуются наличием грунтовых вод, выявленных в пределах надпойменной террасы и у подножия коренного склона долины реки Иж. Воды выходят на поверхность в виде множества мочажин и нисходящих родников у подножия склона. В пределах исследуемого участка четыре места концентрации выходов воды оборудованы каптажем. В ходе исследования проведен детальный анализ физико-механических свойств грунтов и коррозионной активности грунтовых вод к основным строительным материалам. Результатом исследования является оценка геологических и гидрогеологических условий по структуре залегания геологических слоев грунта, физико-механическим свойствам грунтов, глубинам и характере залегания грунтовых вод, их коррозионной активности. Предложены мероприятия по сохранению и укреплению склонов, отводу грунтовых вод с территории склонов и набережной при проведении работ по реконструкции.

Ключевые слова: реконструкция зданий, геолого-литологическое строение участка, гидрогеологические условия, физико-механические свойства грунтов, коррозионная активность среды к основным строительным материалам, подземные воды, родники, мочажины, дренажная система, каптажные колодцы

Для цитирования: Грахов, В. П. Анализ геологических и гидрогеологических условий при проведении реконструкции набережной Ижевского водохранилища / В. П. Грахов, М. А. Кисляков, А. А. Кисляков // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 4. С. 307–316. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-307-316>

Analysis of Geological and Hydrogeological Conditions during the Reconstruction of the Embankment of the Izhevsk Reservoir

V. P. Grakhov¹⁾, M. A. Kislyakov¹⁾, A. A. Kislyakov

¹⁾Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russian Federation)

Abstract. This article is devoted to the peculiarities of geological and hydrogeological conditions during the development of the Izhevsk Reservoir embankment reconstruction project. The study was carried out on the left bank of the Izhevsk Reservoir

Адрес для переписки

Грахов Валерий Павлович
ФГБОУ ВО «Ижевский государственный
технический университет имени М. Т. Калашникова»
ул. Студенческая, 42,
426069, г. Ижевск, Российская Федерация
Тел.: +7 (3412) 77-60-55, доб. 3-256
kafedra.pgs@mail.ru

Address for correspondence

Grakhov Valerii P.
Kalashnikov Izhevsk State
Technical University
42, Studencheskaya str.,
426069, Izhevsk, Russian Federation
Tel.: +7 (3412) 77-60-55, доб. 3-256
kafedra.pgs@mail.ru

(Embankment of architect Dudin), within the boundaries of the embankment from the stairway of the 'Friendship of Peoples' monument to the mouth of the Podborenka River and the partially adjacent root slope to Militsionnaya Street with Shirokiy Lane. The filled-in section of the embankment with a width of up to 30 m was previously part of the water area of the reservoir. The area was formed in 2010–2011, mainly by dumping sandy soils up to 5.0 m thick and more, with a sheet pile wall separating the area from the reservoir. The surface of the new embankment is smooth and practically flat, with a slight slope towards the reservoir. The hydrogeological conditions of the area are characterized by the presence of groundwater, identified within the overflow terrace and at the foot of the bedrock slope of the Izh River valley. The water comes to the surface in the form of numerous cesspools and downward-flowing springs at the foot of the slope. Within the study area, four locations of water outlet concentrations are equipped with captage. In the course of the study, a detailed analysis of physical and mechanical properties of soils and corrosivity of groundwater to the basic construction materials was carried out. The result of the study is an assessment of geological and hydrogeological conditions in terms of the structure of occurrence of geological soil layers, physical and mechanical properties of soils, depths and nature of groundwater occurrence, their corrosivity. Measures to preserve and strengthen the slopes, groundwater drainage from the territory of slopes and embankment during reconstruction works are proposed.

Keywords: reconstruction of buildings, geological and lithological structure of the site, hydrogeological conditions, physical and mechanical properties of soils, corrosivity of the environment to the main building materials

For citation: Grakhov V. P., Kislyakov M. A., Kislyakov A. A. (2025) Analysis of Geological and Hydrogeological Conditions during the Reconstruction of the Embankment of the Izhevsk Reservoir. *Science and Technique*. 24 (4), 307–316. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-307-316> (in Russian)

Введение

Участок проектируемого строительства находится в Октябрьском районе г. Ижевска, на левобережье Ижевского водохранилища (Набережная зодчего Дудина), в границах набережной от лестничного схода монумента «Дружба народов» до устья речки Подборенки и частично примыкающего к ней коренного склона до улицы Милиционной с переулком Широкий [1].

Территория проектируемого строительства характеризуется достаточно хорошей инженерно-геологической изученностью, ранее здесь, непосредственно в пределах исследуемой площадки и на прилегающей территории, имеющей общую геоморфологическую привязку и аналогичные инженерно-геологические условия, выполнялись изыскания в период 1967–2011 гг. изыскательскими подразделениями проектного института «Удмуртгражданпроект».

В геоморфологическом отношении исследуемый участок расположен на левобережном коренном склоне и аллювиальной надпойменной террасе долины р. Иж [2]. Отсыпанный участок набережной вдоль береговой линии шириной до 30 м ранее представлял акваторию водохранилища. Отсыпка производилась в течение 2010–2011 гг. преимущественно песчаными грунтами мощностью до 5,0 м и более, от водохранилища она отгорожена шпунтовой

стенкой. Поверхность новой набережной ровная, практически плоская, с общим незначительным уклоном в сторону водохранилища, абсолютные отметки поверхности составляют 100,8–100,9 м.

Поверхность коренного склона имеет навалы насыпных грунтов, местами срезана, на отдельных участках террасирована старыми фронтальными оползнями. Почти на всем протяжении в подножии коренного склона имеются выходы подземных вод в виде мочажин и нисходящих родников. Территория склона в основном свободна от застройки, за исключением участка в районе пер. Широкий, который занят 1–2-этажной деревянной усадебной застройкой с хозяйственно-бытовыми постройками, садами и огородами [3].

На период проведения полевых инженерных изысканий (ноябрь 2011 г.) склон в целом находился в устойчивом состоянии, проявлений активизации оползней не наблюдается.

Склон повсеместно зарос кленом, тополями и мелким кустарником, которые своей корневой системой существенно защищают поверхность от развития современных эрозионных процессов.

По результатам рекогносцировочного обследования территории в 2017 г., произошедших изменений рельефа, гидрогеологических условий и техногенных воздействий со времени последних изысканий 2011 г. не отмечается.

На основе анализа пространственной изменчивости частных значений показателей физико-механических свойств грунтов, определенных лабораторными методами, с учетом информации о геологическом строении и литологическом составе исследуемого разреза были выделены следующие инженерно-геологические элементы (ИГЭ):

№ 1а – насыпные грунты, представленные песками, tQ ;

№ 1 – насыпные грунты, представленные суглинками, tQ ;

№ 2 – аллювиальные пески aQ ;

№ 3 – аллювиальные суглинки мягкопластичные aQ ;

№ 4 – аллювиальные суглинки текучепластичные aQ ;

№ 5 – делювиальные пески dQ ;

№ 6 – среднепермские глины элювиированные eP_2 ;

№ 7 – среднепермские глины плотные P_2 ;

№ 8 – среднепермские пески P_2 .

Гидрогеологические условия исследуемой территории характеризуются развитием грунтовых вод, вскрытых в пределах надпойменной террасы и подножия коренного склона долины реки Иж.

Уровень их по результатам изысканий (осень–зима 2011 г., осень 2008 г., осень–зима 2007 г.) изменяется в пределах 0,0–4,9 м от дневной поверхности, что соответствует абсолютным отметкам 98,9–104,5 м.

Воды имеют выходы на дневную поверхность в виде многочисленных мочажин и нисходящих родников в подножии коренного склона. В пределах исследуемой территории концентрированные выходы в четырех местах обустроены каптажем.

В районе северной части в подножии коренного склона у поворота проезжей части ул. Набережной происходит выход подземных вод в виде нисходящего родника (№ 1). Нумерация родников на исследуемой территории приведена с севера на юг. Родник каптирован железобетонным ограждением и металлической трубой диаметром 50 мм. Расход воды, замеренный на период изысканий (ноябрь 2011 г.) объемным способом, составил 0,3 л/с, вода стекает в бетонный лоток. Рядом с родником,

с восточной стороны со склона по тальвегу слабовыраженной в рельефе лощины, стекает ручей. Ширина потока воды 0,30 м, глубина 0,05 м, скорость течения 0,20 м/с, дно песчаное.

В 30 м вдоль проезжей части ул. Набережной к югу от родника № 1 находится выход подземных вод в виде родника № 2. Родник каптирован железобетонным ограждением и металлической трубой диаметром 30 мм. Расход воды, замеренный объемным способом, составил 0,4 л/с.

В огороде по пер. Широкий, д. 4, также в тальвеге пологой лощины имеются выходы подземных вод в виде нисходящего родника № 3 и мочажин. Родник каптирован железобетонным ограждением и имеет водослив по металлической трубе. Расход воды, замеренный в этот период объемным способом, составляет 0,18 л/с.

Из слива, оборудованного на роднике № 3, вытекает ручей шириной 0,5 м, глубиной 0,1 м, течет в южном направлении, далее уходит в стальную трубу Д 600 и стекает в акваторию водохранилища.

В 30 м к северо-востоку от здания кафе «Кораблик» у проезжей части ул. Набережной находится концентрированный выход подземных вод в виде нисходящего родника № 4. Родник каптирован железобетонным ограждением и металлической трубой диаметром 50 мм. Расход воды, замеренный объемным способом, составил 0,6 л/с.

Участок подножия склона в районе исследований характеризуется малодобитными выходами подземных вод в виде мочажин.

В период активного весеннего снеготаяния расходы в родниках увеличиваются почти в 2–2,5 раза.

Геологическое строение

В геолого-литологическом строении принимают участие техногенные грунты (насыпные tQ), аллювиальные (aQ) и делювиальные (dQ) отложения четвертичного возраста, подстилаемые на глубине 0,5–14,1 м породами уржумского яруса средней перми (P_{2ur}). На крутых участках склона, прилегающих

к территории монумента «Дружба народов», среднепермские отложения выходят на дневную поверхность [4].

Техногенные грунты (tQ) представлены практически повсеместно в пределах набережной и прилегающей части склона.

По времени и способу отсыпки они разделяются на планомерно возведенную насыпь и свалки грунтов и отходов производств.

Первые грунты, привезенные с карьера, отсыпаны с уплотнением при проведении работ по расширению набережной в сторону акватории в течение 2010–2011 гг. Для отсыпки использованы в основном пески пермского возраста. По цвету пески зеленовато-бурые, коричневые, по гранулометрическому составу разнозернистые, от пылеватых до средней крупности. Находятся они в основном в водонасыщенном состоянии, содержат гнезда красно-бурых глин. Грунты слежавшиеся. Мощность их составляет 3,0–5,3 м.

Грунты второй разновидности, слагающие отсыпку прежней набережной и застроенной части исследуемой территории, представлены также неоднородно перемешанными между собой суглинками, разнозернистыми песками со строительным и бытовым мусором (обломки кирпичей, булыжника, щебня, шлака и др.). По времени самоуплотнения характеризуются как слежавшиеся (более 30 лет). Вскрытая мощность их составляет от 0,3 до 2,4 м.

Насыпные грунты, представленные преимущественно песками, слагающими тело расширенной набережной, выделены в ИГЭ № 1а, а насыпные грунты, представленные преимущественно суглинками (прежняя набережная), выделены в ИГЭ № 1.

Аллювиальные (aQ) отложения, вскрытые вдоль береговой линии водохранилища у подножия коренного склона, слагают надпойменную террасу реки Иж. Они залегают непосредственно на поверхности среднепермских отложений, представлены песками и суглинками. Вся толща аллювиальных отложений полностью обводнена.

Пески коричневые, серовато-коричневые, серые, пылеватые и мелкие, насыщенные водой, в кровле слоя средней плотности, с глубиной более плотные. Вскрытая мощность составляет от 0,7 до 7,5 м и более.

Аллювиальные пески выделены в ИГЭ № 2.

Суглинки коричневые, серые и серовато-коричневые, по состоянию преимущественно текучепластичные, реже мягкопластичные, с отдельными прослойками тугопластичных разностей в подошве суглинков или песков. По числу пластичности суглинки в основном легкие, песчанистые, иногда прослойками тяжелые с примесью органических веществ. Суглинки переслаиваются с одновозрастными песками или залегают в толще песков. Вскрытая мощность суглинков от 0,4 до 9,2 м и более.

Аллювиальные суглинки мягкопластичные выделены в инженерно-геологический элемент № 3 вскрытой мощностью слоя 0,6–3,0 м.

Аллювиальные суглинки текучепластичные, в основном легкие, песчанистые, выделены инженерно-геологический элемент № 4, мощность слоя 0,4–9,2 м.

Делювиальные (dQ) отложения залегают на склоне и в его подножии в виде маломощного чехла на поверхности среднепермских отложений. Они вскрыты под насыпными грунтами с глубины 0,5 м. В литологическом отношении отложения представлены песками.

Пески светло-бурые, по гранулометрическому составу мелкие, средней плотности, малой степени водонасыщения, глинистые. Мощность песков составляет 1,7 м.

Делювиальные пески выделены в ИГЭ № 5.

Среднепермские (eP_2 , P_2) отложения залегают под вышеописанными насыпными, аллювиальными и делювиальными образованиями, литологически представлены глинами и песками.

Глины красноцветные, в кровле толщи слоем вскрытой мощностью от 0,3 до 2,9 м неоднородно выветрелые, элювиированные, от тугопластичных до твердых, ниже твердые и более плотные. Глины известковые, алевроитистые, с прослоями голубовато-серых алевроитов, на отдельных участках с редким щебнем и дресвой известняков. Вскрытая мощность глин составила от 0,3 до 7,4 м и более.

Элювиированные глины выделены в ИГЭ № 6, плотные глины выделены в ИГЭ № 7.

Пески зеленовато-коричневые, серовато-зеленые, по грансоставу разнозернистые, от

пылеватых и мелких до средней крупности, в основном средней степени водонасыщения и насыщенные водой, слабосцементированные. Пески залегают в толще глин в виде линзовидных слоев. Вскрытая мощность их составляет 2,6–5,3 м и более.

Среднепермские пески выделены в ИГЭ № 8.

Условия залегания литолого-генетических видов и разновидностей грунтов приведены на инженерно-геологическом разрезе (рис. 1).

По степени водопроницаемости, согласно т. Б.7 ГОСТ 25100–2011 [5], грунты ИГЭ № 1а, 2, 5, 8 – насыпные грунты песчаные, четвертичные и среднепермские пески ($K_{\phi} = 1,2, 0,9, 1,5$ м/сут.), являются водопроницаемыми, ИГЭ № 1, 4, 6 и 7 – насыпные грунты глинистые, четвертичные суглинки и среднепермские глины, относятся к слабопроницаемым ($K_{\phi} = 0,18, 0,1, 0,14$ и $0,02$ м/сут.).

Физико-механические характеристики грунтов приведены в табл. 1.

По степени морозной пучинистости, согласно п. 2.137 Пособия к СНиП 2.02.01.83 [6], грунты ИГЭ № 1а насыпные песчаные и № 2 пески относятся к среднепучинистым, № 5 пески – к слабопучинистым, согласно п. 6.8.3, 6.8.8 СП 22-13330–2011 «Основания зданий и

сооружений» глинистые грунты в зависимости от параметра R_f относятся: ИГЭ № 1, 3, 4 – к сильнопучинистым, ИГЭ № 6 – к среднепучинистым, ИГЭ № 7 и 8 – к практически непучинистым.

Нормативная глубина промерзания грунтов, по данным теплотехнических расчетов согласно п. 5.5.3 СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений», при сумме среднемесячных отрицательных температур за зиму $M_t = 46,6$ (г. Ижевск, по СП 131.13330.2012 «Строительная климатология») равна для глинистых грунтов – 1,57 м, для песков пылеватых и мелких – 1,91 м, для песков средней крупности и гравелистых – 2,05 м.

Гидрогеологические условия

Гидрогеологические условия исследуемой территории характеризуются развитием грунтовых вод, вскрытых в пределах надпойменной террасы и подножия коренного склона долины реки Иж.

Уровень их на период настоящих изысканий (зима 2017 г.) и предыдущих (осень–зима 2011 г. [7]) изменяется в пределах 0,0–3,2 м от дневной поверхности, что соответствует абсолютным отметкам 98,9–105,1 м.

