

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. 22 / No 3 / 2023

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

- Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А.,
Девойно О. Г., Литвинко А. А., Оковитый В. В.,
Асташинский В. М., Блюменштейн В. М.**
Аспекты создания многослойных покрытий
методом плазменного напыления 179
- Баевич Г. А., Никитюк Ю. В., Мышковец В. Н.,
Максименко А. В., Аушев И. Ю.**
Оптимизация обработки стали 12X18H9T
кольцевыми лазерными пучками 186

Приборостроение

- Козерук А. С., Сухоцкий А. А., Филонова М. И.,
Юринок В. И., Кузнецик В. О.**
Моделирование процесса формообразования
стеклянных шариков по методу
свободного притирания 193

CONTENTS

Mechanical Engineering and Engineering Science

- Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G.,
Litvinko A. A., Okovity V. V., Astashinsky V. M.,
Blumenstein V. M.**
Aspects of Creating Multilayer Coatings
by Plasma Spraying Method 179
- Bayevich G. A., Nikitjuk Yu. V., Myshkovets V. N.,
Maximenko A. V., Aushev I. Yu.**
Optimization of 12X18H9T-Steel Processing
by Ring Laser Beams 186

Instrumentation Engineering

- Kozeruk A. S., Sukhotsky A. A., Filonova M. I.,
Yurinok V. I., Kuznechik V. O.**
Modeling of the Process
of Shaping Glass Beads According to the Method
of Free Lapping 193

Августовский П. А., Комаровская В. М. Современные тенденции в повышении функциональных свойств внутрисосудистых эндопротезов	199
--	-----

Строительство

Михневич Э. И., Ли Цзэмин Оптимизация параметров магистральных каналов в области гидравлически наивыгоднейших сечений	208
Снежков Д. Ю., Леонович С. Н., Будревич Н. А. Однородность ствола буронабивных свай по результатам четырехканального межскважинного ультразвукового мониторинга	216

Физико-математические науки

Ласый П. Г. Приближенное решение с помощью элементарных функций смешанной задачи с краевыми условиями второго рода для одномерного волнового уравнения	224
---	-----

Энергетика

Рыжова Т. В., Бухаров Д. Н., Аракелян С. М. Моделирование процессов возникновения и роста фрактальных структур и дефектов камер теплоэнергетических установок. Часть 1	231
Кожевников М. М., Никулин В. И., Адамов С. Н. Определение энергосберегающих режимов сушки в аппарате виброfluidized Bed	243

Экономика

Месник Д. Н., Вечёрко Д. А. Экономико-организационный механизм стимулирования развития экологически чистых технологий на транспорте	248
Жуковский Е. М., Кравченко С. Е., Шехова Н. В. К устойчивому дорожному хозяйству через производство негаресурсов	256

Avgustovsky P. A., Komarovskaya V. M. Current Trends in Improving Functional Properties of Intravascular Endoprostheses	199
---	-----

Civil and Industrial Engineering

Mikhnevich E. I., Li Zeming Optimization of Main Canal Parameters in the Area of Hydraulically Most Advantageous Sections	208
Snezhkov D. Yu., Leonovich S. N., Budrevich N. A. Homogeneity of Bored Piles According to Results of Four-Channel Cross-Well Ultrasonic Monitoring	216

Physical and Mathematical Sciences

Lasy P. G. Approximate Solution Using Elementary Functions of Mixed Problem with Boundary Conditions of the Second Kind for One-Dimensional Wave Equation	224
--	-----

Power Engineering

Ryzhova T. V., Bukharov D. N., Arakelyan S. M. Modeling Processes of Emergence and Growth of Fractal Structures and Chamber Defects of Thermal Power Units. Part 1	231
Kozhevnikov M. M., Nikulin V. I., Adamov S. N. Determination of Energy-Saving Drying Modes in Vibrofluidized Bed Apparatus	243

Economy in Industry

Mesnik D. N., Vecherko D. F. Economic and Organizational Mechanism for Stimulating Development of Environmentally Friendly Technologies in Transport	248
Zhukouski Ya. M., Kravchenko S. E., Shehova N. V. Toward Sustainable Road Infrastructure Through Production of Nega-Resources	256

Главный редактор
Борис Михайлович Хрусталеv

Редакционная коллегия

- Алексеев Ю. Г.** (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),
- Леонович С. Н.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,
- 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),
- Пенязков О. Г.** (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),

Editor-in-Chief
Boris M. Khroustalev

Editorial Board

- Aliakseyeu Yu. G.** (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),
- Leonovich S. N.** (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,
- 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),
Романюк Ф. А. (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Сидерис К. (Фракийский университет имени Демокрита, Комотини, 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),
Чжао Цзи (Северо-Восточный университет, Шэньян, Китайская Народная Республика),
Чижи́к С. А. (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
Шелег В. К. (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,
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),
Zhao Ji (Northeastern University, Shenyang, People's Republic of China),
Chizhik S. A. (National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
Sheleg V. K. (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,
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 31.05.2023. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 11,25. Уч.-изд. л. 9,9. Тираж 100 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.

220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

© Белорусский национальный технический университет, 2023

Lead Science Editor

V. N. Guryanichyk

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/10.21122/2227-1031-2023-22-3-179-185>

УДК 621.793.7:621.762

Аспекты создания многослойных покрытий методом плазменного напыления

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. И. Пантелеенко¹⁾,
канд. техн. наук В. А. Оковитый¹⁾, докт. техн. наук, проф. О. Г. Девойно¹⁾,
инженеры А. А. Литвинко¹⁾, В. В. Оковитый¹⁾,
чл.-кор. НАН Беларуси, докт. физ.-мат. наук, проф. В. М. Асташинский²⁾,
докт. техн. наук, проф. В. М. Блюменштейн³⁾

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

²⁾Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь),

³⁾Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (Кемерово, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. В работе с учетом состояния вопроса в области нанесения многослойных теплозащитных и износостойких покрытий обоснованы направления исследований. Задачами разработки являются: совершенствование порошковых материалов, содержащих частично стабилизированный оксидом иттрия диоксид циркония для плазменного нанесения теплозащитных покрытий; совершенствование порошковых материалов, содержащих оксидную керамику и сплавы на основе никеля для плазменного нанесения износостойких покрытий; отработка технологических параметров плазменного напыления и последующей обработки воздействиями на покрытие компрессионной плазмы; анализ качества полученных по оптимальной технологии защитных покрытий путем исследования их структуры и физико-механических свойств. Частицы $ZrO_2 - 7\% Y_2O_3$ содержат преобладающую тетрагональную фазу $Y_{0,15}Zr_{0,85}O_{0,93}$, моноклинную и кубическую фазы ZrO_2 , а композиция $Al_2O_3-TiO_2-Ni-Cr-Al-Y-Ta$ содержит способствующие ее износостойкости фазы $Cr_{1,12}Ni_{2,88}$ твердого раствора на основе никеля, фазы $\alpha-Al_2O_3$, $\gamma-Al_2O_3$, орторомбическую фазу оксида титана TiO_2 . Исследованы с последующей оптимизацией технологические параметры для процесса плазменного напыления многослойных теплозащитных и износостойких покрытий. Критериями оптимизации служили коэффициент использования напыляемого порошкового материала и структура покрытий. Исследовано влияние дистанции напыления на значения эксплуатационных характеристик сформированных плазменных покрытий на $Al_2O_3-TiO_2-Ni-Cr-Al-Y-Ta$. Приведены полученные результаты регулирования фазового состава покрытий с помощью варьирования химического состава порошковых материалов, отличия в фазовом составе сформированного материала тем значительнее, чем более неоднородно распределение элементов в исходном порошковом материале. Проведены испытания на циклическое тестирование в печи при максимальной температуре в пределах 1300 °C теплозащитных покрытий для выявления их термостойкости. Они доказали влияние фазового состава сформированных покрытий на их способность противостоять высокотемпературному окислению.

Ключевые слова: плазменный процесс, многослойность, теплозащита, износостойкость, оптимизация режимов, эксплуатационные характеристики, циклическое тестирование, параметры процесса, структура покрытий

Для цитирования: Аспекты создания многослойных покрытий методом плазменного напыления / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 3. С. 179–185. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-179-185>

Адрес для переписки

Оковитый Вячеслав Александрович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-71
nii_svarka@bntu.by

Address for correspondence

Okovity Vjacheslav A.
Belarusian National Technical University
22, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-71
nii_svarka@bntu.by

Aspects of Creating Multilayer Coatings by Plasma Spraying Method

F. I. Panteleenko¹, V. A. Okovity¹, O. G. Devoino¹, A. A. Litvinko¹, V. V. Okovity¹,
V. M. Astashinsky², V. M. Blumenstein³

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

²A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

³Kuzbass State Technical University named after T. F. Gorbachev

Abstract. In the work, taking into account the state of the issue in the field of applying multilayer heat-shielding and wear-resistant coatings, directions of research are substantiated. The objectives of the development are: improvement of powder materials containing zirconium dioxide partially stabilized with yttrium oxide for plasma deposition of heat-shielding coatings; improvement of powder materials containing oxide ceramics and nickel-based alloys for plasma deposition of wear-resistant coatings; development of technological parameters of plasma spraying and subsequent processing by the effects of compression plasma on the coating; analysis of the quality of protective coatings obtained using the optimal technology by studying their structure and physical and mechanical properties. The $ZrO_2 - 7\% Y_2O_3$ particles contain the predominant tetragonal $Y_{0.15}Zr_{0.85}O_{0.93}$ phase, monoclinic and cubic ZrO_2 phases, and the $Al_2O_3-TiO_2-Ni-Cr-Al-Y-Ta$ composition contains the $Cr_{1.12}Ni_{2.88}$ phase of the nickel-based solid solution, the $\alpha-Al_2O_3$, $\gamma-Al_2O_3$ phases, and the orthorhombic phase of titanium oxide TiO_2 that contribute to its wear resistance. subsequent optimization of technological parameters for the process of plasma spraying of multilayer heat-shielding and wear-resistant coatings. Technological parameters for the process of plasma spraying of multi-layer heat-shielding and wear-resistant coatings are investigated with subsequent optimization. The optimization criteria were the utilization factor of the sprayed powder material and the structure of the coatings. The influence of the spraying distance on the values of operational characteristics of the formed plasma coatings on $Al_2O_3-TiO_2-Ni-Cr-Al-Y-Ta$ has been studied. The obtained results of controlling the phase composition of coatings by varying the chemical composition of powder materials are presented. In the process of deposition, the differences in the phase composition of the formed material are the more significant, the more inhomogeneous the distribution of elements in the initial powder material. Tests have been carried out for cyclic testing in an oven at a maximum temperature within 1300 °C of heat-shielding coatings to determine their heat resistance. They proved the influence of the phase composition of the formed coatings on their ability to withstand high-temperature oxidation.

Keywords: plasma process, layering, thermal protection, wear resistance, optimization of modes, operational characteristics, cyclic testing, process parameters, coating structure

For citation: Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Litvinko A. A., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Blumenstein V. M. (2023) Aspects of Creating Multilayer Coatings by Plasma Spraying Method. *Science and Technique*. 22 (3), 179–185. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-179-185> (in Russian)

Введение

Одним из способов для эффективной защиты деталей от износа, коррозии и окисления является создание на их поверхности плазменных многослойных керамических покрытий. Для получения качественных эксплуатационных характеристик такие покрытия должны обладать максимально равномерным и плавным переходом свойств (общая и открытая пористость, микротвердость и твердость, характеристики модулей упругости) от применяемой основы к внешнему сформированному керамическому слою. Данные многослойные защитные покрытия состоят из подслоев на основе никелевых или кобальтовых металлических сплавов, внешних слоев на базе оксидной керамики и нескольких переходных с плавным изменением металлического и керамического компонента. Последующее их разрушение во время эксплуатации связано с термомеханическими напряжениями, вызываемыми различиями параметров термического расширения металлических суперсплавов основы и сформированных керамических слоев. Дополнительная

причина кроется в неравномерности при распределении температурных полей в структуре покрытия. Взаимодействие остаточных напряжений усиливает эффект термомеханических. Применение тщательно подобранных подслоев способствует возрастанию пластичности и ползучести, а они соответственно ослабляют термомеханические напряжения. Преимущественное использование процессов плазменного напыления для генерирования защитных покрытий с многослойной системой связано с его достаточно высокой универсальностью, производительностью и технологичностью, позволяющими создавать строго определенные системы построения покрытий.

Результаты исследований многослойных систем плазменных покрытий

Проведены исследования порошковых материалов для формирования плазменных многослойных систем теплозащитных и износостойких покрытий [1–3]. С применением сканирующей электронной микроскопии изучены форма, рельеф и размер частиц порошков, используемых для напыления покрытий. Уста-

новлено, что эти порошковые материалы характеризуются достаточно сложной формой и рельефом поверхности частиц. Размер гранул порошка диоксида циркония в свободно насыпанном состоянии и диспергированного в ультразвуке находится в пределах 10–70 и 5–60 мкм (рис. 1а). Для композиции 60 % ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$) – 40 % Ni–Cr–Al–Y–Ta эти параметры имеют следующие значения: 10–100 и 0–5 мкм (рис. 1б). При обсчете частиц порошка с фотографий на анализаторе изображения определены их гранулометрический состав и средний максимальный диаметр частиц: для композиции $\text{ZrO}_2 + 7\% \text{Y}_2\text{O}_3$ размер гранул составляет 38 мкм; для 60 % ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$) – 40 % Ni–Cr–Al–Y–Ta их величина 44 мкм. Результаты рентгеноструктурного анализа свидетельствуют о том, что частицы $\text{ZrO}_2 - 7\% \text{Y}_2\text{O}_3$ содержат преобладающую

тетрагональную фазу $\text{Y}_{0,15}\text{Zr}_{0,85}\text{O}_{0,93}$, моноклинную и кубическую фазы ZrO_2 , а композиция 60 % ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$) – 40 % Ni–Cr–Al–Y–Ta содержит способствующие ее износостойкости фазу $\text{Cr}_{1,12}\text{Ni}_{2,88}$ твердого раствора на основе никеля, фазы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, орторомбическую фазу оксида титана TiO_2 .

Исследованы с последующей оптимизацией параметры, характеризующие технологию плазменного напыления многослойных теплозащитных и износостойких покрытий. Критериями оптимизации служили коэффициент использования порошка (КИП) (рис. 2, 3) и структура покрытий [4–7]. Для многослойного теплозащитного покрытия $\text{ZrO}_2 - 7\% \text{Y}_2\text{O}_3$ учитывали также его стойкость к термоциклированию, выбирая режим с повышенной долговечностью нанесенного слоя.

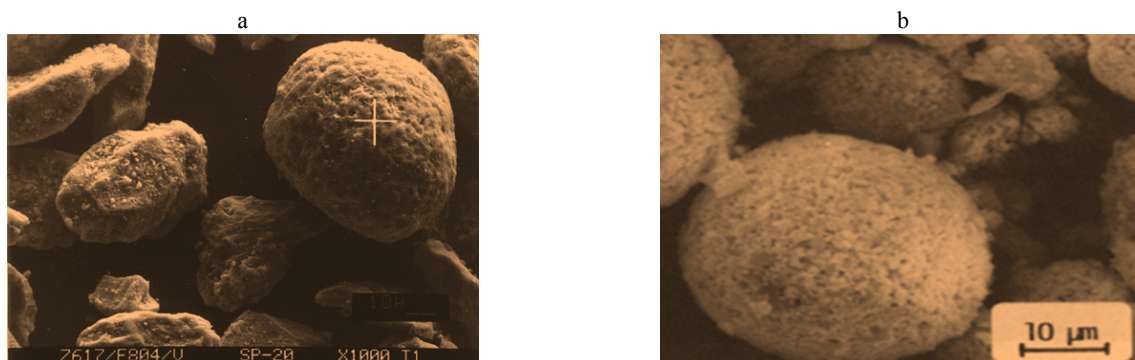


Рис. 1. Морфология полученных порошковых материалов: а – $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$, полученного химико-термическим методом; б – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2 - \text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$ после проведенного процесса сфероидизации ($\times 500$)

Fig. 1. Morphology of the obtained powder materials: а – $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ obtained by the chemical-thermal method; б – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2 - \text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$ after the spheroidization process ($\times 500$)

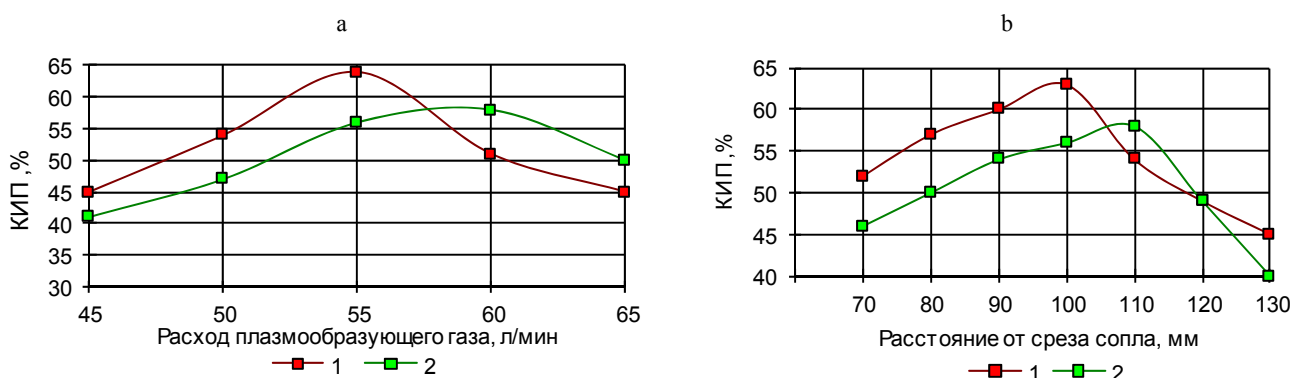


Рис. 2. Зависимость коэффициента использования порошка ZrO_2 , % (1 – с фракцией <50 мкм; 2 – с фракцией 50–63 мкм) от: а – расхода плазмобразующего газа азота N_2 (дистанция при напылении $L = 100$ мм; ток подводимой дуги $I = 500$ А; расход порошкового материала $R_{\text{пор}} = 4,5$ кг/ч); б – используемых дистанций при напылении L , мм (ток подводимой дуги $I = 500$ А, расход плазмобразующего газа азота $R_{\text{N}_2} = 50$ л/мин, расход при подаче порошкового материала $R_{\text{пор}} = 4,5$ кг/ч)

Fig. 2. Dependence of ZrO_2 powder utilization factor, % (1 – with fraction <50 μm ; 2 – with fraction 50–63 μm) on: а – consumption of plasma-forming nitrogen N_2 (spraying distance $L = 100$ mm; supplied arc current $I = 500$ A; consumption of nitrogen plasma gas $R_{\text{N}_2} = 50$ l/min, consumption of powder material $R_{\text{pow}} = 4.5$ kg/h); б – used distances during spraying, L , mm (supplied arc current $I = 500$ A, consumption of plasma-forming nitrogen $R_{\text{N}_2} = 50$ l/min, consumption of powder material $R_{\text{pow}} = 4.5$ kg/h)