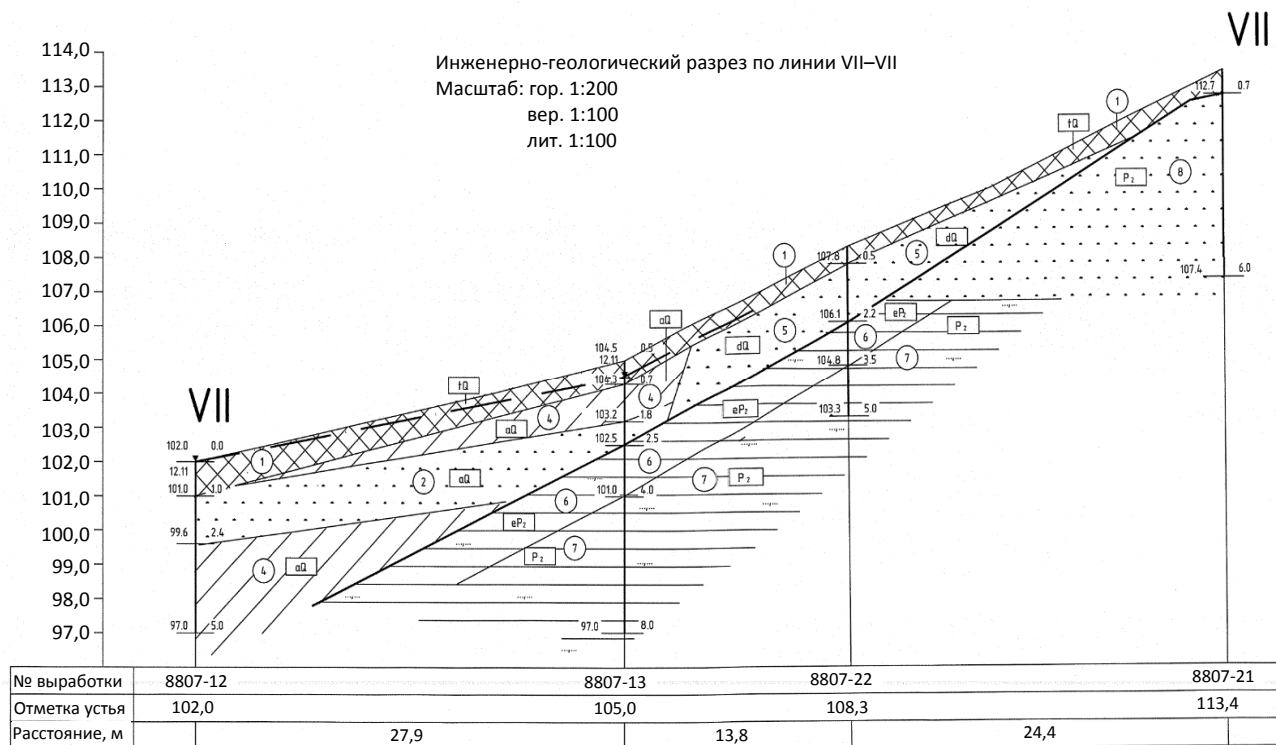


Рис. 1. Характерный инженерно-геологический разрез склона от основания до ул. Милиционной

Fig. 1. Characteristic engineering-geological section of the slope from the base to Militiionnaya Street

Физико-механические характеристики грунтов
Physical and mechanical characteristics of soils

№ ИГЭ	Геологический индекс	Показатель текучести	Коэффициент пористости	Плотность, г/см ³		Угол внутреннего трения, град.		Удельное сцепление, кПа		Модуль деформации, МПа	Коэффициент фильтрации, м/сут.
				0,85	0,95	0,85	0,95	0,85	0,95		
1a	<i>tQ</i>		0,63	1,90	1,88	41	37	8	5		1,20
1	<i>tQ</i>		0,74	$\frac{1,92}{1,98}$	$\frac{1,90}{2,00}$						0,18
2	<i>aQ</i>		0,63	$\frac{1,95}{2,01}$	$\frac{1,92}{2,04}$	29	27	5	4	10	0,90
3	<i>aQ</i>	0,57	0,75	$\frac{1,88}{2,00}$	$\frac{1,84}{2,04}$	13	12	12	10	6	0,10
4	<i>aQ</i>	0,79	0,88	$\frac{1,85}{1,93}$	$\frac{1,83}{1,95}$	13	12	9	8	4	0,10
5	<i>dQ</i>		0,68	1,76	1,73	29	28	4	2	11	1,50
6	<i>eP₂</i>	0,24	0,70	$\frac{1,97}{2,01}$	$\frac{1,95}{2,03}$	18	14	52	41	18	0,14
7	<i>P₂</i>	-0,21	0,49	$\frac{2,07}{2,13}$	$\frac{2,05}{2,15}$	28	27	90	83	24	0,02
8	<i>P₂</i>		0,65	1,88	1,86	30	28	7	6	22	1,5

Воды имеют выходы на дневную поверхность в виде многочисленных мочажин и нисходящих родников в подножии коренного склона. В пределах исследуемой территории концентрированные выходы в четырех местах обустроены каптажем. Выше по уклону коренного склона скважинами глубиной до 3–6 м (до ул. Милиционной) грунтовые воды не вскрыты.

Водовмещающими породами в пределах вскрытого разреза служат преимущественно четвертичные аллювиальные пески и суглинки, а также среднепермские пески и элювирирован-

ные глины, водоупором в основном служат плотные среднепермские глины. Грунтовые воды разновозрастных отложений свободно сообщаются друг с другом, депрессионная кривая их уровня, плавно изгибаясь, переходит из одних отложений в другие. Воды безнапорные, питание происходит за счет атмосферных осадков [8]. Общее направление движения грунтового потока происходит в юго-западном направлении, в сторону водохранилища.

Характер изменения уровня грунтовых вод от основания склона до шпунтового ограждения набережной приведен на рис. 2.

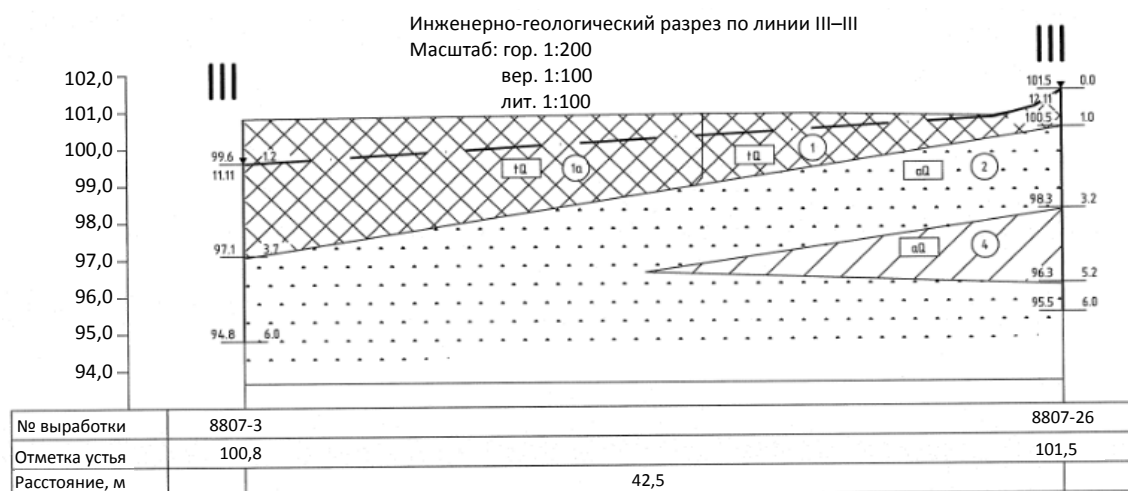


Рис. 2. Характер изменения уровня грунтовых вод от основания склона до шпунтового ограждения набережной

Fig. 2. Character of groundwater level change from the base of the slope to the sheet piling embankment fence

Для перехвата и отвода грунтовых вод проектом реконструкции предусматривается дренажная сеть с устройством каптажных колодцев в местах выхода мочажин. Пример дренажной сети показан на рис. 3.

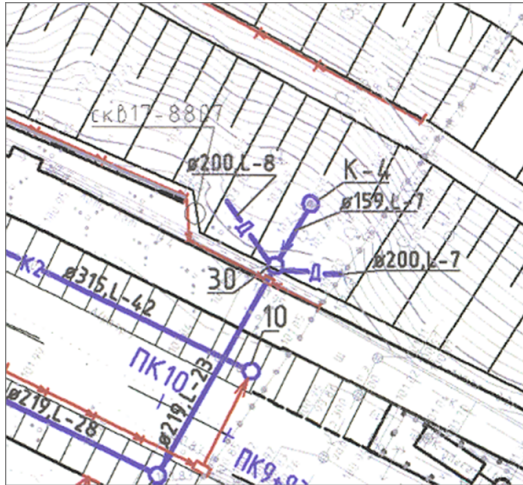


Рис. 3. Пример дренажной сети для перехвата и отвода грунтовых вод

Fig. 3. Example of a drainage network for interception and drainage of groundwater

Конструктивное решение каптажного колодца представлено на рис. 4.

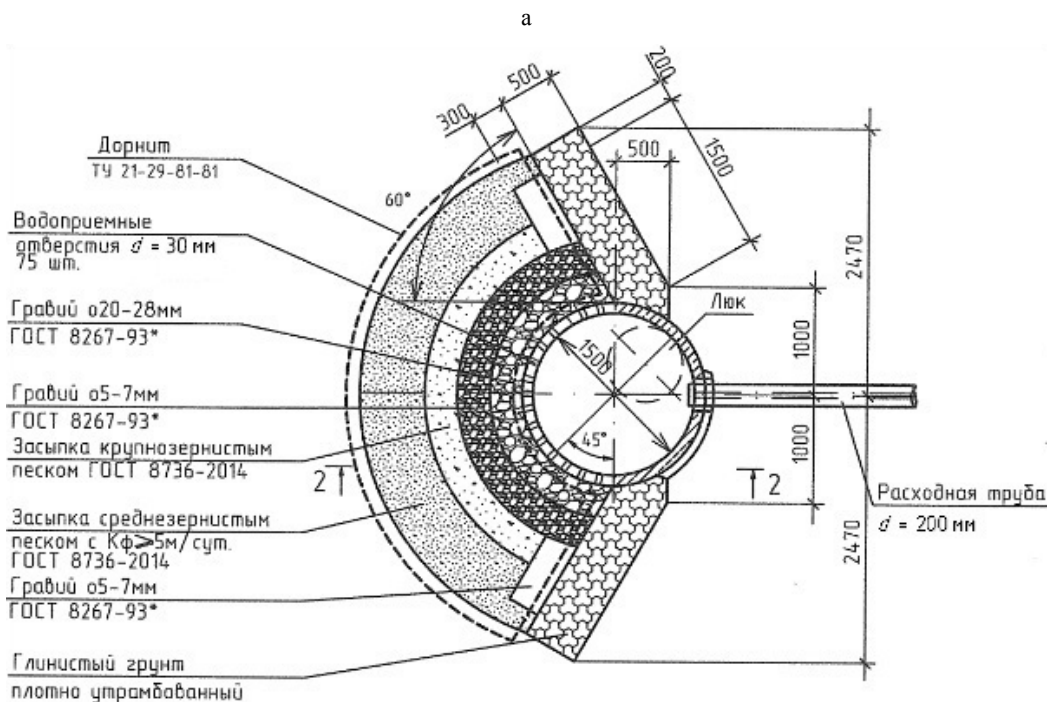


Рис. 4. Устройство каптажного колодца: а – план; б – разрез (окончание рис. см. на стр. 314)

Fig. 4. Construction of a drip well: a – Plan of the drip well; b – Sectional view (end of figure see on page 314)

Для дренирования грунтовой воды в колодец устраивается перфорация бетонной стенки, просверливаются отверстия диаметром 30 мм с шагом 150 на 150 мм (рис. 5).

Грунтовые воды по минерализации пресные (0,70 мг/л). По анионному составу они хлоридно-гидрокарбонатные, по катионному составу кальциевые и натриево-кальциевые, очень жесткие, кислые и нейтральные.

Коррозионная агрессивность вод по отношению к свинцовой оболочке кабеля оценивается как низкая, к алюминиевой оболочке кабеля – как высокая (по ГОСТ 9.602–2005).

По отношению к бетону нормальной (W4) проницаемости воды родников № 1 и 4 обладают слабой степенью углекислотной агрессивности (по СП28.13330.2012 «Защита строительных конструкций от коррозии»). Все воды средне-агрессивны к металлическим конструкциям.

Инженерно-геологические процессы

К карстовому району территория исследования не относится. Физико-геологические процессы на исследуемой территории представлены водно-склоновыми и водно-гравитационными процессами.

b

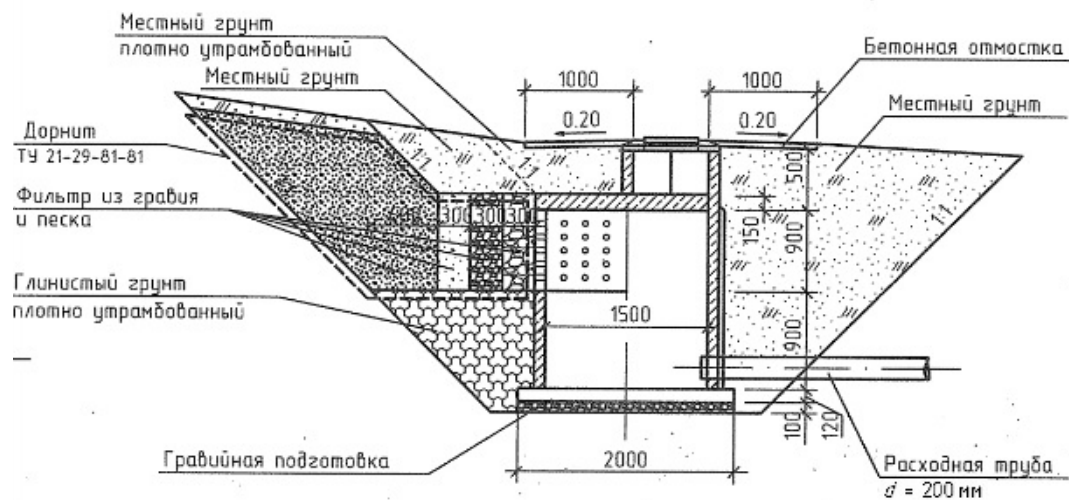


Рис. 4. Окончание

Fig. 4. End

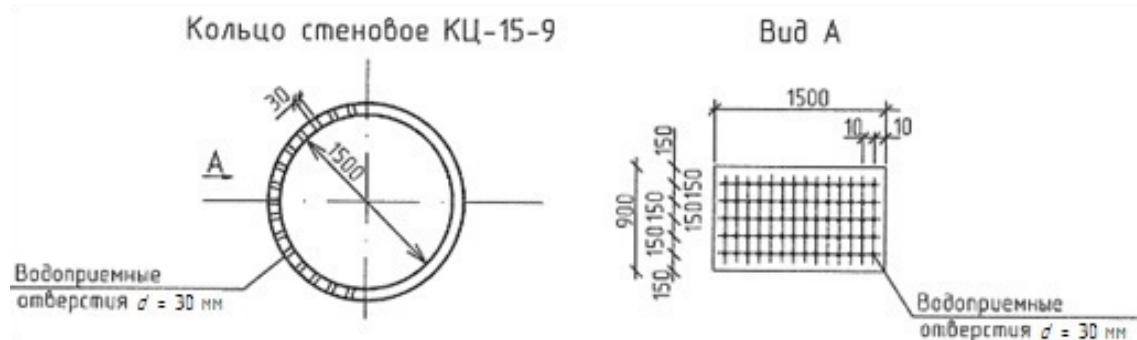


Рис. 5. Водоприемные отверстия в стенке каптажного колодца

Fig. 5. Water inlet openings in the wall of the drip well

Первые связаны с проявлением плоскостного смыва разрушением поверхности склона мелкими струями дождевых и талых вод. В результате на склонах образуются рытвины и промоины, а у подножия – аккумулятивные шлейфы делювиальных отложений [9].

Вторые характеризуются смещением грунтов по склону при его увлажнении. В настоящее время проявляются лишь в образовании сплывов незначительных смещений, захватывающих только самый поверхностный покров на глубину не более 1 м.

Данные процессы не имеют активного развития, их проявления незначительны и отмечены лишь на крутом коренном склоне. Этому в достаточной мере способствует древесная растительность, механически закрепляя своей корневой системой поверхность скло-

на от размыва и смыва дождевыми и талыми водами. Вырубка деревьев и кустарников в совокупности с протекающими процессами обводнения грунтов зоны аэрации может привести к нарушению гравитационного равновесия и потере устойчивости грунтового массива [10]. Кроме того, при этом ожидается развитие линейной эрозии склона дождевыми и талыми водами.

По критериям типизации по подтопленности исследуемая территория разделяется на два участка, приуроченных к различным геоморфологическим формам рельефа:

а) участок набережной в пределах надпойменной террасы и подножия склона относится к району подтопленных в естественных условиях (постоянно подтопленных, I-A-1 согласно приложению И СП 11-105-97, часть II) [11].

Основным источником подтопления набережной Ижевского водохранилища служат подземные воды, дренирующиеся со стороны коренного склона в его подножии, в условиях подпора их подземного стока от новой подпорной стенки набережной. В данном случае рекомендуется создание горизонтального дренажа, включающего головной дренаж по линии подножия коренного склона и береговой дренаж у подпорной стенки. Кроме того, в местах интенсивного выхода подземных вод (родники, мочажины) для их отвода рекомендуются линейные дренаж-врезы от головного дренажа в сторону склона (в сторону выходов);

б) участок склона вдоль его бровки западнее ул. Милиционной относится к непотопляемым в силу естественных причин (естественный дренаж), III-A-1, подтопление здесь отсутствует и не прогнозируется в будущем.