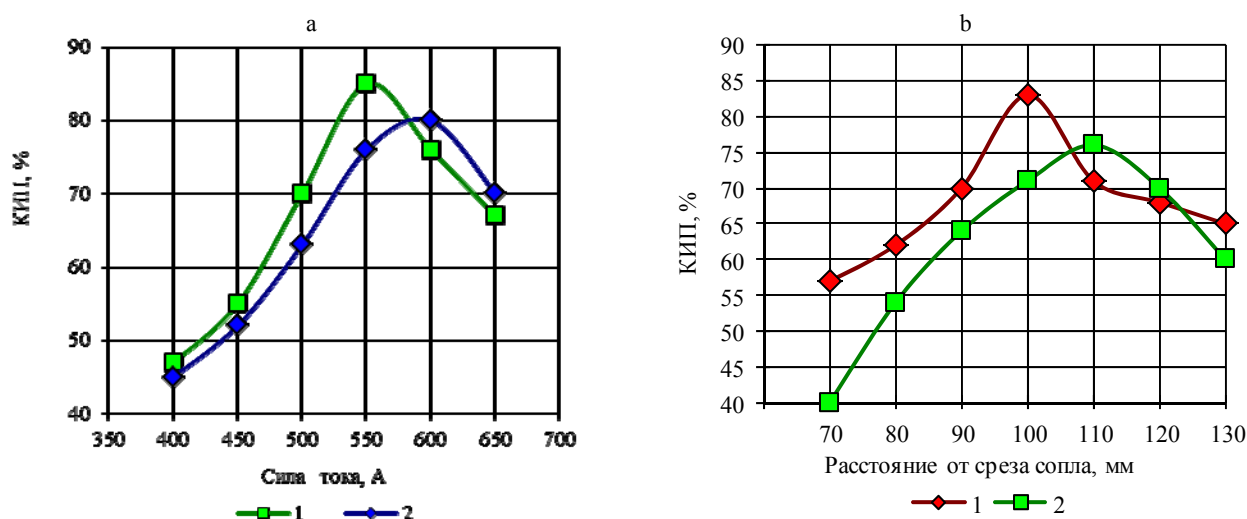


Рис. 3. Зависимость коэффициента использования порошка $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2\text{--Ni--Cr--Al--Y--Ta}$, % (1 – с фракцией <50 мкм; 2 – с фракцией 50–63 мкм) от: а – подводимого тока плазматрона (I , А) ($R_{\text{пор}} = 4,5$ кг/ч; $R_{\text{N}_2} = 45$ л/мин; $L = 100$ мм); б – дистанции при напылении L , мм ($R_{\text{пор}} = 4,5$ кг/ч; $R_{\text{N}_2} = 45$ л/мин; $I = 550$ А)

Fig. 3. Dependence of the powder utilization factor of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2\text{--Ni--Cr--Al--Y--Ta}$, % (1 – with fraction <50 μm ; 2 – with fraction 50–63 μm): а – input current of the plasma torch (I , А) ($R_{\text{por}} = 4.5$ kg/h; $R_{\text{N}_2} = 45$ l/min; $L = 100$ mm); б – spray distance L , mm ($R_{\text{por}} = 4.5$ kg/h; $R_{\text{N}_2} = 45$ l/min; $I = 550$ А)

По результатам исследований режимов напыления выполнена их оптимизация [8–11]. После этого оптимизированным режимам соответствовали максимальные значения КИП, а пористость покрытий изменялась в более узких пределах: при напылении $\text{ZrO}_2 + 7\% \text{Y}_2\text{O}_3$ пористость 8–10 %; открытая по-

ристость 2,5–4,0 %; 60 % ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$) – 40 % Ni--Cr--Al--Y--Ta пористость 5,1–7,5 %; открытая пористость 1,8–2,5 %. Исследовано влияние дистанции при напылении на значения эксплуатационных характеристик сформированных плазменных покрытий на $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2\text{--Ni--Cr--Al--Y--Ta}$ (рис. 4).

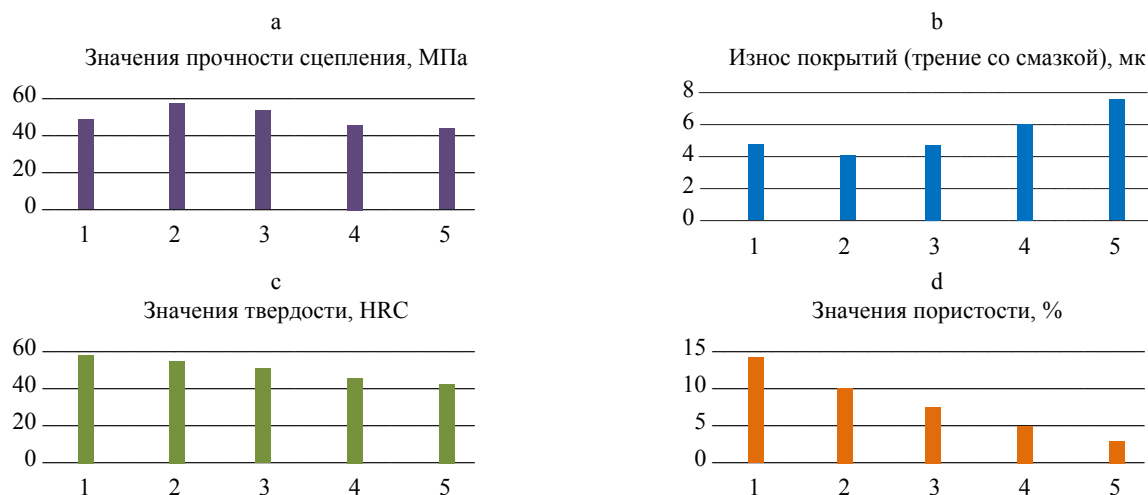


Рис. 4. Показатели характеристики сформированных износостойких покрытий: а – прочности сцепления; б – износостойкости; в – твердости; г – пористости (1 – 70 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ – 30 % Ni--Cr--Al--Y--Ta ; 2 – 60 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ – 40 % Ni--Cr--Al--Y--Ta ; 3 – 50 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ – 50 % Ni--Cr--Al--Y--Ta ; 4 – 40 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ – 60 % Ni--Cr--Al--Y--Ta ; 5 – 30 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ – 70 % Ni--Cr--Al--Y--Ta)

Fig. 4. Indicators of the characteristics of the formed wear-resistant coatings: а – adhesion strength; б – wear resistance; в – hardness; г – porosity (1 – 70 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ – 30 % Ni--Cr--Al--Y--Ta ; 2 – 60 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ – 40 % Ni--Cr--Al--Y--Ta ; 3 – 50 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ – 50 % Ni--Cr--Al--Y--Ta ; 4 – 40 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ – 60 % Ni--Cr--Al--Y--Ta ; 5 – 30 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ – 70 % Ni--Cr--Al--Y--Ta)

В табл. 1 предоставлены данные анализа содержания элементов с площади 10×12 мкм для $ZrO_2-Y_2O_3$, полученного химико-термическим способом. Фазовый состав сформированных покрытий и их термостойкость в зависимости от химического состава частично стабилизированного оксидом иттрия диоксида циркония проиллюстрированы табл. 2. Фазовый состав сформированных покрытий отличается от фазового состава исходных порошков, и отличие связано с однородностью распределения элементов в исходном порошковом материале. Перераспределение элементов происходит при нахождении материала в плазменном потоке. Варьируя химический состав порошков, можно изменять структуру и свойства сформированного теплозащитного покрытия (ТЗП). Проводили циклическое тестирование покрытий в электропечи. Цикл состоял из нагрева до установленной температуры 1300°C и выдержки в течение 60 мин с последующим охлаждением до температуры 300°C . После проведения 10 циклов образцы изымали для визуальной проверки. Испытания длились до видимой невооруженным глазом дефектации керамического слоя (формирование трещины или скола). По результатам исследований структуры и физико-механических свойств нанесенных многослойных покрытий проанализирован механизм формирования теплозащитных и износостойких слоев. При плазменном напылении $ZrO_2 - 7\% Y_2O_3$ теплозащитные свойства формируются за счет тетрагональной фазы ZrO_2 , микрорастрескивания покрытия в перпендикулярном подложке направлении (сег-

ментации). При напылении $60\% (Al_2O_3 - TiO_2) - 40\% Ni-Cr-Al-Y-Ta$ износостойкость формируется структурными элементами, обеспечивающими повышенную маслоудерживающую способность покрытий (никель, хром). Необходимые свойства достигаются также за счет оксидных включений в связующем матричном материале, которые обуславливают повышенную твердость нанесенных слоев. Рассмотренный механизм формирования свойств многослойных покрытий при напылении композиционных материалов свидетельствует о том, что имеется возможность улучшения теплозащитных характеристик и износостойкости путем обработки нанесенных слоев воздействиями компрессионной плазмы. Однако подобное утверждение требует экспериментальной проверки, что предусмотрено осуществить на следующем этапе исследований.