Однако в периоды весеннего снеготаяния и сильных ливневых и осенних продолжительных дождей верхняя часть склона может интенсивно обводняться водами верховодки, особенно на участках с насыпными грунтами (засыпка траншей подземных инженерных коммуникаций, выравнивание склона при его благоустройстве грунтами, без надежного их закрепления). Обводнение несложившихся (неукрепленных) насыпных грунтов при оттаивании может привести к их сползанию на отдельных насыпных участках склона. Также требуется защита склона от размыва регулированием поверхностного стока.

Проявление морозного пучения грунтов связано с сезонным промерзанием и оттаиванием грунтов. Нормативная глубина промерзания грунтов, по данным теплотехнических расчетов согласно п. 5.5.3 СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений», при сумме среднемесячных отрицательных температур за зиму $Mt = 46,6$ (г. Ижевск, по СП 131.13330.2012 «Строительная климатология») равна: для глинистых грунтов – 1,57 м, для песков пылеватых и мелких – 1,91 м, для песков средней крупности и гравелистых – 2,05 м.

ВЫВОДЫ

1. Практически на всем протяжении в подножии коренного склона имеются выходы подземных вод в виде мочажин и нисходящих родников.

2. Насыпные грунты, слагающие набережную, обводнены. Уровень грунтовых вод изменяется от поверхности у подножия склонов до отметки уровня Ижевского водохранилища у шпунтового ограждения набережной.

3. Рекомендуется предусмотреть создание горизонтального дренажа, включающего головной дренаж по линии подножия коренного склона и береговой дренаж у подпорной стенки. Кроме того, в местах интенсивного выхода подземных вод (родники, мочажины) для их отвода рекомендуются линейные дренаж-врезы от головного дренажа в сторону склона (в сторону выходов).

4. Грунтовый массив на склоне находится в относительном равновесии. Проявления активизации оползней не наблюдается. Устойчивому состоянию способствуют корни деревьев и кустарников.

5. При проведении работ по планировке откосов, для исключения обводнения грунтов зоны аэрации и развития линейной эрозии склона дождевыми и талыми водами, рекомендуется предусмотреть укрепление склонов геосетками в сочетании с укладкой рулонных газонов и посадкой растительности [12].

6. Требуется проведение мероприятий по надежной инженерной защите участка в верхней части склона от вод верховодки, а также по регулированию поверхностного стока. Учитывая, что здесь будут распространены или образованы неустойчивые насыпные грунты (засыпка траншей подземных инженерных коммуникаций, выравнивание склона при его благоустройстве грунтами без надежного их закрепления), обводнение может привести к разжижению грунтов, к снижению их физико-механических свойств и, как следствие, к сползанию грунтового массива вниз по склону.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грахов, В. П. Пространственное развитие Удмуртии и главные задачи инженерной геологии / В. П. Грахов,

- С. А. Мохначев, А. А. Кисляков, М. А. Кисляков [и др.] // Научное обозрение: теория и практика. 2023. Т. 13, № 5. С. 721–730. <https://doi.org/10.35679/2226-0226-2023-13-5>.
2. Природные ресурсы и экология Удмуртии: сб. Ижевск: Изд-во УдГУ, 1995. 259 с.
 3. Перевощиков, А. П. Экономико-географический и социальный очерк. Ижевск: Удмуртия, 1995. 352 с.
 4. Ельцов Ю. А. Грунты Удмуртии / Ю. А. Ельцов. Ижевск, 1983. 175 с.
 5. Грунты. Классификация: ГОСТ 25100–2011. Взамен ГОСТ 25100–95; Введ. 01.01.2013. М.: Стандартинформ, 2013.
 6. Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2-02.01–83). М.: Стройиздат, 1986.
 7. Реконструкция набережной Ижевского водохранилища, 4-я очередь строительства (благоустройство от эспланады до устья р. Подборенка). Инженерно-геологические изыскания / ЗАО Удмуртгражданпроект. Ижевск, 2011. Арх. № 8807.
 8. Рекомендации по определению гидрогеологических параметров грунтов методом откачки воды из скважин. М.: Стройиздат, 1986.
 9. Рысин, И. И. Овражная эрозия в Удмуртии / И. И. Рысин. Ижевск: Изд-во УдГУ, 1998. 274 с.
 10. A Linked Geomorphological and Geophysical Modelling Methodology Applied to an Active Landslide / J. Boyd, J. Chambers, P. Wilkinson [et al.] // Landslides. 2021. Vol. 18, No 8, P. 2689–2704. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01666-w>.
 11. Геоэкологические проблемы Удмуртии: сб. Ижевск: Изд-во УдГУ, 1997. 158 с.
 12. Кисляков, А. А. Опыт применения геосеток при реконструкции набережной Ижевского водохранилища / А. А. Кисляков, М. А. Кисляков, Н. К. Симаков // Социально-экономическое управление: теория и практика. 2019. № 2 (37). С. 131–134.
- Поступила 03.03.2025
Подписана к печати 23.06.2025
Опубликована онлайн 31.07.2025
- tial Development of Udmurtia and the Main Tasks of Engineering Geology. *Nauchnoe Obozrenie: Teoriya i Praktika* = *Scientific Review: Theory and Practice*, 13 (5), 721–730. <https://doi.org/10.35679/2226-0226-2023-13-5> (in Russian)
 2. *Natural Resources and Ecology of Udmurtia: Collection*. Izhevsk, Udmurt State University Publishing House, 1995. P. 259 (in Russian).
 3. Perevoshchikov A. P. (1995) Economic, geographical and social overview. Izhevsk, Udmurtia Publ. P. 352 (in Russian).
 4. Eltsov Yu. A. (1983) *Soils of Udmurtia*. Izhevsk. P. 175 (in Russian).
 5. State Standard 25100-2011. *Soils. Classification*. Moscow, Standartinform Publ., 2013 (in Russian).
 6. *Manual for Designing Foundations of Buildings and Structures (to SNiP [Construction Rules and Regulations] 2-02.01-83)*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986 (in Russian).
 7. CJSC Udmurtgrazhdanproekt (2011) *Reconstruction of the Embankment of the Izhevsk Reservoir, Phase 4 of Construction (Improvement from the Esplanade to the Mouth of the Podborenka River). Engineering and Geological Surveys*. Izhevsk. Archive No. 8807 (in Russian).
 8. *Recommendations for Determining the Hydrogeological Parameters of Soils by Pumping Water from Wells*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986 (in Russian).
 9. Rysin I. I. (1998) *Ravine Erosion in Udmurtia*. Izhevsk, Udmurt State University Publishing House. P. 274 (in Russian).
 10. A Linked Geomorphological and Geophysical Modelling Methodology Applied to an Active Landslide / J. Boyd, J. Chambers, P. Wilkinson [et al.] // *Landslides*. 2021. Vol. 18, No 8, P. 2689–2704. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01666-w>.
 11. *Geocological Problems of Udmurtia: Collection*. Izhevsk, Udmurt State University Publishing House, 1997. P. 158 (in Russian).
 12. Kislyakov, A. A. Kislyakov M. A., Simakov N. K. (2019) Experience in Using Geogrids in the Reconstruction of the Embankment of the Izhevsk Reservoir. *Sotsialno-Ekonomicheskoe Upravlenie: Teoriya i Praktika* [Socio-Economic Management: Theory and Practice], (2), P. 131–134 (in Russian).

REFERENCES

1. Grakhov V. P., Mokhnachev S. A., Kislyakov A. A., Kislyakov M. A., Oleshko A. S., Simakov N. K. (2023) Spa-

Received: 03.03.2025

Accepted: 23.06.2025

Published online: 31.07.2025

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-317-326>

УДК 656.073.9

Моделирование транспортных потоков при помощи нейронных сетей

Кандидаты техн. наук, доценты В. В. Морозов¹⁾, Е. М. Чикишев¹⁾

¹⁾Тюменский индустриальный университет (Тюмень, Российская Федерация)

Реферат. Объектом исследования является процесс движения транспортных потоков на городской улично-дорожной сети мегаполиса. В связи с возрастающей урбанизацией увеличиваются и негативные ее последствия, в числе которых – снижение скорости сообщения вплоть до образования заторов. Цель работы – разработка математического аппарата для управления нагруженными транспортными потоками на улично-дорожной сети городов при помощи нейронных сетей. Результаты исследования направлены на решение проблемы формирования транспортных заторов в городах, особенно в крупнейших. Методологическая база исследования включает в себя системный подход, системный анализ, синтез, теории транспортных потоков, систем, динамических систем, сложных систем и хаоса. Целевой функцией исследования определена максимизация кинетической энергии транспортного потока. В качестве оптимизационного критерия предложено использовать меру хаоса дорожного движения – энтропию транспортных потоков. По результатам исследования получена математическая модель изменения кинетической энергии транспортного потока под влиянием относительной энтропии занятости полос дорожным движением на регулируемых перекрестках. Для мониторинга транспортных потоков предложено использовать уличные (дорожные) камеры видеонаблюдения. Для этого разработаны математические модели, позволяющие измерять занятость полос движением на конкретных регулируемых пересечениях посредством обработки видеозображения нейронными сетями в режиме реального времени. Для подтверждения разработанного математического аппарата проводятся соответствующие экспериментальные исследования. В данной статье представлены текущие результаты эксперимента, которые подтверждают предлагаемые авторами математические модели. Полученные результаты исследования справедливы только с учетом соблюдения обозначенных ограничений и требований к транспортному потоку. С одной стороны, это значительно сужает возможность применения результатов на практике, с другой – позволяет повысить точность и чистоту экспериментальных исследований.

Ключевые слова: моделирование транспортных потоков, организация дорожного движения, нейросетевые технологии

Для цитирования: Морозов, В. В. (2025) Моделирование транспортных потоков при помощи нейронных сетей / В. В. Морозов, Е. М. Чикишев // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 4. С. 317–326. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-317-326>

Modeling Traffic Flows Using Neural Networks

V. V. Morozov¹⁾, E. M. Chikishev¹⁾,

¹⁾Industrial University of Tyumen (Tyumen, Russian Federation),

Abstract. The object of the study is the process of traffic flows on the urban street and road network of a metropolis. Due to increasing urbanization, its negative consequences are also increasing, including a decrease in the speed of communication, leading to the formation of traffic congestion. The aim of the work is to develop a mathematical apparatus for controlling congested traffic flows on the urban road network using neural networks. The results of the study are aimed at solving the problem of traffic congestion in cities, especially in the largest ones. The methodological basis of the research includes a systematic approach, systems analysis, synthesis, theories of traffic flows, systems, dynamic systems, complex systems and chaos. The objective function of the study is to maximize the kinetic energy of the transport flow. As an optimization criterion, it is proposed to use a measure of traffic chaos – the entropy of traffic flows. According to the results of the study, a mathematical model was obtained for changing the kinetic energy of the traffic flow under

Адрес для переписки

Чикишев Евгений Михайлович
Тюменский индустриальный университет
ул. Володарского, 38,
625000, г. Тюмень, Российская Федерация
Тел.: +734 5-253-95-40
chikishevem@tyuiu.ru

Address for correspondence

Chikishev Evgeniy M.
Industrial University of Tyumen
38, Volodarskogo str.,
220072, Tyumen, Russian Federation
Tel.: +734 5-253-95-40
chikishevem@tyuiu.ru

the influence of the relative entropy of the lane occupancy by traffic at controlled intersections. It is proposed to use street (road) video surveillance cameras to monitor traffic flows. For this purpose, mathematical models have been developed that allow measuring the occupancy of traffic lanes at specific controlled intersections by processing video images with neural networks in real time. Experimental studies are conducted to confirm the developed mathematical apparatus. The article presents the current results of the experiment, which confirm the proposed mathematical models. The obtained research results are valid only taking into account the specified restrictions and requirements for traffic flow. On the one hand, this significantly narrows the possibility of applying the results in practice, on the other hand, it allows to increase the accuracy and purity of experimental research.

Keywords: traffic flow modeling, traffic management, neural network technologies

For citation. Morozov V. V., Chikishev E. M. (2025) Modeling Traffic Flows Using Neural Networks. *Science and Technique*. 24 (4), 317–326. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-317-326> (in Russian)

Введение

В настоящее время во многих городах мира продолжается рост автомобилизации. Постоянно увеличивающееся количество транспортных средств на городских улицах влечет за собой ряд сложных и нерешенных проблем. Одной из таких наиболее значимых проблем, безусловно, является формирование транспортных заторов [1–2].

Первый взрывной рост автомобилизации произошел в 1930-е гг. в США и в 1950-е гг. в Западной Европе. По общеизвестным причинам темпы прироста автомобилей в Российской Федерации не наблюдались до начала 90-х гг. прошлого столетия [1–2]. Однако в начале XXI в. во многих регионах России произошел взрыв автомобилизации. Тюменская область, являющаяся одним из самых экономически развитых регионов, также не исключение [3].

Регрессионный анализ показал, что процесс изменения уровня автомобилизации в г. Тюмени может быть описан полиномиальной функцией второго порядка с коэффициентом детерминации, равным приблизительно $R^2 \approx 0,92$ (рис. 1).

Следовательно, прогнозирование также может быть основано на продолжении линии тренда. Таким образом, возникают обоснованные предположения, что этот показатель к 2030 г. приблизится к отметке в 1000 авт./тыс. чел. Это означает, что в среднем у каждого жителя города будет личный автомобиль.

Вместе с тем установлено, что стабильный прирост транспортных средств помимо транспортных заторов провоцирует рост дорожно-транспортных происшествий различной степени тяжести. Для повышения уровня безопасности дорожного движения и решения данной проблемы в Российской Федерации, Беларуси и мире зачастую применяется светофорное регулирование. С одной стороны, это является эффективным способом снижения уровня аварийности, с другой – одним из факторов снижения пропускной способности уличных пересечений, что дополнительно усугубляет проблему. Анализ статистических данных также показал, что в течение десятилетнего периода количество регулируемых участков улично-дорожной сети в г. Тюмени выросло на 28 % (рис. 2).

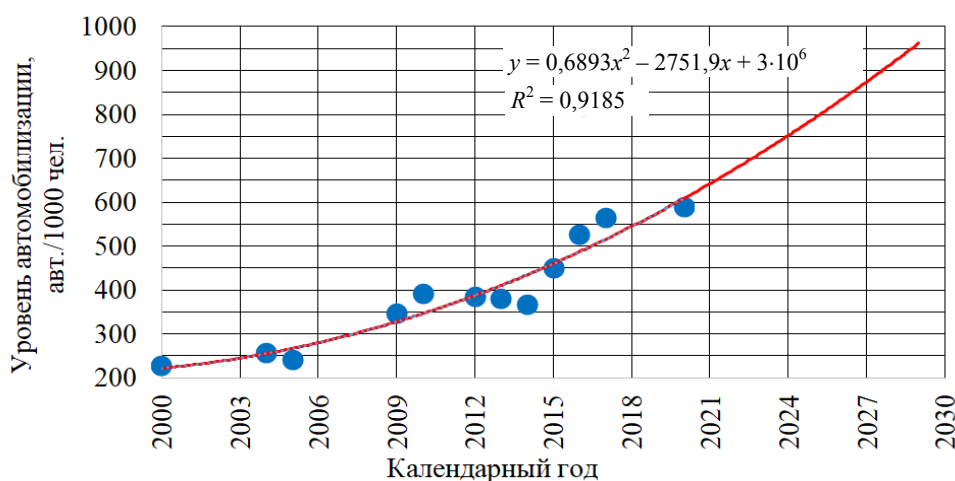


Рис. 1. Прогнозирование дальнейшего изменения автомобилизации в г. Тюмени

Fig. 1. Forecasting further changes in motorization in Tyumen

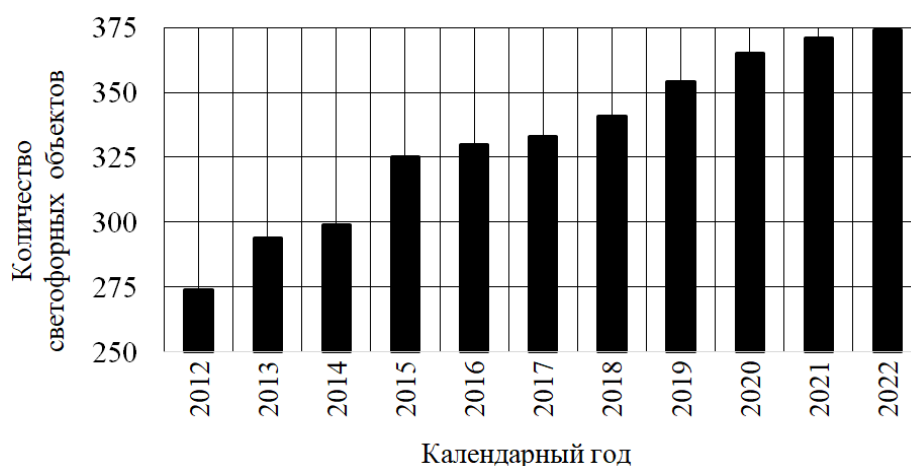


Рис. 2. Динамика изменения количества светофорных объектов на территории г. Тюмени

Fig. 2. Dynamics of changes in the number of traffic lights in the city of Tyumen

Посредством регулируемых пересечений возможно управлять дорожным движением. Современные светофорные системы используют детекторы, которые непрерывно отслеживают потоки трафика по сети в режиме реального времени и регулируют временные интервалы, смещения и время цикла, чтобы оптимизировать свою работу и сократить задержки. Это позволяет контролировать дорожную ситуацию и управлять целым рядом светофорных объектов (обычно для 6–12 смежных перекрестков). Эффективность таких систем, реагирующих на изменение транспортного спроса, намного выше, чем в системах с фиксированным временем работы. Процедуры оптимизации эффективны только в регионах сети в условиях недостаточного или близкого к насыщенному трафику, где очереди накапливаются во время красной фазы и рассеиваются во время зеленой. Они также могут сохраняться на более длинных линиях связи в сети путем соответствующей регулировки смещений, времени цикла или разбиений.

К сожалению, в условиях перенасыщенного движения они не в состоянии справиться с резкими скачками и возмущениями в транспортных потоках или пропускной способности, которые остаются незамеченными. Это сложная проблема, и она до сих пор относится для организаторов дорожного движения к числу самых серьезных. Современная практика управления дорожным движением основана на разработке

и внедрении управленческих решений, которые устраняют неблагоприятные сетевые условия только после их возникновения, вместо того чтобы заранее предупреждать перегрузку улично-дорожной сети [4].

Кроме того, за последние восемь лет средняя стоимость детекторов (например, видеодетекторов Traficam), по различным оценкам, возросла более чем в 2 раза и приближается к отметке 1 млн руб. за 1 шт. При этом одних лишь детекторов недостаточно, чтобы полноценно реализовать процесс управления. Как минимум требуются прокладка линий связи для передачи данных от детектора к серверу, закупка и настройка сервера, специализированное программное обеспечение.

В совокупности это существенно повышает первоначальные затраты и увеличивает срок окупаемости технических решений [1–2, 5–6]. Также на данный момент большинство детекторов изготавливается зарубежными компаниями. Во-первых, это создает нежелательную зависимость Российской Федерации от импортных производителей. Во-вторых, в связи со сложной ситуацией в мире это в принципе ставит под вопрос дальнейшую работоспособность российских интеллектуальных транспортных систем. В случае поломки какого-либо из элементов или отказа в обновлении программного обеспечения возникают реальные риски полного прекращения их функционирования.

В конечном итоге возникает необходимость разработки новой, более надежной, менее затратной и независимой отечественной системы мониторинга и управления транспортными потоками на улично-дорожной сети городов. Во многих даже относительно небольших городах всегда есть камеры уличного наблюдения, которые могут быть использованы для сбора данных. В таком случае мониторинг транспортных потоков может производиться в режиме реального времени посредством обработки видеозображения нейросетевыми технологиями.

В связи с этим авторы определили целью данной статьи разработку математического аппарата для управления транспортными потоками на улично-дорожной сети городов при помощи нейронных сетей.

Методология исследований

Методологической основой выбран системный подход, более частными инструментами в рамках данного подхода – системный анализ и синтез. Также исследование базировалось на теории транспортных потоков, теории вероятности и математической статистике. При дальнейшем формировании методологической базы исследования учитывалось сложное и нелинейное поведение транспортных потоков как объекта управления. Сложность управления, с точки зрения ряда отечественных и зарубежных исследователей, обуславливается недетерминированной и хаотичной природой транспортных потоков [1–2, 7–9].

Современный мировой опыт показывает, что главным инструментом управления транспортными потоками в городах являются различные автоматизированные и интеллектуальные транспортные системы (далее – ИТС). Благодаря интеграции ИТС с программными комплексами имитационного моделирования, например семейства PTV, Aimsun и др., появляется возможность прогнозировать развитие различных ситуаций и принимать наилучшие решения в части управления [3]. Также в части сбора, анализа большого количества данных и принятия решения способствуют различные технологии искусственного интеллекта: машинное обучение, глубокие нейронные сети и т.д.

Общая тенденция развития обозначенных систем заключается в том, что их принцип работы все больше удаляется от жестких режимов в пользу более адаптивных и гибких алгоритмов [2].

В связи с этим принято решение дополнить методологическую базу исследования и включить в нее теорию систем, теорию сложных систем, теорию динамических систем и теорию хаоса. Поэтому дальнейшие исследования также будут основываться на результатах работ [10–17].

Для разработки математических моделей управления транспортными потоками в городах проведен анализ [7–9] и других работ авторов, исследования которых связаны с математическим моделированием транспортных потоков.

Дальнейшее исследование также проводилось с учетом ряда ограничений: отсутствия влияния негативных факторов окружающей среды; однородности транспортного потока; отсутствия смешанных направлений движения и конфликтности с другими транспортными средствами и/или переходами.

В качестве основного критерия оптимизации использовалась энтропия движения транспортных потоков. Поскольку первоначальное понятие энтропии связано с передачей теплоты и энергии [10–17], авторы обратились к газодинамическим и газокINETическим моделям – аналогам транспортных потоков [7, 18]. В фундаментальной теории транспортных потоков отмечается, что суммарная энергия, которой обладает транспортный поток, может быть описана при помощи закона сохранения энергии. При этом в работе [7] определено, что в действительности энергия не теряется. Она просто превращается из кинетической энергии во внутреннюю. Из второго закона термодинамики известно, что кинетическая энергия более полезна, чем эквивалентное количество внутренней энергии. Это, безусловно, справедливо и в случае транспортных потоков. Таким образом, можно сказать, что силы трения (неудовлетворительные геометрические характеристики и взаимодействие между автомобилями) превращают желательные формы энергии (движение транспорта) в менее полезные формы.

Кроме того, автор [7] также отмечает, что применительно к транспортным потокам (ТП)

кинетическая и внутренняя энергия имеют размерность ускорения [7]

$$T = E + I, \quad (1)$$

где T – суммарная энергия ТП, м/с^2 ; E – кинетическая энергия транспортного потока, м/с^2 ; I – внутренняя энергия транспортного потока, м/с^2 .

Объясняется это тем, что если в транспортном потоке происходит потеря внутренней энергии, то она должна выражаться через потерю движения или ошибочное движение вследствие неудовлетворительных геометрических характеристик дороги или неблагоприятных взаимодействий между автомобилями в потоке [7].

В свою очередь, кинетическая энергия транспортного потока определяется по формуле [7]

$$E = \alpha k u^2, \quad (2)$$

где k – плотность ТП, авт./м ; u – скорость ТП, м/с ; α – безразмерный коэффициент.

Введение коэффициента α обусловливается следующим. На практике чаще всего плотность и скорость транспортного потока измеряются в авт./км и км/ч . Соответственно требуется преобразовать значения к необходимым единицам измерения: авт./м и м/с . Исходя из этого значение коэффициента $\alpha = (3,6^2 \cdot 1000)^{-1}$.

Показателем неравномерности движения является внутренняя энергия, которая представляет собой шум ускорения. Поэтому данный показатель можно интерпретировать как внутренние потери энергии в системе:

$$I \approx \delta, \quad (3)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)}, \quad (4)$$

где δ – шум ускорения, м/с^2 ; x_i – значение ускорения на исследуемом участке улично-дорожной сети в момент времени i , м/с^2 ; $\bar{x}$ – среднее значение ускорения, м/с^2 .

Следовательно, коэффициент полезной работы транспортного потока можно выразить следующим образом [7]:

$$\eta = \frac{T - I}{T} = \frac{E}{T}, \quad (5)$$

где η – коэффициент полезной работы транспортного потока.

Исходя из вышеописанного для повышения коэффициента полезной работы транспортного потока процесс должен быть направлен на максимизацию его кинетической энергии E

$$E \rightarrow \max. \quad (6)$$

Данное выражение будет представлять собой целевую функцию дальнейшего исследования.

Формулы (1)–(5) разработаны по аналогии с механикой движения молекул газа и жидкости. Однако транспортный поток как объект управления не обладает сжимаемостью. Это свидетельствует о риске возможных дорожно-транспортных происшествий. И для того чтобы предотвратить столкновения, участники дорожного движения вынуждены варьировать скорость автомобилей [7].

Таким образом, уже на данном этапе работы формируется представление о том, что кинетическая энергия также будет иметь нелинейный характер зависимости от показателей скорости и плотности транспортного потока.

Результаты исследований

В первую очередь авторы посчитали необходимым модифицировать формулу (2) с учетом интенсивности движения транспортного потока. Для этого целесообразно воспользоваться гидродинамической моделью Лайтхилла–Уизема–Ричардса [2, 7, 9, 19, 20]:

$$\begin{cases} u'(p) < 0; \\ Q(p) = pu(p), \end{cases} \quad (7)$$

где u – скорость транспортного потока, км/ч ; p – плотность транспортного потока, авт./км ; Q – интенсивность движения транспортного потока, авт./ч ; $u(p)$ – функция зависимости скорости транспортного потока от его плотности; $Q(p)$ – функция зависимости интенсивности

сти движения транспортного потока от его плотности.

С учетом системы уравнений (7) формула кинетической энергии транспортного потока (2) принимает вид

$$E = Q(p) p u(p). \quad (8)$$

Результаты исследований [2, 7, 9, 19, 20] показали, что в современных условиях для оценки концентрации транспортного потока перспективнее использовать показатели временной концентрации. Таким показателем является занятость полосы. Модель влияния занятости полосы на интенсивность движения транспортного потока разработана и экспериментально подтверждена на предыдущих этапах исследования [2, 19, 20]:

$$Q(\theta) = b_1 \theta - a_1 \theta^2, \quad (9)$$

где a_1 , b_1 – параметры модели, авт./ч; θ – занятость полосы.

Непосредственно сама занятость полосы является долей или процентным выражением времени, в течение которого в контрольной зоне на полосе движения находились транспортные средства [2, 19, 20]:

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^n (L_i + d) / u_i}{T}, \quad (10)$$

где θ – занятость полосы; L_i – длина i -го ТС, проходящего через контрольную зону детектора, м; d – то же контрольно-измерительной зоны детектора, м; u_i – скорость i -го транспортного средства в потоке, м/с; T – продолжительность измерения, с.

Величина d контрольной зоны измерения в рамках конкретной полосы движения является постоянной. Для однородного транспортного потока длина транспортного средства будет постоянной величиной L . Для гетерогенного транспортного потока длина транспортного средства может быть рассмотрена как произведение среднего значения длины транспортного средства $\bar{L}$ на количество произведенных измерений i . Искомое выражение скорости u так-

же необходимо рассматривать как среднее значение пространственной скорости $\bar{u}$. В совокупности это позволяет преобразовать исходную формулу (10) в выражении

$$\theta = \frac{(\bar{L} + d) i}{T \bar{u}}. \quad (11)$$

Можно заметить, что в формуле (11) отношение количества измерений к периоду наблюдения $\frac{i}{T}$ представляет собой не что иное, как интенсивность движения транспортного потока. Следовательно, формула (11) может быть представлена

$$\theta = (\bar{L} + d) \frac{Q}{\bar{u}}. \quad (12)$$

Таким образом, скорость движения транспортного потока может быть определена функцией зависимости от занятости полосы

$$u(\theta) = k_0 \frac{Q(\theta)}{\theta}, \quad (13)$$

где k_0 – коэффициент взаимосвязи скорости движения транспортного потока и занятости полосы.

В конечном итоге была получена математическая модель кинетической энергии транспортного потока с учетом интенсивности движения и занятости полосы

$$E = k_0 \frac{Q^2}{\theta}. \quad (14)$$

На основании сформированной методологической базы исследования ранее было принято решение использовать энтропию транспортных потоков в качестве оптимизационного критерия управления дорожным движением. В свою очередь энтропия транспортного потока от занятости полосы может быть представлена как функция зависимости

$$H(\theta) = - \sum_{i=1}^n w_i \ln(w_i), \quad (15)$$

где $H(\theta)$ – функция зависимости энтропии транспортного потока от занятости полосы; w_i – удельный вес занятости i -й полосы на рас-

смаатриваемом регулируемом пересечении; n – количество полос на регулируемом пересечении.

При этом удельный вес занятости каждой полосы будет определяться следующим отношением:

$$w_i = \frac{\theta_i}{\sum_{i=1}^n \theta_i}. \quad (16)$$

Для перехода к удельным и безразмерным показателям удобнее использовать относительную энтропию. Относительная энтропия транспортного потока от занятости полос на регулируемом пересечении определяется следующим образом:

$$H_n(\theta) = \frac{H(\theta)}{\ln n}. \quad (17)$$

Модель (9) позволяет выразить формулу (14) через занятость полосы

$$\begin{aligned} E &= \alpha k_0 \frac{(b_1 \theta - a_1 \theta^2)^2}{\theta} = \\ &= k_0 \frac{b_1^2 \theta^2 - 2a_1 b_1 \theta^3 + a_1^2 \theta^4}{\theta} = \\ &= a_1^2 k_0 \theta^3 - 2a_1 b_1 k_0 \theta^2 + b_1^2 k_0 \theta, \end{aligned} \quad (18)$$

где a_1, b_1, c_1 – параметры взаимосвязи относительной энтропии занятости полос и кинетической энергии транспортного потока, м/с².

Формулы (14)–(18) позволили получить математическую модель влияния относительной энтропии занятости полос $H_n(\theta)$ на суммарную кинетическую энергию ТП E на регулируемом пересечении

$$Y = aX^3 - bX^2 + cX + d, \quad (19)$$

где Y – функция зависимости кинетической энергии транспортного потока E от относительной энтропии занятости полос $H_n(\theta)$, м/с²; X – относительная энтропия занятости полос $H_n(\theta)$; a, b, c, d – параметры взаимосвязи относительной энтропии занятости полос и кинетической энергии транспортного потока, м/с².

В рамках данного исследования было предложено производить мониторинг транспортных потоков посредством обработки видеоизображения камер уличного наблюдения нейронны-

ми сетями. В связи с этим, чтобы измерить занятость полосы для каждого транспортного средства, необходимо вычислить общее время его нахождения в контрольной зоне. Для этого в каждом временном интервале определяется нахождение транспортного средства в контрольной зоне. Если текущая (x_i, y_i) и предыдущая (x_{i-1}, y_{i-1}) координаты находятся в зоне, то время нахождения в ней принимается равным времени между кадрами t_i и учитывается в общем времени. Если одна из координат (x_i, y_i) или (x_{i-1}, y_{i-1}) находится вне контрольной зоны, то вычисляется скорость i -го транспортного средства на данном участке [20]

$$u_i = \frac{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}}{t_i}. \quad (20)$$

В свою очередь время нахождения транспортного средства в контрольной зоне измерения представляется возможным вычислить по формуле [20]

$$t' = \frac{\sqrt{(x'_i - x'_{i-1})^2 + (y'_i - y'_{i-1})^2}}{u_i}, \quad (21)$$

где x'_i, y'_i – измеряемое расстояние координаты пересечения траектории движения i -го транспортного средства и контрольной зоны измерения.

В конечном итоге появляется возможность определить занятость полосы по следующей формуле [20]:

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} t_i + \sum_{j=1}^k t'_j}{T}, \quad (22)$$

где n – количество кадров, в течение которых обнаруженное транспортное средство находилось в контрольной зоне измерения частично или полностью; k – то же кадров, в течение которых обнаруженное ТС находилось в контрольной зоне измерения частично; t_i – время между кадрами, с; t'_j – время, в течение которого транспортное средство находилось в контрольной зоне между кадрами, с; T – продолжительность измерения, с.

Предложенные математические модели (20)–(22) позволяют определить занятость полосы посредством обработки потока видеоизображения нейронной сетью.

В настоящее время для подтверждения математической модели (19) проводятся экспериментальные исследования. Сбор исходных данных о занятости полосы производится посредством обработки видеоизображения камер уличного наблюдения ООО «Русская компания», которые расположены практически во всех наиболее проблемных участках улично-дорожной сети г. Тюмени. Обработка видеоизображения осуществляется авторским программным обеспечением, разработанным на базе модели нейронной сети YOLOv8 [21]. При запуске программы контрольно-измерительные зоны для мониторинга задаются поль-

зователем вручную. Определение интенсивности выполняется с учетом направления движения и класса транспортного средства (рис. 3).

Обработка исходных экспериментальных данных осуществляется с использованием программного комплекса STATISTICA 12 при помощи метода группировки по средним значениям. Результаты регрессионного анализа показали, что теоретическая кривая описывает рассеивание экспериментальных данных с коэффициентом детерминации $R^2 \approx 0,93$ (рис. 4), что подтверждает высокую достоверность разработанной математической модели (19).