Таблица 1

**Содержание элементов
в порошковых частицах $ZrO_2-Y_2O_3$,
полученных химико-термическим методом
(анализировали на площади 10×12 мкм)
Content of elements in $ZrO_2-Y_2O_3$ powder
particles, obtained by chemical-thermal method
(analyzed over an area of 10×12 μm)**

№	Содержание оксидов и элементов в порошковых частицах $ZrO_2-Y_2O_3$				
	O	Y	Zr	ZrO_2	Y_2O_3
По сечению порошковой частицы					
1	19,70	3,60	76,70	98,50	1,50
2	20,70	3,80	75,50	98,18	1,82
На поверхности порошковой частицы					
1	20,73	3,97	75,30	98,90	1,10
2	18,70	4,47	76,83	98,80	1,20

Таблица 2

**Фазовый состав сформированных покрытий и их термостойкость
в зависимости от химического состава частично стабилизированного оксидом иттрия диоксида циркония
Phase composition of the formed coatings and their heat resistance depending
on the chemical composition of zirconium dioxide partially stabilized with yttria**

Состав материала	Метод изготовления порошка	Фаза, %			Количество проведенных термоциклов
		кубическая	моноклинная	тетрагональная	
$ZrO_2 - 6,0\% Y_2O_3$	Метод химико-термический	10,0	33,0	57,0	282
$ZrO_2 - 8,0\% Y_2O_3$	—	—	1,1	98,9	434
$ZrO_2 - 7,0\% Y_2O_3$	—	2,1	6,5	91,4	615

Покрывтия сформированы на одном режиме: ток дуги $I = 600$ А, расход аргона $R_{Ar} = 30$ л/мин, расход водорода $R_{H_2} = 8$ л/мин, дистанция формирования $L = 110$ мм, охлаждение сжатым воздухом, расход воздуха $R_{\text{в}} = 2,5$ кг/ч.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены вопросы создания многослойных плазменных теплозащитных и износостойких покрытий. Обоснованы утверждения о том, что в качестве материала для формирования плазменных покрытий, работающих в условиях высоких температур, наиболее пригоден частично стабилизированный диоксид циркония, а для износостойких – композиционный материал на базе оксидной керамики и сплавов на основе никеля.

2. Исследованы свойства применяемых материалов. Можно констатировать, что многослойные, сформированные плазменным напылением покрытия с необходимыми для эксплуатации в условиях высокотемпературного износа характеристиками можно сформировать только из материалов со строго установленными размерами и морфологией частиц у исходных порошковых материалов. Обязательным условием также является гомогенность по сечению у исходных порошков фазового и химического составов при минимальном размере фазовых включений. На основе осуществленных экспериментов авторы получили следующие результаты:

1) частицы частично стабилизированного диоксида циркония содержат преобладающую тетрагональную фазу $Y_{0,15}Zr_{0,85}O_{0,93}$, моноклинную и кубическую фазы ZrO_2 , а частицы композиционного износостойкого материала – элементы, способствующие его износостойкости (фазы $Cr_{1,12}Ni_{2,88}$ твердого раствора на основе никеля, фазы $\alpha-Al_2O_3$, $\gamma-Al_2O_3$, орторомбическая фаза оксида титана TiO_2);

2) оптимизированные по коэффициенту использования порошка технологические параметры плазменного напыления многослойных теплозащитных и износостойких покрытий, где критериями оптимизации служили коэффициент использования напыляемого порошкового материала и структура покрытий, для многослойного теплозащитного покрытия на базе

частично стабилизированного диоксида циркония учитывали также его стойкость к термостатированию, выбирая режимы с повышенной долговечностью нанесенного слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Формирование и исследование плазменных двухслойных композиционных покрытий (вязкий металлический слой $NiCr$ и твердый ZrO_2) / В. А. Оковитый [и др.] // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 1. С. 21–28. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-1-21-28>.
2. Технологические особенности формирования плазменных порошковых покрытий из керамики с неравномерной структурой / В. А. Оковитый [и др.] // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 3. С. 183–189. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-183-189>.
3. Формирование и исследование плазменных порошковых покрытий из оксидной керамики, модифицированной высокоэнергетическими воздействиями / В. А. Оковитый [и др.] // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 5. С. 377–389. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-378-389>.
4. Формирование покрытий на основе диоксида циркония на элементах экранов противометеорной защиты / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Вестник Кузбасского технического университета. 2018. № 6 (130). С. 94–101. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2018-6-94-100>.
5. Формирование плазменных порошковых покрытий из металлокерамики с последующим высокоэнергетическим модифицированием / В. А. Оковитый [и др.] // Наука и техника. 2020. Т. 19, № 6. С. 469–474. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-469-474>.
6. Разработка композиционного материала на основе керамики с применением добавок соединений тугоплавких металлов / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2020. № 4 (140). С. 18–24. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2020-4-18-24>.
7. Формирование и исследование многослойных композиционных плазменных покрытий / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2021. № 2. С. 15–27.
8. Обзор современного применения металлокерамических покрытий / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2021. № 3. С. 5–17. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2021-3-5-17>.
9. Оптимизация процесса нанесения покрытий из порошков металлокерамики методами плазменного напыления на воздухе / В. А. Оковитый [и др.] // Наука и техника. 2021. Т. 20, № 5. С. 369–374. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-369-374>.
10. Multi-Layers Composite Plasma Coatings Based on Oxide Ceramics and M-Cr / F. I. Panteleenko [et al.] // Наука и техника. 2022. Т. 21, № 2. С. 93–98. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-93-98>.
11. Выбор оптимальных параметров нанесения многослойных плазменных покрытий из материалов на ос-

нове никелевых М-кролей / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. № 1. С. 12–22. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2022-1-12-22>.

Поступила 10.01.2023

Подписана к печати 14.03.2023

Опубликована онлайн 31.05.2023

REFERENCES

1. Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Hramtsov P. P., Chernik M. Y., Uglov V. V., Chimanskiy V. I., Cerenda N. N., Sobolewski S. B. (2018) Formation and Study of Plasma Spraying Double-Layer Composite Coatings (Viscous Metallic NiCr and Solid ZrO₂ Layer). *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 17 (1), 21–28. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-1-21-28> (in Russian).
2. Okovity V. A., Panteleenko F. I., Astashinsky V. M., Okovity V. V. (2018) Technological Specific Features on Formation of Plasma Powder Coatings from Ceramics with Non-Equilibrium Structure. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 17 (3), 183–189. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-183-189> (in Russian).
3. Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Uglov V. V., Chimanskiy V. I., Cerenda N. N. (2018) Formation and Investigation of Plasma Powder Coatings Made of Oxide Ceramics Modified with High-Energy Effects. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 17 (5), 378–389. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-378-389> (in Russian).
4. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Uglov V. V. (2018) Formation of Coatings on the Basis of zirconium Dioxide on the Elements of Screens of Anti-Elementary Protection. *Vestnik Kuzbasskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 130 (6), 94–100. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2018-6-94-100> (in Russian).
5. Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M. (2020) Formation of Plasma Powder Coatings from Cermet with Subsequent High-Energy Modification. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 19 (6), 469–474. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-469-474> (in Russian).
6. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Sidorov V. A., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Rafal K. (2020) Development of Composite Material Based on Ceramics with the Use of Additives of Refractory Metal Compounds. *Vestnik Kuzbasskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 140 (4), 18–24. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2020-4-18-24> (in Russian).
7. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Uglov V. V. (2021) Formation and Research Multilayer Composite Plasma Coatings. *Vestnik GGTU im. P. O. Sukhogo = Bulletin Sukhoi State Technical University of Gorny, (2)*, 15–27 (in Russian).
8. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Sidorov V. A., Okovity V. V., Astashinsky V. M. (2021) Overview of Modern Ceramic Coating Applications. *Vestnik Kuzbasskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 145 (3), 5–17. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2021-3-5-17> (in Russian).
9. Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M. (2021) Optimization of Coating Process from Cermet Powders by Plasma Spraying in Air. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 20 (5), 369–374. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-369-374> (in Russian).
10. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Astashinsky V. M., Switala F. (2022) Multi-Layers Composite Plasma Coatings Based on Oxide Ceramics and M-Croll. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 21 (2), 93–98. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-93-98>.
11. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Sidorov V. A., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Franciszek S., Blumenstein V. Yu. (2022) Selection of Optimal Parameters for Applying Multilayer Plasma Coatings From Materials Based on Nickel M-Croll. *Vestnik Kuzbasskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 149 (1), 12–22. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2022-1-12-22> (in Russian).

Received: 10.01.2023

Accepted: 14.03.2023

Published online: 31.05.2023

Оптимизация обработки стали 12X18H9T кольцевыми лазерными пучками

Г. А. Баевич¹⁾, кандидаты физ.-мат. наук, доценты Ю. В. Никитюк¹⁾, В. Н. Мышковец¹⁾,
кандидаты техн. наук, доценты А. В. Максименко¹⁾, И. Ю. Аушев²⁾

¹⁾УО «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»
(Гомель, Республика Беларусь),

²⁾Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. В работе с использованием генетического алгоритма MOGA, встроенного в модуль DesignXplorer программы ANSYS Workbench, выполнена оптимизация лазерной обработки стали 12X18H9T кольцевыми пучками. Расчет температурных полей проводили с учетом зависимости теплофизических свойств материала от температуры методом конечных элементов в программе ANSYS Workbench. Получена регрессионная модель обработки стали 12X18H9T кольцевыми лазерными пучками с использованием гранецентрированного варианта центрального композиционного плана эксперимента. В качестве варьируемых факторов использовали плотность мощности и длительность импульсов лазерного излучения, внешний и внутренний диаметры лазерного пучка в плоскости обработки, в качестве откликов – глубины проплавления материала и максимальные температуры в зоне лазерной обработки. Произведена оценка влияния параметров обработки на глубины проплавления материала в зоне лазерного воздействия и максимальные значения температуры. Установлено, что на глубины проплавления материала и максимальные температуры наибольшее воздействие оказывает плотность мощности лазерного излучения. Оптимизацию лазерной обработки стали 12X18H9T кольцевыми пучками выполняли при задании предельных значений максимальной температуры в зоне обработки для трех вариантов минимальной глубины проплавления. Выполнено сравнение параметров, полученных в результате оптимизации с использованием алгоритма MOGA, и параметров, полученных в результате конечно-элементного моделирования. Максимальная относительная погрешность результатов при определении максимальных температур не превысила 1 %, при определении максимальных глубин проплавления – 6 %.