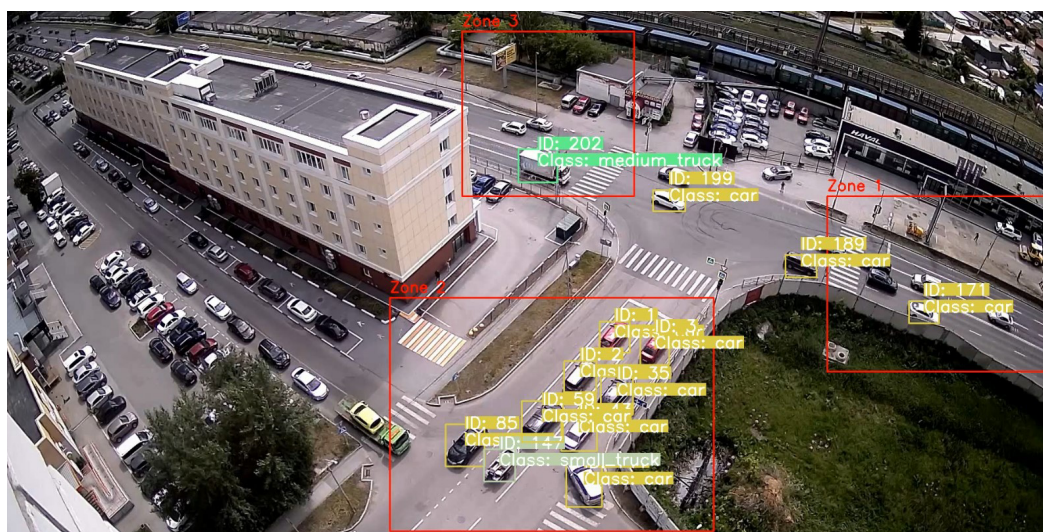


Рис. 3. Пример обработки видеоизображения уличной камеры наблюдения разработанным программным обеспечением на основе нейронных сетей

Fig. 3. Example of processing a video image of a street surveillance camera by developed software based on neural networks

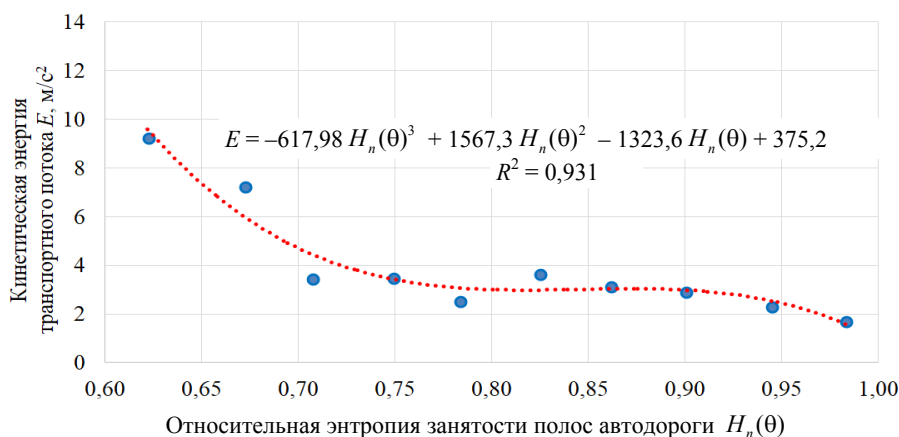


Рис. 4. Изменение кинетической энергии транспортного потока E на регулируемом пересечении под влиянием относительной энтропии занятости полос $H_n(\theta)$

Fig. 4. Change in kinetic energy of traffic flow at a controlled intersection under the influence of relative entropy of lane occupancy $H_n(\theta)$

ВЫВОДЫ

1. В ходе проведения исследования целевой функцией определена максимизация кинетической энергии транспортного потока, выраженная через интенсивность движения и занятость полосы. В качестве критерия оптимизации обозначена относительная энтропия занятости полос на регулируемом пересечении.

2. В результате моделирования получена математическая модель изменения кинетической энергии транспортного потока под влиянием относительной энтропии занятости полос. Данная модель представляет собой полином третьей степени.

3. Разработан математический аппарат для мониторинга транспортных потоков посредством обработки изображения уличных камер видеонаблюдения посредством нейронных сетей. Результаты эксперимента подтверждают достоверность разработанных теоретических положения с коэффициентом детерминации $R^2 \approx 0,93$ (рис. 3).

Статья подготовлена в рамках выполнения проекта гранта РФ № 23-79-01021 «Исследование процесса управления транспортными потоками в городах на основе нейросетевых технологий», 2023–2025.

ЛИТЕРАТУРА

- Морозов, В. В. Закономерности изменения характеристик транспортных потоков / В. В. Морозов, Д. А. Захаров, С. А. Ярков. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2020. 166 р.
- Якимов, М. Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов / М. Р. Якимов. М.: Логос, 2013. 188 р.
- РОССТАТ: Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 08.06.2024).
- Do New Sources of Traffic Data Make the Application of Chaos Theory to Traffic Management a Realistic Possibility? / A. T. Narh, N. Thorpe, M. C. Bell, G. A. Hill // *Transport Reviews*. 2016. Vol. 36. P. 635–658. <https://doi.org/10.1080/01441647.2016.1140687>
- Анализ совокупной стоимости владения детекторов транспорта // Системы хранения, серверное оборудование, информационная и физическая безопасность – ИТЦ-М. URL: <https://www.itc.by/analiz-sovokupnoj-stoi-mosti-vladieniya-detektorov-transporta/> (дата обращения: 17.06.2024).
- Анализ детектирования параметров дорожного движения / Д. В. Капский, Д. В. Леванович, В. П. Иванов, А. К. Головнич // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки*. 2022. № 3. P. 63–71.
- Дрю, Д. Теория транспортных потоков и управления ими / Д. Дрю. М.: Транспорт, 1972. 424 р.
- Иносэ, Х. Управление дорожным движением / Х. Иносэ, Т. Хамсада. М.: Транспорт, 1983. 248 р.
- Моделирование процесса распада координированной пачки автомобилей при движении по перегону магистральной улицы / Г. М. Кухаренок, Д. В. Капский, Д. В. Навой, Д. В. Рожанский // *Вестник Белорусского национального технического университета*. 2010. № 6. P. 51–57.
- Chaos: Classical and Quantum / P. Cvitanović, R. Artuso, R. Mainieri [et al.]. Copenhagen, Denmark: Niels Bohr Institute, 2020. 1089 p.
- Murray, R. M. Recent Research in Cooperative Control of Multivehicle Systems / R. M. Murray // *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2007. Vol. 129. P. 571–583. <https://doi.org/10.1115/1.2766721>.
- Kumari, S. A Novel Four-Step Feedback Procedure for Rapid Control of Chaotic Behavior of the Logistic Map and Unstable Traffic on the Road / S. Kumari, R. Chugh // *Chaos*. 2020. Vol. 30. <https://doi.org/10.1063/5.0022212>
- Martinovič, T. Chaotic Behaviour of Noisy Traffic Data / T. Martinovič // *Mathematical Methods in the Applied Sciences*. 2018. Vol. 41, No 6. P. 2287–2293. <https://doi.org/10.1002/mma.4234>.
- Modelling Road User Perceptions towards Safety, Comfort, and Chaos at Shared Space: The via Maqueda Case Study, Italy / N. Akgun-Tanbay, T. Campisi, T. Tanbay [et al.] // *Journal of Advanced Transportation*. 2022. Vol. 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/4979496>.
- Quek, W. L. An Analysis on the Traffic Processing Efficiency of a Combination of Serial and Parallel Bottle-necks / W. L. Quek, N. N. Chung, L. Y. Chew // *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*. 2018. Vol. 503. P. 491–502. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.02.081>.
- Senkerik, R. Chaos-Based Optimization A Review / R. Senkerik, I. Zelinka, M. Pluhacek // *Journal of Advanced Engineering and Computation*. 2017. Vol. 1. P. 68–79. <https://doi.org/10.25073/jaacc.201711.51>.
- Капский, Д. В. Развитие автоматизированной системы управления дорожным движением Минска как части интеллектуальной транспортной системы города / Д. В. Капский, Д. В. Навой // *Наука и техника*. 2017. Т. 16. № 1. P. 38–47. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-1-38-48>.
- Aljamal, M. A. Estimation of Traffic Stream Density Using Connected Vehicle Data: Linear and Nonlinear Filtering Approaches / M. A. Aljamal, H.M. Abdelghaffar, H. A. Rakha // *Sensors*. 2020. Vol. 20, No 15. P. 4066 <https://doi.org/10.3390/s20154066>.
- Morozov, V. Formation of the Traffic Flow Rate Under the Influence of Traffic Flow Concentration in Time at Controlled Intersections in Tyumen, Russian Federation /

- V. Morozov, S. Iarkov // *Sustainability*. 2021. Vol. 13, № 15. P. 8234. <https://doi.org/10.3390/su13158324>.
20. Morozov, V. Modeling the Operation of Signal-Controlled Intersections with Different Lane Occupancy / V. Morozov, V. Shepelev, V. Kostyrchenko // *Mathematics*. 2022. Vol. 10, № 24. P. 4829.
 21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025619154 Российская Федерация. Программа для мониторинга транспортных потоков на основе нейронных сетей: заявл. 31.03.2025; опубл. 14.04.2025 / Морозов В. В.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет».
- Поступила 10.01.2025
Подписана в печать 14.03.2025
Опубликована онлайн 31.07.2025
- ## REFERENCES
1. Morozov V. V., Zakharov D. A., Yarkov S. A. (2020) *Patterns of Change in Characteristics of Transport Flows*. Tyumen, Industrial University of Tyumen. 166 (in Russian).
 2. Yakimov M. R. (2013) *Transport Planning: Creating Transport Models of Cities*. Moscow, Logos Publ. 188 (in Russian).
 3. ROSSTAT: Federal State Statistics Service. Available at: <https://rosstat.gov.ru/> (accessed 08 Juny 2024) (in Russian).
 4. Narh A. T., Thorpe N., Bell M. C., Hill G. A. (2016) Do New Sources of Traffic Data Make the Application of Chaos Theory to Traffic Management a Realistic Possibility? *Transport Reviews*, 36 (5), 635–658. <https://doi.org/10.1080/01441647.2016.1140687>.
 5. Total Cost of Ownership Analysis of Vehicle Detectors. *Storage Systems, Server Equipment, Information and Physical Security – ITTs-M*. Available at: <https://www.itc.by/analiz-sovokupnoy-stoimosti-vladieniya-detektorov-transporta/> (accessed 17 Juny 2024) (in Russian).
 6. Kapsky D. V., Levanovich D. V., Ivanov V. P., Golovnich A. K. (2022) Analysis of Traffic Parameter Detection. *Vestnik Polotskogo Universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki. = Vestnik of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Sciences*, (3), 63–71 (in Russian).
 7. Drew D. (1972) *Traffic Flow Theory and Control*. Moscow, Transport Publ. 424 (in Russian).
 8. Inose H., Hamada T. (1975) *Road Traffic Control*. University of Tokyo Press.
 9. Kukharyonok G. M., Kapsky D. V., Navoy D. V., Rozhansky D. V. (2010) Modeling the Process of Disintegration of a Coordinated Pack of Cars When Moving along a Section of a Main Street. *Vestnik BNTU [Bulletin of the Belarusian National Technical University]*, (6), 51–57 (in Russian).
 10. Cvitanović P., Artuso R., Mainieri R., Tanner G., Vattay G. (2020) *Chaos: Classical and Quantum*. Copenhagen, Denmark, Niels Bohr Institute. 1089.
 11. Murray R. M. (2007) Recent Research in Cooperative Control of Multivehicle Systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 129 (5), 571–583. <https://doi.org/10.1115/1.2766721>.
 12. Kumari S., Chugh R. (2020) A Novel Four-Step Feedback Procedure for Rapid Control of Chaotic Behavior of the Logistic map and Unstable Traffic on the Road. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 30 (12). <https://doi.org/10.1063/5.0022212>.
 13. Martinović T. (2016) Chaotic Behaviour of Noisy Traffic Data. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 41 (6), 2287–2293. <https://doi.org/10.1002/mma.4234>.
 14. Akgün-Tanbay N., Campisi T., Tanbay T., Tesoriere G., Dissanayake D. (2022) Modelling Road User Perceptions towards Safety, Comfort, and Chaos at Shared Space: The via Maqueda Case Study, Italy. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2022/4979496>.
 15. Quek W.-L., Chung N. N., Chew L. Y. (2018) An Analysis on the Traffic Processing Efficiency of a Combination of Serial and Parallel Bottlenecks. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 503, 491–502. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.02.081>.
 16. Senkerik R., Zelinka I., Pluhacek M. (2017) Chaos-Based Optimization – A Review. *Journal of Advanced Engineering and Computation*, 1 (1), 68. <https://doi.org/10.25073/jaec.201711.51>.
 17. Kapskiy D. V., Navoy D. V. (2017) Development of the automated Road Traffic Control Systems in Minsk as Part of the Intellectual City Transport System. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 16 (1), 38–48. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-1-38-48> (in Russian).
 18. Aljamal M. A., Abdelghaffar H. M., Rakha H. A. (2020) Estimation of Traffic Stream Density Using Connected Vehicle Data: Linear and Nonlinear Filtering Approaches. *Sensors*, 20 (15), 4066. <https://doi.org/10.3390/s20154066>.
 19. Morozov V., Iarkov S. (2021) Formation of the Traffic Flow Rate under the Influence of Traffic Flow Concentration in Time at Controlled Intersections in Tyumen, Russian Federation. *Sustainability*, 13 (15), 8324. <https://doi.org/10.3390/su13158324>.
 20. Morozov V., Shepelev V., Kostyrchenko V. (2022) Modeling the Operation of Signal-Controlled Intersections with Different Lane Occupancy. *Mathematics*, 10 (24), 4829. <https://doi.org/10.3390/math10244829>.
 21. Morozov V. V. (2025) *Program for Monitoring Traffic Flows Based on Neural Networks*. Certificate of State Registration of Computer Program No. 2025619154 Russian Federation (in Russian).

Received: 10.01.2025

Accepted: 14.03.2025

Published online: 31.07.2025

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-327-338>

УДК 620.9:681.5:628.1:519.876.5

Многоуровневая стратегия размещения измерительных устройств в инженерных системах с распределенной нагрузкой на основе иерархического и кластерного анализа

Канд. техн. наук, доц. А. А. Капанский¹⁾, док. техн. наук, проф. Н. В. Грунтович¹⁾

¹⁾Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого
(Гомель, Республика Беларусь)

Реферат. Построение цифровой модели «умного города» в условиях стремительного развития технической инфраструктуры требует эффективных методов мониторинга и управления инженерными системами. Одной из ключевых задач является оптимизация размещения измерительных устройств в таких системах, как водо- и энергоснабжение, включая газ, электричество и теплоту. В условиях ограниченных финансовых ресурсов и необходимости обеспечения высокой точности мониторинга важно учитывать не только географическое распределение потребителей, но и интенсивность их нагрузки. Это особенно актуально для управления распределенными техническими системами, где необходимо минимизировать затраты на оборудование, обеспечивая при этом полный охват сети и своевременное выявление аномалий. Целью данного исследования является разработка методологии оптимального размещения измерительных устройств в инженерных системах, учитывающей как пространственное положение потребителей, так и их нагрузку. В работе используется многоуровневая стратегия анализа с применением метода Уорда для иерархической кластеризации и алгоритма k -средних. На основе предложенной методологии на примере системы водоснабжения Гомеля выделены четыре территориальных кластера, на основе которых пропорционально вкладу потребления распределены 20 датчиков давления. В статье показано, как с помощью многопараметрической кластеризации можно определить оптимальные центры размещения измерительных устройств, которые ориентируются на более мощных потребителей, при этом учитывая географическое распределение объектов в целом. Разработанный подход позволяет эффективно распределять измерительные устройства с учетом реальной загрузки объектов в системе и их географического положения, что обеспечивает наилучший охват территории в условиях ограниченного количества оборудования. Приведенный в статье подход может быть адаптирован для различных технических систем, обеспечивая универсальность и гибкость применения.

Ключевые слова: многопараметрическая кластеризация, оптимизация размещения, измерительные устройства, распределенная нагрузка, географическое распределение, центроиды, алгоритм k -средних, инженерные системы, мониторинг, цифровая модель

Для цитирования: Капанский, А. А. Многоуровневая стратегия размещения измерительных устройств в инженерных системах с распределенной нагрузкой на основе иерархического и кластерного анализа / А. А. Капанский, Н. В. Грунтович // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 4. С. 327–338. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-327-338>

Multi-Level Strategy for Placement of Measuring Devices in Engineering Systems with Distributed Loads Based on Hierarchical and Cluster Analysis

A. A. Kapanski¹⁾, N. V. Hruntovich

¹⁾Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. Building a digital model of a “smart city” in the context of rapid development of technical infrastructure requires effective methods for monitoring and managing engineering systems. One of the key tasks is to optimize the placement

Адрес для переписки

Капанский Алексей Александрович
Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого
просп. Октября, 48,
246029, г. Гомель, Республика Беларусь
Тел.: +375 23 220-48-83
kapanski@mail.ru

Address for correspondence

Kapanski Aliaksey A.
Gomel State Technical University
named after P. O. Sukhoi
48, Oktyabrya Ave.,
246029, Gomel, Republic of Belarus,
Tel.: +375 23 220-48-83
kapanski@mail.ru

of measuring devices in systems such as water and energy supply, including gas, electricity and heat. In conditions of limited financial resources and the need to ensure high monitoring accuracy, it is important to take into account not only the geographical distribution of consumers, but also the intensity of their load. This is especially important for managing distributed technical systems, where it is necessary to minimize equipment costs, while ensuring full network coverage and timely detection of anomalies. The purpose of this study is to develop a methodology for the optimal placement of measuring devices in engineering systems that takes into account both the spatial location of consumers and their load. The paper uses a multi-level analysis strategy using Ward's method for hierarchical clustering and the k-means algorithm. Based on the proposed methodology, four territorial clusters were identified using the example of the Gomel water supply system, on the basis of which 20 pressure sensors were distributed proportionally to the contribution of consumption. The article shows how multi-parameter clustering can be used to determine optimal centers for placing measuring devices that are focused on more powerful consumers, while taking into account the geographic distribution of objects as a whole. The developed approach allows for the efficient distribution of measuring devices taking into account the actual load of objects in the system and their geographic location, which ensures the best coverage of the territory under conditions of a limited amount of equipment. The approach presented in the article can be adapted for various technical systems, ensuring universality and flexibility of application.