Ключевые слова: лазерная обработка, оптимизация, MOGA, ANSYS

Для цитирования: Оптимизация обработки стали 12X18H9T кольцевыми лазерными пучками / Г. А. Баевич [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 3. С. 186–192. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-186-192>

Optimization of 12X18H9T-Steel Processing by Ring Laser Beams

G. A. Bayevich¹⁾, Yu. V. Nikitjuk¹⁾, V. N. Myshkovets¹⁾, A. V. Maximenko¹⁾,
I. Yu. Aushev²⁾

¹⁾Francisk Skorina Gomel State University (Gomel, Republic of Belarus),

²⁾University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Using the MOGA genetic algorithm built into the DesignXplorer module of the ANSYS Workbench program, optimization of laser processing of 12X18H9T-steel by annular beams has been performed. The calculation of temperature fields has been carried out taking into account the dependence of the thermophysical properties of the material on temperature

Адрес для переписки

Баевич Георгий Александрович
Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины
ул. Советская, 104,
246028, г. Гомель, Республика Беларусь
Тел.: +375 232 50-38-31
baevich@gsu.by

Address for correspondence

Bayevich Georgiy A.
Francisk Skorina Gomel State University
104, Sovetskaya str.,
246028, Gomel, Republic of Belarus
Tel.: +375 232 50-38-31
baevich@gsu.by

by the finite element method in the ANSYS Workbench program. A regression model has been obtained for processing 12X18H9T-steel by annular laser beams using a face-centered variant of the central compositional plan of the experiment. The power density and duration of laser radiation pulses, the outer and inner diameters of the laser beam in the processing plane were used as variable factors. The penetration depths of the material and the maximum temperatures in the laser processing zone were used as responses. The influence of processing parameters on the penetration depths of the material in the laser impact zone and the maximum temperature values has been evaluated. It has been established that the depth of penetration of the material and the maximum temperatures are most affected by the power density of laser radiation. Optimization of laser processing of 12X18H9T-steel by annular beams was carried out by setting the limiting values of the maximum temperature in the processing zone for three variants of the minimum penetration depth. The parameters obtained as a result of optimization using the MOGA algorithm and the parameters obtained as a result of finite element modeling are compared. The maximum relative error of the results when determining the maximum temperatures did not exceed 1 % and when determining the maximum penetration depths did not exceed 6 %.

Keywords: laser processing, optimization, MOGA, ANSYS

For citation: Bayevich G. A., Nikitjuk Yu. V., Myshkovets V. N., Maximenko A. V., Aushev I. Yu. (2023) Optimization of 12X18H9T-Steel Processing by Ring Laser Beams. *Science and Technique*. 22 (3), 186–192. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-186-192> (in Russian)

Введение

В настоящее время широкое распространение получила лазерная обработка материалов, так как применение лазерного излучения более эффективно по сравнению с использованием других высокоэнергетических источников энергии. Лазерная обработка обеспечивает локальность физических процессов, протекающих в зоне термического влияния при отсутствии значительных деформаций и напряжений в зоне воздействия излучения и сохранении физико-механических свойств исходного материала [1]. При этом использование пучков кольцевого сечения в ряде случаев способствует повышению эффективности лазерной обработки за счет оптимизации соответствующих технологических параметров, в том числе генетических алгоритмов [2–8]. Генетические алгоритмы обеспечивают поиск лучших решений при помощи наследования и усиления полезных свойств множества объектов в процессе имитации естественного отбора [9, 10]. Один из эффективных генетических алгоритмов – Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) [11].

Основной характеристикой, определение которой позволяет оптимизировать параметры лазерной обработки, является температурное поле, формируемое в материале при воздействии лазерного излучения. В настоящее время для расчета температурных полей при моделировании процессов лазерной обработки широко применяется комплекс конечно-элементного анализа ANSYS [12].

В данной работе выполнена оптимизация с использованием генетического алгорит-

ма MOGA модуля DesignXplorer программы ANSYS Workbench параметров обработки стали 12X18H9T кольцевыми лазерными пучками.

Конечно-элементный анализ

В программе ANSYS Workbench проведено конечно-элементное моделирование по определению температурного поля в пластинах с геометрическими размерами $2 \times 2 \times 0,5$ мм [12]. Сформирована модель, состоящая из 17294 элементов и 73546 узлов (рис. 1).

При моделировании учтены температурные зависимости теплофизических свойств стали 12X18H9T [13]. Зависимость теплового потока от времени задавалась в виде импульсов прямоугольной формы [14].

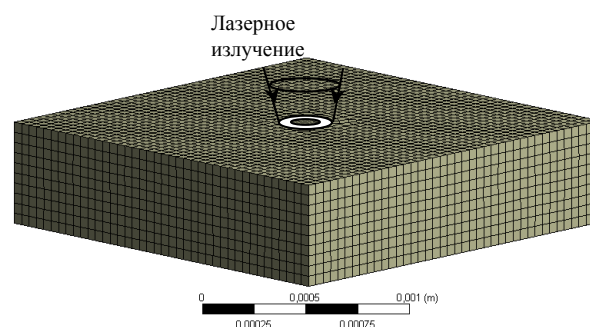


Рис. 1. Конечно-элементная модель

Fig. 1. Finite element model

Верификация конечно-элементной модели выполнена с применением экспериментальных данных, полученных с использованием импульсного YAG:Nd³⁺-лазера, работающего в режиме свободной генерации, и тепловизора ИТ-3СМ при воздействии на материал круг-

лого лазерного пучка (рис. 2). При этом относительная ошибка при определении максимальных температур на поверхности образца не превысила 5 %.

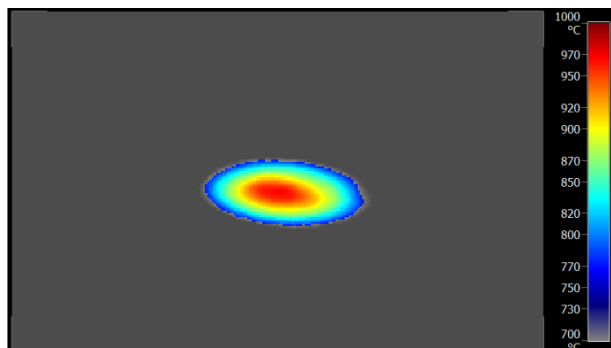


Рис. 2. Распределение температурного поля при воздействии круглого лазерного пучка, определенное экспериментально

Fig. 2. Temperature field distribution under the action of a circular laser beam, determined experimentally

Распределение температурных полей в образце из стали 12X18H9T при обработке лазерным пучком кольцевого сечения с внешним диаметром $D_1 = 300$ мкм и внутренним диаметром $D_2 = 125$ мкм в плоскости обработки при длительности импульсов лазерного излучения $t = 5,5$ мс и плотности мощности лазерного излучения $P_0 = 5,5 \cdot 10^8$ Вт/м² представлено на рис. 3.

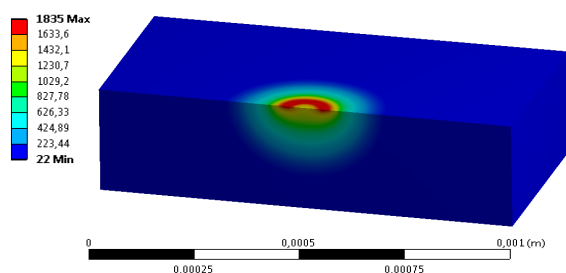


Рис. 3. Расчетное распределение температурного поля при воздействии кольцевого лазерного пучка, °C

Fig. 3. Estimated distribution of the temperature field under exposure of ring laser beam, °C

Определение оптимальных параметров обработки стали 12X18H9T кольцевыми пучками

Оптимизация параметров лазерной обработки стали 12X18H9T кольцевыми пучками выполнена в модуле DesignXplorer программы An-

sys Workbench в соответствии с последовательностью действий, представленных на рис. 4 [15].



Рис. 4. Алгоритм оптимизации лазерной обработки стали кольцевыми пучками

Fig. 4. Optimization algorithm for laser processing of steel with annular beams

При моделировании использован трехфакторный факторно-центральное композиционный план эксперимента [16–17]. В качестве факторов эксперимента использовались плотность мощности лазерного излучения P_0 , длительность импульсов лазерного излучения t , внешний диаметр лазерного кольцевого пучка D_1 и внутренний диаметр лазерного кольцевого пучка D_2 . В качестве откликов использовались максимальные температуры в зоне обработки T и глубины проплавления материала L (табл. 1).

Таблица 1

План эксперимента и результаты расчетов

Experiment plan and calculation results

P1 $P_0, 10^8 \text{ Вт/м}^2$	P2 $t, \text{ мс}$	P3 $D_1, \text{ мкм}$	P4 $D_2, \text{ мкм}$	P5 $L, \text{ мкм}$	P6 $T, ^\circ\text{C}$
5,5	5,5	275	125	13	1665
1	5,5	275	125	0	427
10	5,5	275	125	68	2868
5,5	5,5	250	125	4	1495
5,5	5,5	300	125	23	1835
5,5	1	275	125	0	1252
5,5	10	275	125	19	1769
5,5	5,5	275	100	21	1822
5,5	5,5	275	150	3	1494
1	1	250	100	0	322
10	1	250	100	24	2152
1	1	300	100	0	358
10	1	300	100	36	2457
1	10	250	100	0	452
10	10	250	100	81	3013
1	10	300	100	0	536
10	10	300	100	120	3695
1	1	250	150	0	266
10	1	250	150	9	1708
1	1	300	150	0	316
10	1	300	150	24	2102
1	10	250	150	0	360
10	10	250	150	42	2321
1	10	300	150	0	458
10	10	300	150	94	3072

Полученные уравнения регрессии имеют следующий вид:

$$Y_L = -4,488 \cdot 10^{-1} - 3,116 \cdot 10^{-8} P_0 + 1,558 \cdot 10^{-17} P_0^2 + 1,473 \cdot 10^{-10} P_0 D_1 + 1,635 \cdot 10^{-9} P_0 t - 1,233 \cdot 10^{-10} P_0 D_2;$$

$$L = (Y_L \cdot 0,64 + 1)^{1/0,64} - 1;$$

$$Y_T = 1,766 \cdot 10^1 + 6,370 \cdot 10^{-8} P_0 - 2,884 \cdot 10^{-17} P_0^2 - 1,404 \cdot 10^{-1} t^2 + 1,020 \cdot 10^{-10} P_0 D_1 + 8,429 \cdot 10^{-10} P_0 t - 1,429 \cdot 10^{-10} P_0 D_2 + 7,321 \cdot 10^{-3} D_1 t;$$

$$T = (Y_T \cdot 0,445 + 1)^{1/0,445} - 1.$$

Коэффициенты детерминации для выходных параметров L и T принимают значения, равные 0,9712 и 0,9973 соответственно, что можно интерпретировать как наличие необходимого соответствия регрессионной модели результатам конечно-элементного моделирования.

Была проведена оценка влияния входных параметров на выходные параметры. На максимальные температуры в зоне обработки T и глубины проплавления материала L влияют все факторы эксперимента, при этом наибольшее воздействие оказывает плотность мощности лазерного излучения P_0 (рис. 5).

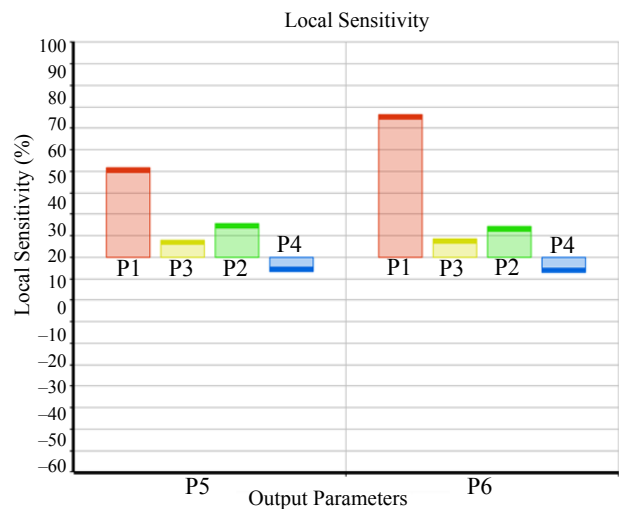


Рис. 5. Диаграмма чувствительности оптимизируемых параметров: P1 – P_0 , P2 – t , P3 – D_1 , P4 – D_2 , P5 – L , P6 – T

Fig. 5. Sensitivity diagram of optimized parameters: P1 – P_0 , P2 – t , P3 – D_1 , P4 – D_2 , P5 – L , P6 – T

Зависимости максимальной температуры в зоне обработки T и глубины проплавления материала L от плотности мощности лазерного излучения P_0 , длительности импульсов лазерного излучения t , внешнего диаметра кольцевого лазерного пучка D_1 и внутреннего диаметра кольцевого лазерного пучка D_2 представлены на рис. 6–7.

Оптимизация осуществлялась с использованием многокритериального генетического алгоритма MOGA, интегрированного в модуль DesignXplorer программы ANSYS Workbench с числом индивидов начальной популяции 100 и числом индивидов за итерацию 100.

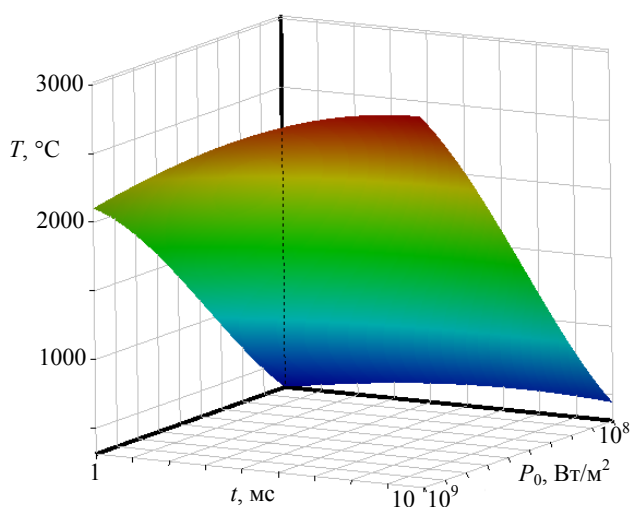


Рис. 6. Зависимость максимальной температуры T от параметров обработки

Fig. 6. Dependence of the maximum temperature T on processing parameters

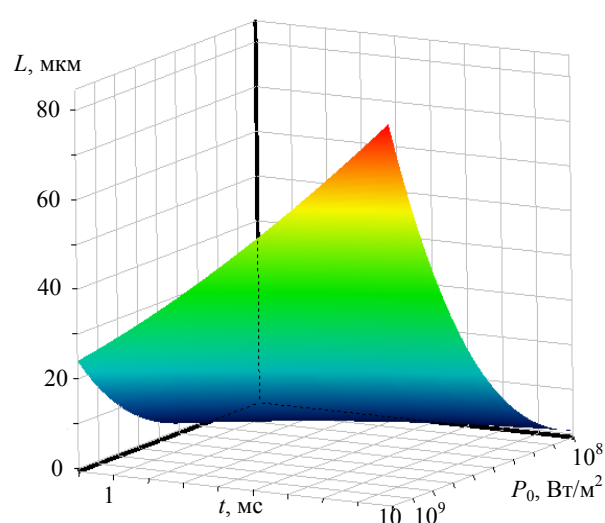


Рис. 7. Зависимость глубины проплавления материала L от параметров обработки

Fig. 7. Dependence of material penetration depth L on processing parameters

Оптимизацию лазерной обработки стали 12Х18Н9Т кольцевыми пучками выполняли при задании предельных значений максимальной температуры в зоне обработки для трех вариантов минимальной глубины проплавления $L = 50; 60; 70$ мкм (табл. 2). В скобках в табл. 2 приведены значения параметров, полученные в результате конечно-элементного расчета, при этом максимальная относительная погрешность результатов, полученных при использовании алгоритма MOGA, при определении максимальных температур не превысила 1 %; максимальных глубин проплавления – 6 %.

Таблица 2

Результаты оптимизации
Optimization results

P1 $P_0, 10^8 \text{ Вт/м}^2$	P2 $t, \text{ мс}$	P3 $D_1, \text{ мкм}$	P4 $D_2, \text{ мкм}$	P5 $L, \text{ мкм}$	P6 $T, ^\circ\text{C}$
8,6	2,9	296	125	50 (51)	2460 (2475)
7,3	9,6	294	138	60 (63)	2357 (2345)
7,9	9,3	286	129	70 (78)	2540 (2968)

ВЫВОДЫ

1. Выполнено моделирование обработки стали 12Х18Н9Т лазерными кольцевыми пуч-

ками с использованием конечно-элементной модели, верификация которой осуществлена на основе экспериментальных данных.

2. Построены регрессионные модели исследуемого процесса с применением трехфакторного факторно-центрованного варианта центрального композиционного плана численного эксперимента, установлено основное воздействие плотности мощности лазерного излучения на значения максимальных температур в зоне обработки и на глубину проплавления материала.

3. Показана возможность оптимизации параметров лазерной обработки стали с использованием генетического алгоритма MOGA модуля DesignXplorer программы ANSYS Workbench с максимальной относительной погрешностью результатов при определении максимальных температур не более 1 % и максимальных глубин проплавления не более 6 %.

4. В результате многокритериальной оптимизации установлены наборы параметров, использование которых на практике обеспечит эффективную реализацию процесса обработки стали 12Х18Н9Т кольцевыми лазерными пучками.

5. Результаты могут быть использованы при разработке и оптимизации технологических режимов импульсной лазерной сварки и наплавки сталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 664 с.
2. Термоупругие поля в твердых телах при их обработке лазерными пучками специальной геометрии / Б. В. Бокунь [и др.]. Минск, 1987. 59 с. (Препринт / Ин-т физики АН БССР).
3. Установка для лазерной обработки кольцевым пучком: пат. № 235 Респ. Беларусь: МПК В 23К 26/00 / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, С. В. Шалупаев, И. М. Каморников, Ю. В. Никитюк. Опубл. 03.30.01.
4. Перестраиваемые кольцевые световые поля и их возможности для лазерной обработки материалов / С. В. Солоневич [и др.] // Взаимодействие излучений с твердым телом = Interaction of Radiation with Solids: материалы 9-й Междунар. конф., Минск, 20–22 сент. 2011 г. Минск, 2011. С. 451–452.
5. Максименко, А. В. Импульсная лазерная наплавка конструкционных сталей кольцевыми пучками / А. В. Максименко, В. Н. Мышковец, П. С. Шаповалов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. 2010. № 4. С. 63–68.