Keywords: multi-parameter clustering, placement optimization, measuring devices, distributed load, geographic distribution, centroids, k-means algorithm, engineering systems, monitoring, digital model

For citation: Kapanski A. A., Hruntovich N. V. (2025) Multi-Level Strategy for Placement of Measuring Devices in Engineering Systems with Distributed Loads Based on Hierarchical and Cluster Analysis. *Science and Technique*. 24 (4), 327–338. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-327-338> (in Russian)

Введение

В современных инженерных системах (водо- и энергоснабжения, системах «умного города» и др.) эффективный мониторинг ключевых параметров (давления, расхода и др.) требует оптимального размещения ограниченного числа измерительных устройств. Задача размещения датчиков представляет собой сложную комбинационную проблему: даже при небольшом числе потенциальных узлов число вариантов установки экспоненциально велико [1]. Кроме того, мониторинг может преследовать различные цели – от операционного контроля за состоянием системы до обнаружения утечек, калибровки гидравлических моделей и создания цифровых двойников [2]. С одной стороны, датчики должны покрывать всю сеть для надежного обнаружения аномалий и сбора данных, с другой – бюджет и эксплуатационные затраты ограничивают их количество [3]. Правильное расположение сенсоров в связанной системе особенно важно с учетом неравномерного пространственного распределения потребителей и их нагрузок. То есть крупные потребители или узлы с высокой нагрузкой требуют более детального контроля, чем малонагруженные участки. В то же время, например, для гидравлических систем отдельно выделяют наиболее удаленные (диктующие) от источников питания точки, параметры в которых находятся в зоне риска отклонения от нормативных значений. Эти особенности необходимо учитывать при размещении устройств мониторинга в реальных условиях эксплуатации сложных систем ресурсоснабжения развивающихся городов.

В связи с этим целью настоящего исследования являлась разработка стратегии размещения измерительных устройств в инженерных системах с распределенной нагрузкой, учитывающей как пространственное положение потребителей, так и их ресурсоемкость. Для решения поставленной задачи в исследовании раскрывается многоуровневый подход на примере инфраструктурной системы водоснабжения города Гомеля. Основа методологии заключается в сочетании иерархического метода кластеризации (в частности, метода Уорда) с алгоритмами метрической кластеризации (алгоритм *k*-средних). Объединение этих методов позволяет формировать территориальные границы и пропорционально размещать в них измерительные устройства. Практическая значимость подхода заключается в возможности оптимального распределения ограниченного числа сенсоров с опорой на реальные данные о пространственной структуре и интенсивности нагрузок, что особенно важно в условиях дефицита оборудования. Научная новизна исследования состоит в применении гибридной кластерной методологии для планирования систем мониторинга при создании цифровых двойников, адаптированной под инженерные объекты с неравномерной загрузкой. Настоящая работа является логическим продолжением ранее опубликованного исследования, в котором был впервые предложен принцип геопространственной кластеризации потребителей как основы для оптимизации ресурсоснабжающей инфраструктуры [4].

Обзор существующих подходов к размещению измерительных устройств

Ряд научных работ сводит задачу размещения измерительных устройств к классической задаче дискретного размещения объектов. Так, в статье [5] задача оптимального распределения датчиков мониторинга формализована как обобщенная p -медианная задача размещения в произвольной метрике. Авторами предложен алгоритм решения, основанный на методах случайного поиска, для нахождения конфигурации датчиков, минимизирующей целевую функцию (например, суммарное расстояние от потребителей до ближайшего устройства или иной критерий). Подобные модели учитывают пространственные координаты потребителей и позволяют напрямую включать весовые коэффициенты, отражающие нагрузку или важность узлов. Однако точное решение задачи размещения (посредством перебора или целочисленного программирования) вычислительно затратно для сложных систем, особенно в условиях недостаточного объема информации о реальной конфигурации сети [1]. Именно поэтому на практике широко применяются эвристические методы оптимизации – генетические алгоритмы [6], имитация отжига [7], поиск с запретами [8] и др.

Так, в исследовании [9] использовался генетический алгоритм (ГА) к оптимальному размещению датчиков для определения местонахождения утечек в водопроводных сетях. Используемая целевая функция минимизировала число неразличимых (неизолируемых) утечек при заданном количестве датчиков. Решение задачи оптимизации обеспечивало эффективную установку сенсоров давления в узлах, максимизируя способность системы различать разные места утечек. В последующих исследованиях предлагались усовершенствованные методы ГА для повышения точности и скорости работы на больших сетях [10], а также альтернативные алгоритмы. Например, в [11] для решения задачи оптимизации применен алгоритм имитационного отжига, показавший сокращение времени вычислений по сравнению с ГА. Тем не менее прямые оптимизационные и эволюционные методы часто нацелены на единичные критерии (расположе-

ние объектов, утечки или др.) и неявно учитывают географическую структуру объектов [4].

Практические задачи мониторинга требуют комплексного подхода, при котором могут учитываться сразу несколько факторов: скорость обнаружения аварийных ситуаций, охват ключевых участков сети, точность гидравлического моделирования и стоимость установки оборудования. В этой связи в научной литературе широкое распространение получили многокритериальные методы оптимизации. Например, в [1] предложен подход к размещению датчиков в водораспределительной сети, основанный на трех основных критериях (вероятность успешной идентификации аварии, время ее обнаружения и количество населения, потенциально подверженного воздействию). Чтобы сократить вычислительные затраты, авторы применили кластеризацию методом k -средних, сегментируя узлы сети по схожести реакций на различные аварийные сценарии. После этого из каждого кластера отбирались наиболее репрезентативные узлы, и дальнейшая оптимизация выполнялась только среди них. Такой подход позволил значительно сократить размерность задачи без потери качества решений. По результатам моделирования было получено вдвое больше конфигураций, удовлетворяющих компромиссу между критериями, чем при прямой оптимизации без предварительной кластеризации.

Другим эффективным подходом к размещению датчиков являлось использование матриц чувствительности узлов к изменениям параметров сети. В [12] предложен метод, совмещающий два направления: обнаружение утечек и калибровку гидравлической модели. Для этого строились матрицы локальной чувствительности давления к расходам (для анализа утечек) и глобальной чувствительности (методом Соболя) – для оценки влияния параметров на поведение системы. Узлы сети были сгруппированы с помощью множественной кластеризации, учитывающей обе матрицы. Из каждого кластера в качестве точки размещения сенсора выбирался узел с наибольшей глобальной чувствительностью и максимальной способностью к детектированию утечек. Такой подход позволил одновременно повысить точность калибровки, увеличить эф-

фективность обнаружения утечек по сравнению с традиционными методами, однако требовал предварительных измерений для оценки чувствительностей сети.

Одним из центральных направлений, получивших развитие в 2010-е гг., стало использование кластеризации для решения задач размещения измерительных устройств. Появляется возможность группировать схожие объекты (узлы сети или потребителей) в кластеры по максимальной внутрикластерной однородности. При оптимальном размещении датчиков такой подход реализуется в два этапа: 1) для декомпозиции большой задачи на подзадачи (разбиение сети на зоны с последующим выбором узлов в каждой зоне); 2) для выявления «типичных» узлов-представителей, которые оборудуются датчиками. Впервые в контексте утечек в ресурсных системах подобный подход описан в статье [13]. Авторы предложили двухэтапный алгоритм, где сначала на основе кластеризации снижается размер исходной задачи, а затем на суженном множестве кандидатов узлов выполняется точный поиск решения. Эффективность подхода подтверждена на примере кластеризации векторов чувствительности давления к утечкам с использованием алгоритма Evidential C-means (ECM). Метод позволил автоматически определить оптимальное число кластеров и выделить из каждого наиболее информативные узлы – ближайшие к центроидам. Полученное множество было использовано для точного перебора конфигураций размещения датчиков, что значительно снизило вычислительную сложность задачи при сохранении высокого качества локализации утечек. Похожим образом в статье [10] применен алгоритм k -means для кластеризации узлов по чувствительности.

Ограничения существующих подходов и предлагаемого метода

Литературный обзор показывает эволюцию подходов к оптимальному размещению измерительных устройств в инженерных сетях от классических оптимизационных к интеллектуальным методам анализа данных. За период 2013–2024 гг. появились решения, объединяющие различные методы, такие как генетиче-

ские алгоритмы или методы кластеризации. Вместе с тем в ходе проведенного анализа выявлен ряд ограничений традиционных подходов. Во многих работах делаются упрощающие допущения, например известны все сценарии аварий или утечек и их вероятности. Это ограничивает применимость результатов в реальных условиях с динамически меняющейся нагрузкой или развивающейся инфраструктурой. Методы, основанные на анализе чувствительности, предполагают наличие калиброванной модели сети, что во многих случаях невозможно. В то же время кластеризация узлов только по матрице чувствительности не учитывает локальные колебания потребления и может распределить датчики, например, по периферии сети, игнорируя узлы с большими расходами.

Предлагаемая в настоящем исследовании двухэтапная методика также имеет ряд ограничений. В первую очередь она исходит из предположения, что в инженерной системе присутствует естественная пространственная структура, позволяющая выделить территориальные зоны на основе кластеризации потребителей по географическому положению. На первом этапе агломеративная кластеризация позволяет не только сгруппировать близко расположенные объекты, но и оценить суммарную нагрузку внутри каждой зоны, что дает возможность пропорционально распределить заданное количество измерительных устройств между кластерами в соответствии с их потреблением. На втором этапе в каждой зоне применяется алгоритм взвешенных k -средних, обеспечивающий оптимальное позиционирование устройств с учетом внутрикластерного распределения водопотребления. Метод имеет два существенных ограничения: во-первых, он требует предварительного задания общего количества измерительных устройств; во-вторых, полученные в результате координаты центров установки датчиков необходимо корректировать, приводя их к ближайшим доступным точкам трубопроводной сети (это особенно затруднительно при ограниченном доступе к инфраструктуре). В табл. 1 приведен сравнительный анализ предлагаемого метода с существующими подходами.

Таблица 1

Позиционирование предлагаемого метода среди существующих решений
Positioning the proposed method among existing solutions

Исследование	Ключевые методы	Учет пространственного положения	Учет потребления	Метод размещения датчиков	Преимущества	Ограничения
Sarrate et al. (ECM, 2014)	Кластеризация ЕСМ по чувствительности давления	Нет, фокус на чувствительности к утечкам	Нет	Выбор центров кластеров + полный перебор	Автоматический выбор числа кластеров, снижение вычислительной сложности	Отсутствие учета потребления и географии
Gautam et al. (2022)	Многокритериальная оптимизация + кластеризация k -средних по картам обнаружения утечек	Косвенно, через места нахождения аварий	Да, через критерии затронутого населения	Оптимизация по отобранным узлам	Снижение разнородности, гибкая настройка критериев	Зависимость от выбора сценариев, слабая географическая привязка
Rajabi & Tabesh (2024)	Кластеризация по матрицам чувствительности	Нет, фокус на чувствительности модели	Косвенно – через чувствительность к расходам	Выбор узлов с наибольшей чувствительностью в каждом кластере	Учет нескольких целых функций (утечки, калибровка гидро-модели), высокая точность	Высокая зависимость от качества гидравлической модели
Предлагаемый метод (двухэтапный: Уорда + k -средних)	Агломеративная кластеризация (метод Уорда) + взвешенный k -средних по нагрузке	Да, напрямую через координаты потребителей	Да, явно через объем водопотребления	Центроиды кластеров, с учетом веса и привязкой к инфраструктуре	Простота реализации, учет географии и нагрузки, масштабируемость	Предполагается наличие территориальной структуры нагрузки

Описание инфраструктуры объекта исследования и источников информации

Настоящее исследование основывается на данных режимов водопотребления Гомеля, одного из крупнейших промышленных центров Республики Беларусь. Система водоснабжения города включает пять ключевых водозаборов: Сож, Ипуть, Кореневский, Юго-Западный и Центральный, которые совместно функционируют в единой гидравлической сети для поддержания давления и обеспечения воды потребителям. В рамках первого этапа исследования сформирована геоинформационная база, включающая более 240 наиболее крупных объектов водопотребления в системе (промышленные предприятия, учреждения и организации), формирующих в совокупности порядка 60–70 % требуемой потребности воды в городе. Для каждого объекта в ходе выполнения НИР собраны данные, включающие уникальный идентификатор объекта, наименование потребителя, его адрес и среднегодовой объем потребления воды.

Первичные данные были предоставлены в табличной форме абонентскими службами во-

доканала и не содержали географических координат, необходимых для проведения пространственного анализа. Для устранения этого ограничения в ходе исследования реализован этап геокодирования, в результате которого адреса всех объектов автоматически преобразованы в координаты широты и долготы с использованием API сервиса «Яндекс Геокодер». Этот процесс был полностью автоматизирован, что позволило исключить ручной ввод и значительно ускорить сбор информации. После получения координат выполнено агрегирование данных на уровне зданий и улиц, что позволило уменьшить размерность выборки, сохранить пространственную точность и подготовить данные для иерархической кластеризации [4]. В общем виде в проводимом исследовании алгоритм анализа включал в себя последовательные шаги: автоматизированный сбор данных об абонентах, геокодирование адресов и создание пространственной базы данных, агрегацию объемов потребления по географическим локациям, а также картографический анализ для выделения территориальных зон (рис. 1).

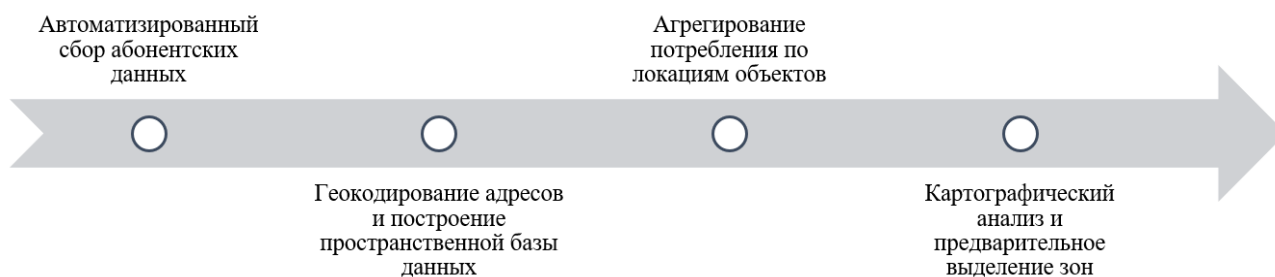


Рис. 1. Алгоритм первичной геоинформационной подготовки данных

Fig. 1. Algorithm for primary geoinformation data preparation

Такая последовательность обработки данных необходима для предварительного построения тепловой карты интенсивности нагрузки, визуализирующей уровни водопотребления на различных участках городской территории. Полученная карта легла в основу иерархической кластеризации объектов по географическому признаку, что позволило выделить территориальные зоны с высокой плотностью и однородностью размещения потребителей. Для анализа и визуализации пространственно-

го положения водозаборов использовалась платформа OpenStreetMap, а итоговая геокарта сформирована в среде Excel 3D Maps (рис. 2). На карте отображены усредненные показатели водопотребления за 2017–2023 гг., представленные в виде температурных полей, отражающих степень нагрузки на инфраструктуру в разных районах города. Красными маркерами обозначены точки размещения источников водоснабжения (водозаборов).