6. Бессмельцев, В. П. Оптимизация режимов лазерной микрообработки / В. П. Бессмельцев, Е. Д. Булушев // Автометрия. 2014. Т. 50, № 6. С. 3–21.
7. Parandoush, P. A Review of Modeling and Simulation of Laser Beam Machining / P. Parandoush, A. Hossain // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2014. Vol. 85. P. 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2014.05.008>.
8. Nikityuk, Y. V. Optimization of Two-Beam Laser Cleavage of Silicate Glass / Y. V. Nikityuk, A. N. Serdyukov, I. Y. Aushev // Journal of Optical Technology. 2022. Vol. 89, № 2. P. 121–125. <https://doi.org/10.1364/jot.89.000121>.
9. Емельянов, В. В. Теория и практика эволюционного моделирования / В. В. Емельянов, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 432 с.
10. Красновская, С. В. Обзор возможностей оптимизационных алгоритмов при моделировании конструкций компрессорно-конденсаторных агрегатов методом конечных элементов / С. В. Красновская, В. В. Напрасников // Вестн. Нац. акад. Навук Беларусі. Сер. фізіка-тэхн. навук. 2016. № 2. С. 92–98.
11. Fonseca, C. Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation Discussion and Generalization / C. Fonseca, P. Fleming // In Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms. CA, USA. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 1993. P. 416–423.
12. Ansys [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.ansys.com/>.
13. Зиновьев, В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справочник / В. Е. Зиновьев. М.: Металлургия, 1989. 384 с.
14. Баевич, Г. А. Динамика формирования термических циклов при импульсной лазерной сварке и наплавке высокопрочных конструкционных сталей / Г. А. Баевич, А. В. Максименко, В. Н. Мышковец // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. 2016. № 1. С. 38–44.
15. Multi-Objective Optimization of Microstructure of Grayscale Cell Based on Response Surface Method / S. Wu [et al.] // Processes. 2021. Vol. 9, № 2. P. 1–15. <https://doi.org/10.3390/pr9020403>.
16. Моргунов, А. П. Планирование и анализ результатов эксперимента: учеб. Пособие / А. П. Моргунов, И. В. Ревина; М-во образования России, ОмГТУ. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 343 с.
17. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. М.: Наука. 1976. 278 с.

Поступила 07.10.2022

Подписана в печать 10.01.2023

Опубликована онлайн 31.05.2023

REFERENCES

1. Grigoryants A. G., Shiganov I. N., Misyurov A. I. (2006) *Technological Processes of Laser Processing*. Moscow,

- Bauman Moscow State Technical University, 664 (in Russian).
2. Bokut' B. V., Kondratenko V. S., Myshkovets V. N., Serdyukov A. N., Shalupaev S. V. (1987) *Thermoelastic Fields in Solids During their Processing by Laser Beams of Special Geometry. Preprint. B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus*. Minsk, 59 (in Russian).
3. Myshkovets V. N., Maximenko A. V., Shalupaev S. V., Kamornikov I. M., Nikityuk Yu. V. (2001) *Annular Beam Laser Processing Machine*. Patent No. 235 Republic of Belarus (in Russian).
4. Solonevich, S. V., Ryzhevich, A. A., Kazak, N. S., Al'-Mukhanna M. K., Al'-Khovaiter S. Kh., Al'-Saud T. S. M. (2011) Tunable Ring Light Fields and Their Possibilities for Laser Processing of Materials. *Vzaimodeistvie Izlucheni s Tverdym Telom: Materialy 9-i Mezhdunar. Konf., Minsk, 20–22 Sent. 2011 g. = Interaction of Radiation with Solids: Proceedings of the 9th International Conference, Minsk, September 20–22, 2011*. Minsk, 451–452 (in Russian).
5. Maximenko A. B., Myshkovets V. N., Shapovalov P. S. (2010) Pulsed Laser Cladding of Structural Steels with Annular Beams. *Vestnik GGTU im. P. O. Sukhogo = Bulletin Sukhoi State Technical University of Gomel*, (4), 63–68 (in Russian).
6. Bessmeltsev V. P., Bulushev E. D. (2014) Optimization of Laser Micromachining Regimes. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 50 (6), 533–548. <https://doi.org/10.3103/s8756699014060016>.
7. Parandoush P., Hossain A. (2014) A Review of Modeling and Simulation of Laser Beam Machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 85, 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.05.008>.
8. Nikityuk Y. V., Serdyukov A. N., Aushev I. Y. (2022) Optimization of Two-Beam Laser Cleavage of Silicate Glass. *Journal of Optical Technology*, 89 (2), 121–125. <https://doi.org/10.1364/jot.89.000121>.
9. Emelyanov V. V., Kureychik V. V., Kureychik V. M. (2003) *Theory and Practice of Evolutionary Modeling*. Moscow, Publishing House “FIZMATLIT”, 432 (in Russian).
10. Krasnovskaya S. V., Naprasnikov V. V. (2016) Overview of Optimization Algorithms at Finite Elements Modeling of Condensing Units Design. *Vestsi Natsyyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, (2), 92–98 (in Russian).
11. Fonseca C., Flemingz P. (1993) Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation Discussion and generalization. In *Proceedings of The 5th International Conference on Genetic Algorithms*. CA, USA. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 416–423.
12. Ansys. Available at: <https://www.ansys.com/>.
13. Zinoviev V. E. (1989) *Thermophysical Properties of Metals at High Temperatures*. Moscow, Metallurgiya Publ. 384 (in Russian).
14. Baevich G. A., Maximenko A. V., Myshkovets V. N. (2016) Dynamics of Thermal Cycles formation in Pulsed Laser Welding and Surfacing of High-Strength Structural steels. *Vestnik GGTU im. P. O. Sukhogo = Bulletin Sukhoi State Technical University of Gomel*, (1), 38–44 (in Russian).
15. Wu S., Xing J., Dong L., Zhu H. (2021) Multi-Objective Optimization of Microstructure of Gravure Cell Based on Response Surface Method. *Processes*, 9 (2), 403. <https://doi.org/10.3390/pr9020403>.
16. Morgunov A. P., Revina I. V. (2014) *Planning and Analysis of the Results of the Experiment*. Omsk, Publishing House of Omsk State Technical University, 343 (in Russian).
17. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovsky Yu. V. (1976) *Planning an Experiment in the Search for Optimal Conditions*. Moscow, Nauka Publ, 278 (in Russian).

Received: 07.10.2022

Accepted: 10.01.2023

Published online: 31.05.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-193-198>

УДК 688.1.037.97+666.271

Моделирование процесса формообразования стеклянных шариков по методу свободного притирания

Докт. техн. наук, проф. А. С. Козерук¹⁾, инж. А. А. Сухоцкий¹⁾,
кандидаты техн. наук, доценты М. И. Филонова¹⁾, В. И. Юринок¹⁾, В. О. Кузнецик¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Выполнено математическое моделирование обработки шариков по методу свободного притирания с помощью инструмента в виде полого тонкостенного цилиндра (инструментальные втулки). Получено аналитическое выражение для расчета путей резания, которые, согласно формуле Ф. Престона, пропорциональны величине съема материала с обрабатываемой заготовки. Проведен расчет путей резания в диаметральных сечениях шарика за время его поворота на суммарный угол 4000 рад. Расчет выполнен для различных значений таких наладочных параметров базового станка, как: амплитуды возвратно-вращательного движения устройства с закрепленными в нем инструментальными втулками, расстояния между осями симметрии инструментальных втулок и оси вращения устройства, скорости вращения входного звена исполнительного механизма базового станка и планшайбы, закрепленной на его шпинделе и служащей для сообщения заготовкам шариков относительного вращения. При этом рассматривали сечение с наибольшим расхождением путей резания и определяли относительное значение этих путей, которое пропорционально точности обработки. Выполнены исследования, позволившие выявить по меньшей мере три местоположения инструментальных втулок, в которых достигается минимальное значение относительных путей резания на обрабатываемой поверхности шарика, т. е. максимальная точность обработки, что дает возможность на практике совместить операции предварительного, основного и окончательного шлифования рассматриваемых деталей. Показано, что степень корреляции экспериментальных и теоретических результатов находится на уровне 80–85 %, а производительность полирования по предлагаемой схеме увеличивается примерно на 30 % в сравнении с классической схемой выполнения этой операции.

Ключевые слова: математическое моделирование, свободное притирание, стеклянные шарики, инструментальная втулка, режимы обработки, пути резания

Для цитирования: Моделирование процесса формообразования стеклянных шариков по методу свободного притирания / А. С. Козерук [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 3. С. 193–198. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-193-198>

Modeling of the Process of Shaping Glass Beads According to the Method of Free Lapping

A. S. Kozeruk¹⁾, A. A. Sukhotsky¹⁾, M. I. Filonova¹⁾, V. I. Yurinok¹⁾, V. O. Kuznechik¹⁾

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

Abstract. Mathematical modeling of the processing of balls by the method of free lapping using a tool in the form of a hollow thin-walled cylinder (tool bushings) has been performed. An analytical expression has been obtained for calculating the cutting

Адрес для переписки

Козерук Альбин Степанович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-74-91
kipp@bntu.by

Address for correspondence

Kozeruk Albin S.
Belarusian National Technical University
22, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-74-91
kipp@bntu.by

paths, which, according to the formula of F. Preston, are proportional to the amount of material removal from the workpiece being processed. The calculation of the cutting paths in the diametrical sections of the ball during its rotation by a total angle of 4000 radians was carried out. The calculation is performed for various values of such adjustment parameters of the base machine as the amplitude of the reciprocating rotational movement of the device with tool bushings fixed in it, the distance between the symmetry axes of the tool bushings and the axis of rotation of the device, the speed of rotation of the input link of the actuator mechanism of the base machine and a faceplate fixed on its spindle and serving to communicate relative rotation to the ball blanks. In this case, the section with the greatest divergence of cutting paths was considered and the relative value of these paths was determined, which is proportional to the accuracy of processing. Studies have been carried out that have made it possible to identify at least three locations of tool bushings, in which the minimum value of the relative cutting paths on the machined ball surface is achieved, i. e. maximum accuracy of processing, which makes it possible in practice to combine the operations of preliminary, main and final grinding of the parts under consideration. It is shown that the degree of correlation between experimental and theoretical results is at the level of 80–85 %, and the polishing performance according to the proposed scheme increases by about 30 % in comparison with the classical scheme for performing this operation.