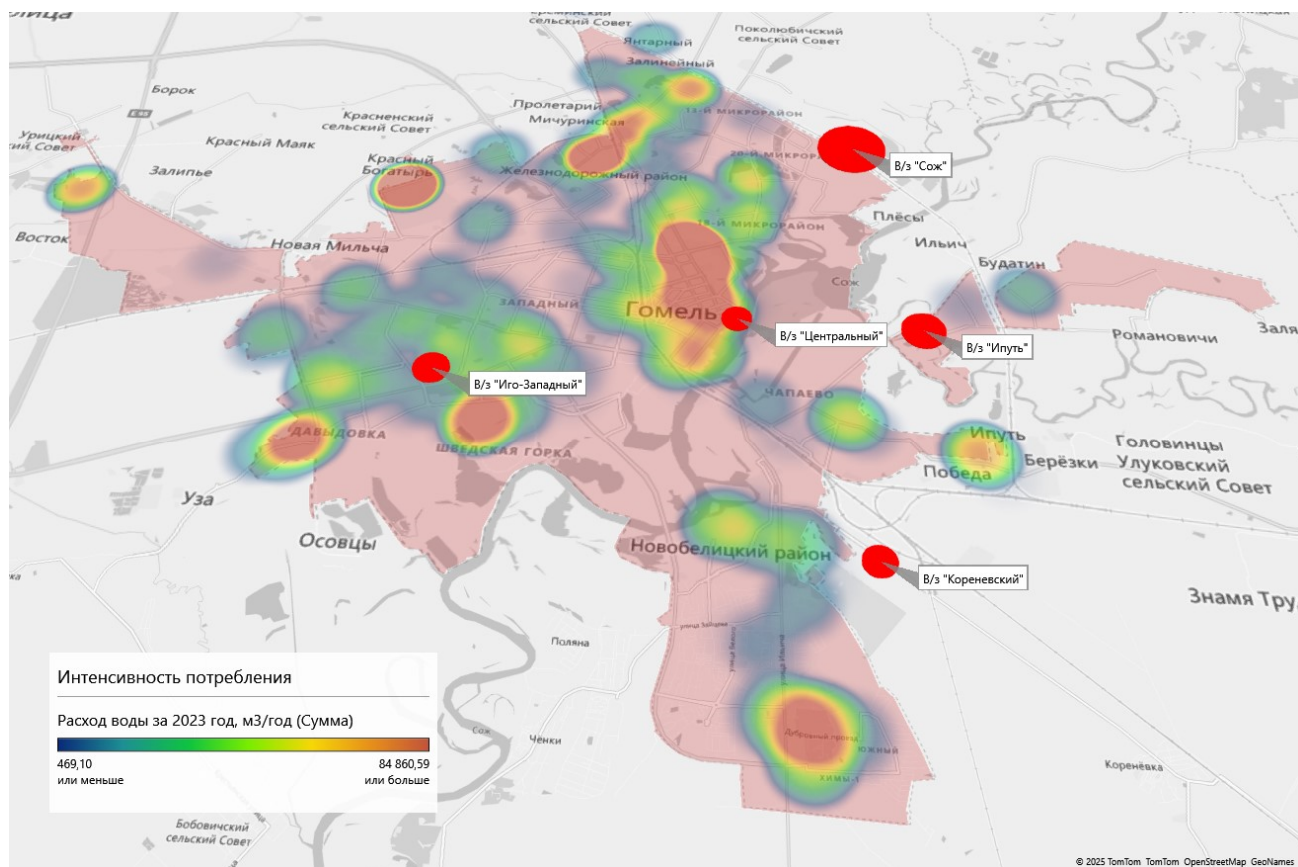


Рис. 2. Тепловая карта водопотребления и источников водоснабжения

Fig. 2. Heat map of water consumption and water supply sources

Пространственная сегментация территории методом иерархической кластеризации

Методологическая основа настоящего исследования базируется на ранее разработанной системе пространственной кластеризации объектов водопотребления в г. Гомеле [4]. В указанной работе посредством иерархической кластеризации обосновано деление городской инфраструктуры на четыре кластера, учитывающих как географическое положение, так и объемы потребления ресурсов. В настоящей статье данная кластеризация используется в качестве основы для последующей оптимизации размещения измерительных устройств. Для выделения групп объектов на карте города применен метод Уорда. Объединение кластеров в рамках данного подхода осуществляется по критерию минимального прироста внутрикластерной дисперсии, рассчитываемой по следующему выражению [14]:

$$\Delta = \sum_i (x_i - \bar{x})^2 - \left(\sum_{x_i \in A} (x_i - \bar{a})^2 + \sum_{x_i \in B} (x_i - \bar{b})^2 \right),$$

где x_i – координаты i -го объекта (широта и долгота); $\bar{a}$, $\bar{b}$, $\bar{x}$ – центры кластеров A , B и их объединения соответственно.

Дальнейшая группировка потребителей осуществлялась методом отсечения, при котором горизонтальная линия проводилась через дендрограмму (рис. 1) на уровне выраженного разрыва между ветвями. Для дополнительной оценки качества разделения данных использован силуэтный коэффициент [14, 15]:

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max(b(i), a(i))},$$

где $a(i)$ – среднее расстояние между i -м объектом и всеми другими объектами его кластера (внутрикластерная дистанция); $b(i)$ – минимальное среднее расстояние между i -м объектом и всеми объектами других кластеров (межкластерная дистанция).

На рис. 4 показано изменение силуэтного коэффициента в зависимости от принятого места разделения объектов на дендрограмме. Можно отметить, что максимальное значение коэффициента ($\approx 0,5$) достигалось при разбиении данных на четыре кластера. Таким образом, результат метода отсечения согласуется с метрикой внутренней кластерной структуры, что подтверждает обоснованность выделения пространственных групп для дальнейшего анализа.

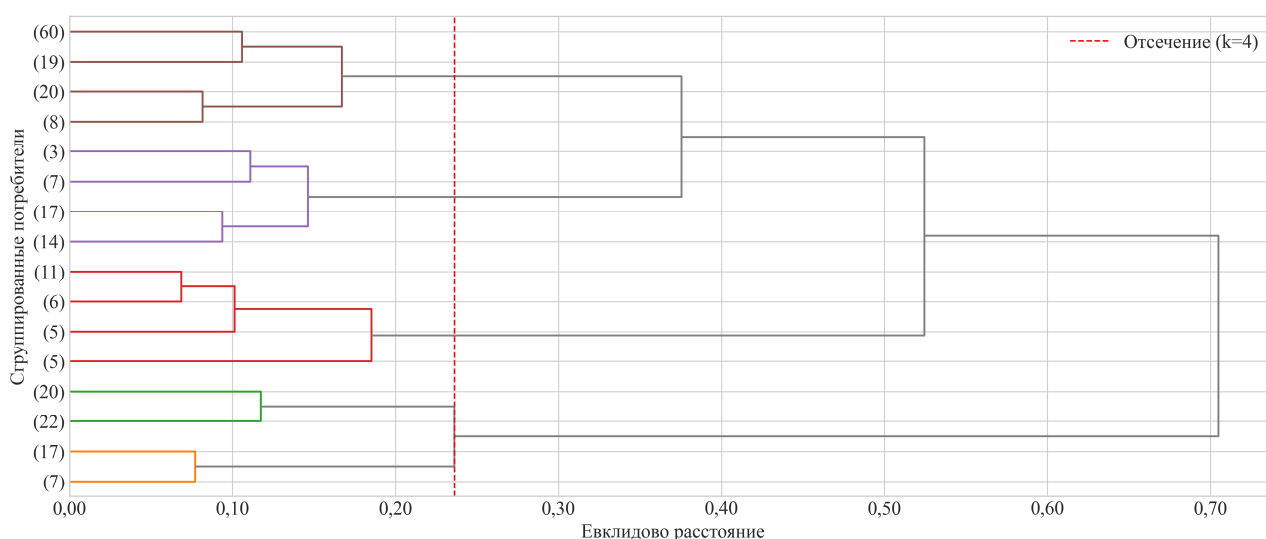


Рис. 3. Дендрограмма объектов водопотребления для кластеризации данных по географическим координатам

Fig. 3. Dendrogram of water consumption objects for clustering data by geographic coordinates

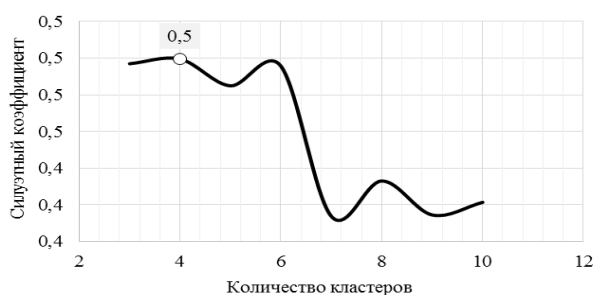


Рис. 4. Изменение силуэтного коэффициента при увеличении количества кластеров для пространственной кластеризации

Fig. 4. Change in silhouette coefficient with increasing number of clusters for spatial clustering

Углубленное исследование структуры полученных групп по интенсивности загрузки демонстрирует выраженную дифференциацию между различными районами города. Кластер 1, охватывающий юго-западную часть города (Советский район), обеспечивает 29 % суммарного потребления. Кластер 2, расположенный в южной части (Новобелицкий район), формирует 14 %. Кластер 3 охватывает северо-восточные территории (Железнодорожный район) с долей 16 %. Наибольший вклад приходится на кластер 4, охватывающий Центральный район Гомеля – 41 % от общего объема. Для отображения пространственной конфигурации каждой группы построены выпуклые оболочки с использованием функции ConvexHull из библиотеки SciPy в Python. Это позволило визуализировать территориальные границы кластеров и подготовить основу для последующего этапа оптимизации размещения устройств методом k -средних. На рис. 5 цветными точками показаны потребители,

включенные в анализ, а пунктирные линии отображают границы соответствующих кластеров.

Оптимизация расположения измерительных устройств методом k -средних

Для выбора стратегии оптимального размещения измерительных устройств в рамках каждого кластера использовался метод k -средних. Особенностью предлагаемого подхода являлось то, что при расчетах учитывались как географическое положение потребителей, так и интенсивность их нагрузки, что обеспечивало более сбалансированное и обоснованное размещение оборудования. Задача сводилась к определению наиболее обоснованных мест положения на карте для распределения 20 датчиков давления по четырем кластерам. При этом количество устройств в каждом кластере определялось пропорционально весу потребления в территориальном сегменте (внутри каждой зоны рис. 5) в соответствии со следующим соотношением:

$$n_k = \frac{Nw_k}{\sum_{k=1}^K w_k},$$

где n_k – количество устройств, размещенных в кластере k ; N – общее количество устройств; w_k – интенсивность потребления в кластере k ; $\sum_{k=1}^K w_k$ – суммарное потребление в кластере.

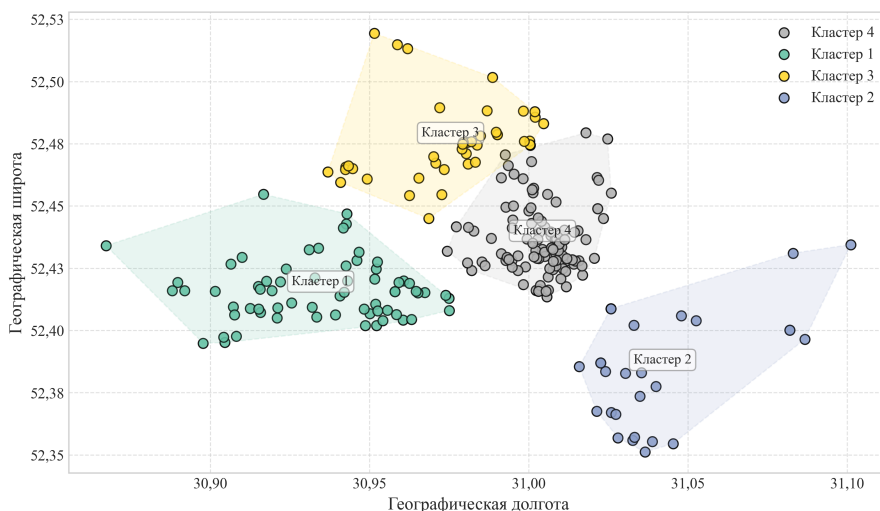


Рис. 5. Результаты пространственной кластеризации потребителей с визуализацией выпуклых оболочек для каждого кластера

Fig. 5. Results of spatial clustering of consumers with visualization of convex hulls for each cluster

В результате устройства распределились по кластерам в следующих соотношениях: 6 единиц в кластере 1, по 3 единицы в кластерах 2 и 3 и 8 единиц в кластере 4. Далее алгоритм k -средних был адаптирован для многопараметрического анализа, в котором каждый объект в кластере представлен вектором признаков, включающим три ключевые компоненты: географическую широту x_1 , долготу x_2 и интенсивность нагрузки потребителей x_3 . Таким образом, для каждого i -го объекта был определен вектор признаков (x_1, x_2, x_3) . На рис. 6 приведена блок-схема алгоритма распределения измерительных устройств методом k -средних, в которой координаты вычисленных центроидов определяют предполагаемые точки размещения оборудования.

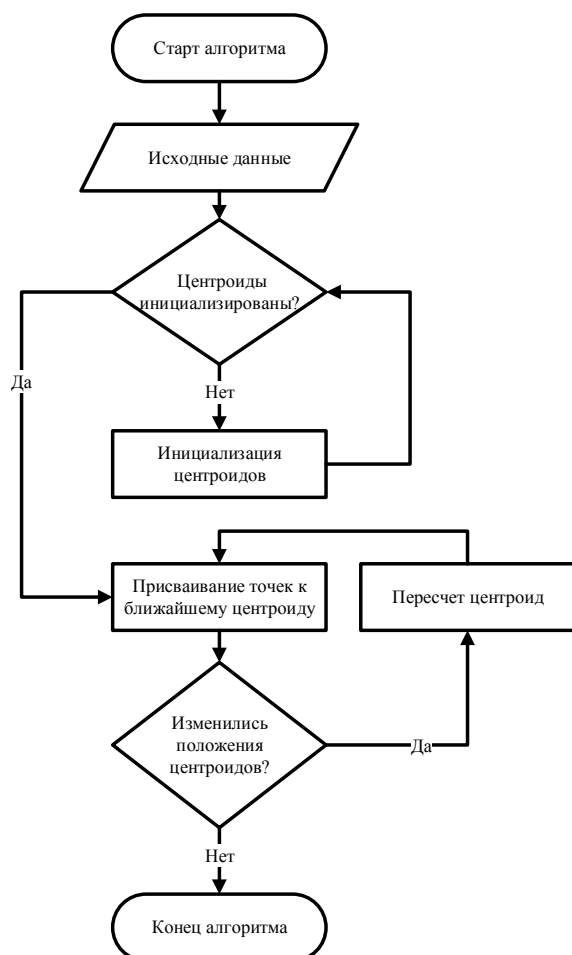


Рис. 6. Алгоритм распределения измерительных устройств методом k -средних

Fig. 6. Algorithm for distributing measuring devices using the k -means method

Рассмотрим последовательность действий реализации предлагаемого метода.

1. Алгоритм начинается с задания начальных позиций устройств, которые случайным образом инициализируются на основе пространственного распределения потребителей и их нагрузочной характеристики.

2. Далее каждая точка (потребитель) присваивается к ближайшему центроиду на основе метрики Евклида в многомерном пространстве

$$d(x, c_i) = \sqrt{(x_1 - c_{i1})^2 + (x_2 - c_{i2})^2 + (x_3 - c_{i3})^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_j - c_{ij})^2},$$

где $x = (x_1, x_2, x_3)$ – координаты точки данных; x_j – координата j точки x ; $c_i = (c_{i1}, c_{i2}, c_{i3})$ – координаты i -й центроиды; c_{ij} – координата j для i -й центроиды c_i ; n – количество измерений (признаков) данных.

3. После распределения точек для каждого кластера рассчитываются новые центроиды как средневзвешенные значения координат и объемов потребления всех точек, попавших в данный кластер:

$$c_k = \left(\frac{\sum_{i \in S_k} x_{1i}}{|S_k|}, \frac{\sum_{i \in S_k} x_{2i}}{|S_k|}, \frac{\sum_{i \in S_k} x_{3i}}{|S_k|} \right),$$

где c_k – новые координаты центроида в кластере k ; S_k – множество точек в кластере k .

Процесс пересчета центроидов и последующего переназначения точек к кластерам повторяется итеративно до достижения сходимости, то есть до тех пор, пока их положение не стабилизируются. В отличие от двухфакторного подхода, учитывающего только географические координаты, предложенный алгоритм дополнительно принимает во внимание вес каждого потребителя, отражающий интенсивность его нагрузки, что позволяет более точно сбалансировать распределение устройств в распределенной системе. На рис. 7 приведены двух- и трехмерная структуры распределения данных для географического кластера 4 (Центральный район города) с указанием результирующего положения центроидов.

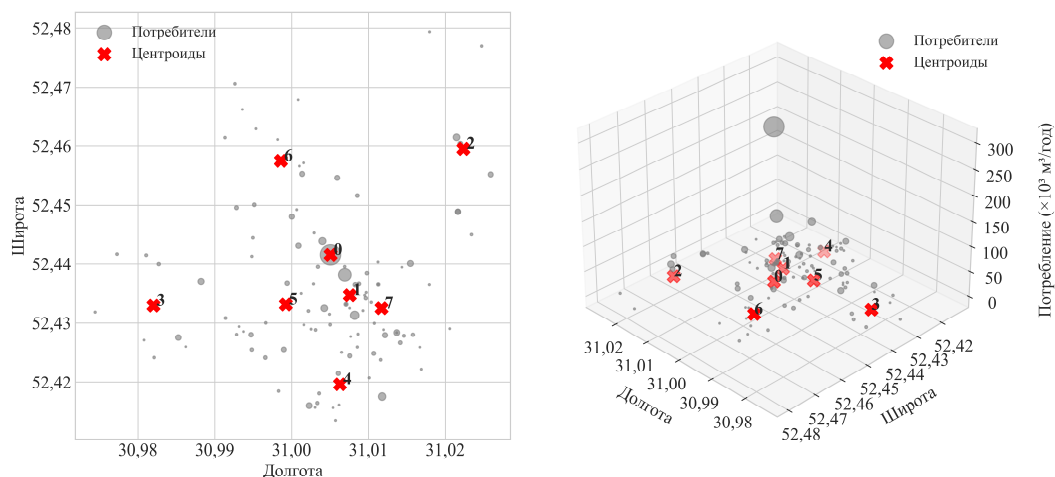


Рис. 7. Пространственная кластеризация и визуализация с учетом объема потребления и географического положения объектов

Fig. 7. Spatial clustering and visualization based on consumption volume and geographic location of objects

В результате применения многопараметрической кластеризации расположение центроидов учитывает их смещение в сторону более мощных потребителей, что обосновано большим весом их воздействия на изменения гидравлических процессов в системе. При отображении центроидов на карте для дальнейшего размещения измерительных устройств используется только географическое положение: x_1 — долгота; x_2 — широта. Важно отметить, что при расчете центроидов координата, отражающая интенсивность нагрузки x_3 (например, водо-

потребление), не участвует в процессе отображения, так как на этом этапе планирования датчики размещаются исключительно на основе географической локализации объектов. На рис. 8 представлена схема распределения территориальных кластеров, где в рамках каждого сектора с учетом пропорции вклада потребления разнесены центры возможных установок измерительных устройств. Центры потенциальных установок помечены звездочками, а водозаборы (Water Stations) обозначены соответствующими маркерами WS.

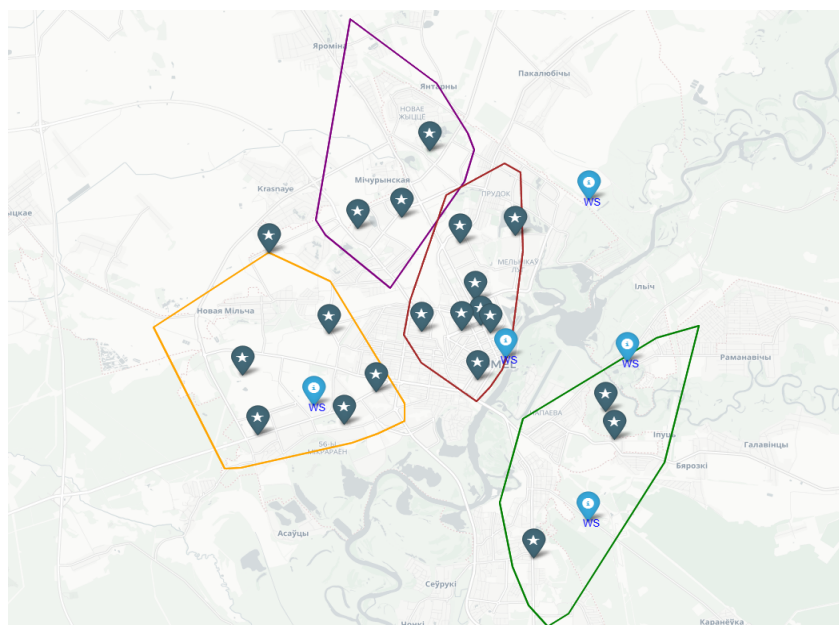


Рис. 8. Схема оптимального расположения датчиков давления на основе многопараметрической кластеризации

Fig. 8. Optimal arrangement of pressure sensors based on multiparameter clustering

Далее на этапе планирования проводится анализ возможных мест установки устройств вблизи рассчитанных центроидов с учетом технических особенностей участков и физической доступности монтажа измерительных устройств.

ВЫВОДЫ

1. Предложена методология для оптимизации размещения измерительных устройств в инженерных системах с учетом пространственного распределения объектов потребления и интенсивности их загрузки. Использование многопараметрического анализа с применением метода Уорда для иерархической кластеризации и алгоритма k -средних позволило разделить объекты, расположенные на территории города и обслуживаемые в единой гидравлической системе, на четыре кластера. Эффективность такого разделения системы подтверждена расчетом силуэтного коэффициента, который имел наибольшее значение (0,5) при четырех кластерах среди остальных. На основе полученных данных произведено пропорциональное распределение датчиков по каждому выделенному территориальному сектору с учетом водопотребления в каждой группе.

2. В результате предложенного подхода распределение датчиков по четырем кластерам выполнено с учетом пропорции потребления в каждом кластере, что позволило более эффективно охватить участки с наибольшей нагрузкой на систему. Количество датчиков в каждом кластере пропорционально объему потребления: шесть датчиков в кластере 1 (29 % от общего потребления), три датчика в кластере 2 (14 %), три датчика в кластере 3 (16 %) и восемь датчиков в кластере 4 (41 %). Выбор точек размещения датчиков внутри каждого кластера определялся с использованием метода k -средних, который позволил учесть как географическое расположение потребителей, так и интенсивность их потребления. Этот метод обеспечил точное расположение центроидов в тех зонах, где нагрузка на систему была наибольшей.

3. На заключительном этапе размещения центры кластеров должны быть соотнесены с реальной сетью с учетом физической возможности монтажа датчиков, а также технических ограничений, таких как доступ к трубопроводной системе и удобство установки оборудования. Полученные данные и методы могут быть адаптированы и использованы для оптимизации размещения измерительных устройств не только в водоснабжающих, но и в других инженерных

системах, таких как тепло- или электроснабжение, с учетом соответствующих особенностей нагрузки и пространственного распределения потребителей. Это делает предложенную методологию универсальной и применимой в широком диапазоне технических задач.

Настоящее исследование выполнено в рамках научно-исследовательской работы «Совершенствование методов непараметрической кластеризации для оптимизации управления и повышения энергоэффективности городского водоснабжения», финансируемой за счет средств республиканского бюджета Республики Беларусь в соответствии с грантом Министерства образования на 2025 год.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gautam, D. K. Efficient k -Means Clustering and Greedy Selection-Based Reduction of Nodal Search Space for Optimization of Sensor Placement in the water Distribution Networks / D. K. Gautam, P. Kotecha, S. Subbiah // *Water Research*. 2022. Vol. 220. Art. 118666. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118666>.
2. Rajabi, M. Pressure Sensor Placement for Leakage Detection and Calibration of Water Distribution Networks Based on Multiview Clustering and Global Sensitivity Analysis / M. Rajabi, M. Tabesh // *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2024. Vol. 150, No 5. <https://doi.org/10.1061/jwrmd5.wreng-6262>.
3. Савин, И. Ю. Об оптимизации размещения сети датчиков интернета вещей на пахотных угодьях / И. Ю. Савин, Ю. И. Блохин // *Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева*. 2022. Vol. 110. С. 22–50. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-22-50>.
4. Geospatial Clustering in Smart City Resource Management: An Initial Step in the Optimisation of Complex Technical Supply Systems / A. A. Kapanski, R. V. Klyuev, A. E. Boltrushchevich [et al.] // *Smart Cities*. 2025. Vol. 8, No 1. <https://doi.org/10.3390/smartcities8010014>.
5. Казаковцев, Л. А. Постановка задачи оптимального размещения сети датчиков мониторинга загрязнения воздуха и воды / Л. А. Казаковцев, М. Н. Гудыма // *Перспективы развития информационных технологий*. 2013. № 13. С. 19–24.
6. Immanuel, S. D. Genetic Algorithm: an Approach on Optimization / S. D. Immanuel, U. K. Chakraborty // *International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*. IEEE, 2019. С. 701–708. <https://doi.org/10.1109/icc45898.2019.9002372>.
7. Suman, B. A Survey of Simulated Annealing as a Tool for Single and Multiobjective Optimization / B. Suman, P. Kumar // *Journal of the operational research society*. 2006. T. 57, No 10. С. 1143–1160. <https://doi.org/10.1109/icc45898.2019.9002372>.
8. Macêdo, J. E. S. De. Hybrid Particle Swarm Optimization and Tabu Search for the Design of Large-Scale Water Distribution Networks / J. E. S. De. Macêdo, J. R. G. De. Azevedo, S. De. T. M. Bezerra // *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. 2021. Vol. 26. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.262120210006>.
9. Optimal Sensor Placement for Leak Location in Water Distribution Networks Using Genetic Algorithms / M. V. Cassillas, V. Puig, L. E. Garza-Castañón, A. Rosich // *Sen-*

- sors. 2013. Vol. 13, No 11. P. 14984–15005. <https://doi.org/10.3390/s131114984>.
10. Pressure Sensor Placement in Water Supply Network Based on Graph Neural Network Clustering Method / S. Peng, J. Cheng, X. Wu [et al.] // *Water*. 2022. Vol. 14, No 2. P. 150. <https://doi.org/10.3390/w14020150>.
11. Locating Leaks in Water Distribution Networks with Simulated Annealing and Graph Theory / J. Sousa, L. Ribeiro, J. Muranho, A. S. Marques // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 119. P. 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.854>.
12. Rajabi, M. Pressure Sensor Placement for Leakage Detection and Calibration of Water Distribution Networks Based on Multiview Clustering and Global Sensitivity Analysis / M. Rajabi, M. Tabesh // *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2024. Vol. 150, No 5. <https://doi.org/10.1061/jwrmd5.wreng-6262>.
13. Sarrate, R. Clustering techniques applied to sensor placement for leak detection and location in water distribution networks / R. Sarrate, J. Blesa, F. Nejari // 2014 22nd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). IEEE, 2014. P. 109–114. <https://doi.org/10.1109/MED.2014.6961356>.
14. Eszergár-Kiss, D. Definition of user groups applying Ward's method / D. Eszergár-Kiss, B. Caesar // *Transportation Research Procedia*. 2017. Vol. 22. P. 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.03.004>.
14. Improved the Performance of the K-Means Cluster Using the Sum of Squared Error (SSE) Optimized by Using the Elbow Method / R. Nainggolan, R. Perangin-angin, E. Simarmata, A. F. Tarigan // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1361, No 1. P. 012015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1361/1/012015>.
15. Shahapure, K. R. Cluster quality analysis using silhouette score / K. R. Shahapure, C. Nicholas // 2020 IEEE 7th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA). IEEE, 2020. P. 747–748. <https://doi.org/10.1109/dsaa49011.2020.00096>.
5. Kazakovtsev L. A., Gudyma M. N. (2013) Statement of the Problem of Optimal Placement of a Network of Air and Water Pollution Monitoring Sensors. *Perspektivy Razvitiya Informatsionnykh Tekhnologiy* [Prospects for the Development of Information technology], (13), 19–24 (in Russian).
6. Immanuel S. D., Chakraborty U. Kr. (2019) Genetic Algorithm: An Approach on Optimization. *2019 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, 701–708. <https://doi.org/10.1109/iccес45898.2019.9002372>.
7. Suman B., Kumar P. (2006) A Survey of Simulated Annealing as a Tool for Single and Multiobjective Optimization. *Journal of the Operational Research Society*, 57 (10), 1143–1160. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602068>.
8. Macêdo J. E. S. de, Azevedo J. R. G. de, Bezerra S. de T. M. (2021). Hybrid Particle Swarm Optimization and Tabu Search for the Design of Large-Scale Water Distribution Networks. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 26, <https://doi.org/10.1590/2318-0331.262120210006>.
9. Casillas M. V., Puig V., Garza-Castañón L., Rosich A. (2013) Optimal Sensor Placement for Leak Location in Water Distribution Networks Using Genetic Algorithms. *Sensors*, 13 (11), 14984–15005. <https://doi.org/10.3390/s131114984>.
10. Peng S., Cheng J., Wu X., Fang X., Wu Q. (2022) Pressure Sensor Placement in Water Supply Network Based on Graph Neural Network Clustering Method. *Water*, 14 (2), 150. <https://doi.org/10.3390/w14020150>.
11. Sousa J., Ribeiro L., Muranho J., Marques A. S. (2015). Locating Leaks in Water Distribution Networks with Simulated Annealing and Graph Theory. *Procedia Engineering*, 119, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.854>.
12. Rajabi M., Tabesh M. (2024) Pressure Sensor Placement for Leakage Detection and Calibration of Water Distribution Networks Based on Multiview Clustering and Global Sensitivity Analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 150 (5). <https://doi.org/10.1061/jwrmd5.wreng-6262>.
13. Sarrate R., Blesa J., Nejari F. (2014) Clustering Techniques Applied to Sensor Placement for Leak Detection and location in Water Distribution Networks. *22nd Mediterranean Conference on Control and Automation*, 109–114. <https://doi.org/10.1109/med.2014.6961356>.
14. Eszergár-Kiss D., Caesar B. (2017) Definition of User Groups applying Ward's Method. *Transportation Research Procedia*, 22, 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.03.004>.
14. Nainggolan R., Perangin-angin R., Simarmata E., Tarigan A. F. (2019) Improved the Performance of the K-Means Cluster Using the Sum of Squared Error (SSE) Optimized by using the Elbow Method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1361 (1), 012015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1361/1/012015>.
15. Shahapure K. R., Nicholas C. (2020) Cluster Quality Analysis Using Silhouette Score. *2020 IEEE 7th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA)*, 747–748. <https://doi.org/10.1109/dsaa49011.2020.00096>.

Поступила 03.04.2025

Подписана в печать 04.06.2025

Опубликована онлайн 31.07.2025

REFERENCES

1. Gautam D. K., Kotecha P., Subbiah S. (2022) Efficient *k*-Means Clustering and Greedy Selection-Based Reduction of Nodal Search Space for Optimization of Sensor Placement in the Water Distribution Networks. *Water Research*, 220, 118666. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118666>.
2. Rajabi M., Tabesh M. (2024) Pressure Sensor Placement for Leakage Detection and Calibration of Water Distribution Networks Based on Multiview Clustering and Global Sensitivity Analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 150 (5). <https://doi.org/10.1061/jwrmd5.wreng-6262>.
3. Savin I. Yu., Blokhin Yu. I. (2022). On Optimizing the Deployment of an Internet of Things Sensor Network for Soil and Crop Monitoring on Arable Plots. *Doklady Akad. Nauk*, 110, 22–50. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-22-50> (in Russian).
4. Kapanski A. A., Klyuev R. V., Boltrushevich A. E., Sorokova S. N., Efremov E. A., Demin A. Y., Martyushev N. V. (2025) Geospatial Clustering in Smart City Resource Management: An Initial Step in the Optimisation of Complex Technical Supply Systems. *Smart Cities*, 8 (1), 14. <https://doi.org/10.3390/smartcities8010014>.
5. Kazakovtsev L. A., Gudyma M. N. (2013) Statement of the Problem of Optimal Placement of a Network of Air and Water Pollution Monitoring Sensors. *Perspektivy Razvitiya Informatsionnykh Tekhnologiy* [Prospects for the Development of Information technology], (13), 19–24 (in Russian).
6. Immanuel S. D., Chakraborty U. Kr. (2019) Genetic Algorithm: An Approach on Optimization. *2019 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, 701–708. <https://doi.org/10.1109/iccес45898.2019.9002372>.
7. Suman B., Kumar P. (2006) A Survey of Simulated Annealing as a Tool for Single and Multiobjective Optimization. *Journal of the Operational Research Society*, 57 (10), 1143–1160. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602068>.
8. Macêdo J. E. S. de, Azevedo J. R. G. de, Bezerra S. de T. M. (2021). Hybrid Particle Swarm Optimization and Tabu Search for the Design of Large-Scale Water Distribution Networks. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 26, <https://doi.org/10.1590/2318-0331.262120210006>.
9. Casillas M. V., Puig V., Garza-Castañón L., Rosich A. (2013) Optimal Sensor Placement for Leak Location in Water Distribution Networks Using Genetic Algorithms. *Sensors*, 13 (11), 14984–15005. <https://doi.org/10.3390/s131114984>.
10. Peng S., Cheng J., Wu X., Fang X., Wu Q. (2022) Pressure Sensor Placement in Water Supply Network Based on Graph Neural Network Clustering Method. *Water*, 14 (2), 150. <https://doi.org/10.3390/w14020150>.
11. Sousa J., Ribeiro L., Muranho J., Marques A. S. (2015). Locating Leaks in Water Distribution Networks with Simulated Annealing and Graph Theory. *Procedia Engineering*, 119, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.854>.
12. Rajabi M., Tabesh M. (2024) Pressure Sensor Placement for Leakage Detection and Calibration of Water Distribution Networks Based on Multiview Clustering and Global Sensitivity Analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 150 (5). <https://doi.org/10.1061/jwrmd5.wreng-6262>.
13. Sarrate R., Blesa J., Nejari F. (2014) Clustering Techniques Applied to Sensor Placement for Leak Detection and location in Water Distribution Networks. *22nd Mediterranean Conference on Control and Automation*, 109–114. <https://doi.org/10.1109/med.2014.6961356>.
14. Eszergár-Kiss D., Caesar B. (2017) Definition of User Groups applying Ward's Method. *Transportation Research Procedia*, 22, 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.03.004>.
14. Nainggolan R., Perangin-angin R., Simarmata E., Tarigan A. F. (2019) Improved the Performance of the K-Means Cluster Using the Sum of Squared Error (SSE) Optimized by using the Elbow Method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1361 (1), 012015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1361/1/012015>.
15. Shahapure K. R., Nicholas C. (2020) Cluster Quality Analysis Using Silhouette Score. *2020 IEEE 7th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA)*, 747–748. <https://doi.org/10.1109/dsaa49011.2020.00096>.

Received: 03.04.2025

Accepted: 04.06.2025

Published online: 31.07.2025