Keywords: mathematical modeling, free grinding, glass beads, tool bushings, processing modes, cutting paths

For citation: Kozzeruk A. S., Sukhotsky A. A., Filonova M. I., Yurinok V. I., Kuznechik V. O. (2023) Modeling of the Process of Shaping Glass Beads According to the Method of Free Lapping. *Science and Technique*. 22 (3), 193–198. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-193-198> (in Russian)

Введение

Обработка стеклянных шариков для микрооптики на стадии финишного шлифования в настоящее время выполняется по схеме, включающей в себя установленную на шпинделе станка нижнюю планшайбу с листовой резиной и верхнюю планшайбу с коническими инструментальными лунками одинаковой глубины. В конические лунки верхней планшайбы помещают заготовки шариков и устанавливают ее на нижнюю планшайбу, которой сообщают относительное вращение, а верхней планшайбе – возвратно-вращательное перемещение относительно нижней [1]. В результате шарики совершают многоосное (трехосное) вращение относительно конических лунок. При этом по мере износа конической поверхности лунок происходит увеличение их площади контакта с заготовками шариков, что снижает точность обработки последних [2]. Во избежание отмеченной проблемы предлагается в качестве обрабатываемого инструмента использовать полый тонкостенный цилиндр [3]. Площадь контакта такого приработанного инструмента с шариком будет в виде шарового пояса постоянной ширины, и точность обработки становится стабильной. Причем эта точность зависит от толщины стенки инструментальной втулки – с уменьшением толщины точность повышается [4].

Моделирование закономерностей обработки

Предлагаемая технология шлифования и полирования шариков позволяет гибко и в широких пределах управлять интенсивностью съема

материала с заготовки посредством регулирования таких наладочных параметров технологического оборудования, как амплитуды L и скорости вращения входного звена исполнительного механизма технологического оборудования ω_2 , а также скорости вращения шпинделя станка (планшайбы) $\omega_{пл}$. При этом необходимо учитывать, что влияние каждого из перечисленных факторов как на производительность процесса, так и на качество обработки различно. Для выявления степени данного влияния на практике в настоящее время необходимо в каждом конкретном случае проводить большое количество трудоемких экспериментальных исследований, что не всегда возможно.

С целью решения отмеченной проблемы выполнено математическое моделирование процесса обработки шариков в условиях свободного притирания инструментов в виде полого цилиндра.

Определение закономерностей распределения путей резания $L_{рез}$ по сферической поверхности заготовки позволяет, согласно известной гипотезе Ф. Престона [5], оценить интенсивность и точность формообразования исполнительных поверхностей деталей по методу свободного притирания.

При определении $L_{рез}$ для произвольно выбранной точки M на сферической поверхности заготовки использовали формулу

$$L_{рез} = \sum_{k=0}^n \Delta l_k, \quad (1)$$

где Δl_k – путь резания, пройденный точкой M за время обработки Δt .

За время Δt шарик, вращающийся с абсолютной скоростью $\omega_{\text{ш}}$ вокруг своей мгновенной оси, повернется на угол $\Delta\varphi = \omega_{\text{ш}} \Delta t$ и произвольно выбранная точка M переместится в новую точку M' , удаленную от первоначальной на вектор $\Delta\vec{r}$. При малом шаге разбиения времени обработки величиной последнего можно заменить путь резания Δl_k в формуле (1), причем

$$\Delta r_x^2 + \Delta r_y^2 + \Delta r_z^2 = \left(2h \sin \frac{\Delta\varphi}{2} \right)^2, \quad (2)$$

где Δr_x , Δr_y , Δr_z – проекции вектора $\Delta\vec{r}$ в неподвижной системе координат (СК) $O_0X_0Y_0Z_0$ с началом в центре шарика O_0 (рис. 1); h – расстояние между вектором скорости $\vec{\omega}_{\text{ш}}$ и точкой M .

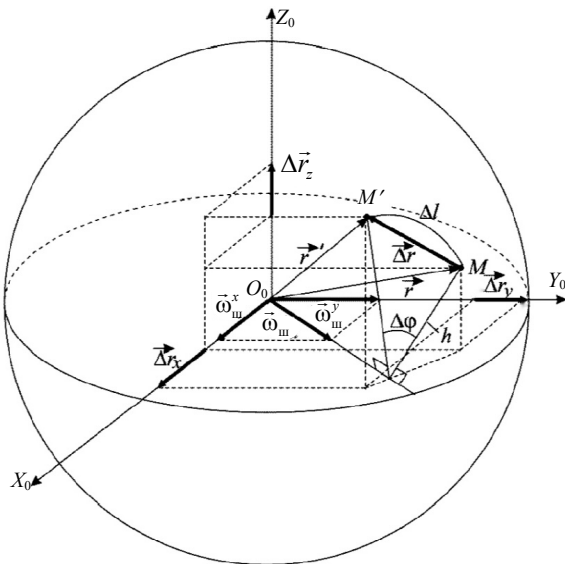


Рис. 1. Перемещение точки M за время Δt

Fig. 1. Moving point M in time Δt

Так как движение точки M происходит в плоскости, перпендикулярной вектору $\vec{\omega}_{\text{ш}}$, а $\Delta\vec{r}$ принадлежит ей, то $\vec{\omega}_{\text{ш}} \perp \Delta\vec{r}$ и, следовательно, скалярное произведение этих векторов равно нулю [6]:

$$\omega_{\text{ш}}^x \Delta r_x + \omega_{\text{ш}}^y \Delta r_y + \omega_{\text{ш}}^z \Delta r_z = 0, \quad (3)$$

где $\omega_{\text{ш}}^x$, $\omega_{\text{ш}}^y$, $\omega_{\text{ш}}^z$ – координаты вектора $\vec{\omega}_{\text{ш}}$ в СК $OX_0Y_0Z_0$, полученные с учетом сложного движения инструмента.

Как следует из анализа процесса обработки шарика по рассматриваемой схеме, он кон-

тактирует с планшайбой без проскальзывания (для обеспечения этого условия на планшайбу наклеивают листовую резину), и поэтому линейная скорость точки контакта шарика совпадает с линейной скоростью точки на планшайбе. Вращение шарика со скоростью $\vec{\omega}_{\text{ш}}$ обусловлено движением его отмеченной точки контакта относительно центра шарика со скоростью $\vec{v}$. Поэтому справедливо равенство: $\vec{v} = \vec{v}_{\text{пл}} - \vec{v}_{\text{и}}$, где $\vec{v}_{\text{и}}$ – вектор линейной скорости инструментальной втулки, обусловленный относительным и переносным ее вращением. С учетом отмеченного можно записать:

$$\begin{cases} \omega_{\text{ш}}^x = \frac{v_x}{R} = \frac{v_{\text{пл}} \sin \alpha_{\text{пл}} - v_{\text{и}} \sin \alpha_{\text{и}}}{R}; \\ \omega_{\text{ш}}^y = \frac{v_y}{R} = \frac{v_{\text{и}} \sin \alpha_{\text{и}} - v_{\text{пл}} \sin \alpha_{\text{пл}}}{R}; \\ \omega_{\text{ш}}^z = (1 - k_{\text{пл}}) \times \omega_{\text{пл}}, \end{cases} \quad (4)$$

где R – радиус обрабатываемого шарика; $k_{\text{пл}} = \frac{\omega_{\text{пл}}}{\omega_{\text{и}}}$;

v_x , v_y – проекции вектора $\vec{v}$ в СК $OXYZ$ с центром в точке O на оси вращения выходного звена исполнительного механизма (штан-ги) базового станка (рис. 2); $v_{\text{и}} = \sqrt{(X)^2 + (Y)^2 + (Z)^2}$ – линейная скорость инструмента, а координаты его оси симметрии в СК $OXYZ$ имеют вид:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\text{ш}} \cos \psi + R_{\text{и}} \cos(\varphi_{\text{и}} + \gamma); \\ L_{\text{ш}} \sin \psi + R_{\text{и}} \sin(\varphi_{\text{и}} + \gamma); \\ 0, \end{bmatrix} \quad (5)$$

причем $v_{\text{пл}} = \omega_{\text{пл}} \sqrt{(X - X_G)^2 + (Y)^2 + (Z)^2}$ – линейная скорость движения планшайбы в точке касания с шариком; $\alpha_{\text{пл}}$ и $\alpha_{\text{и}}$ – углы между векторами $\vec{v}_{\text{пл}}$, $\vec{v}_{\text{и}}$ и осью OX соответственно (рис. 2); X_G – расстояние между осями вращения штанги и планшайбы; $L_{\text{ш}}$ – длина штанги; ψ – угол ее отклонения от исходного положения; $R_{\text{и}}$ – расстояние от оси поводка 3 (рис. 3) до оси симметрии той или иной инструментальной втулки 5.

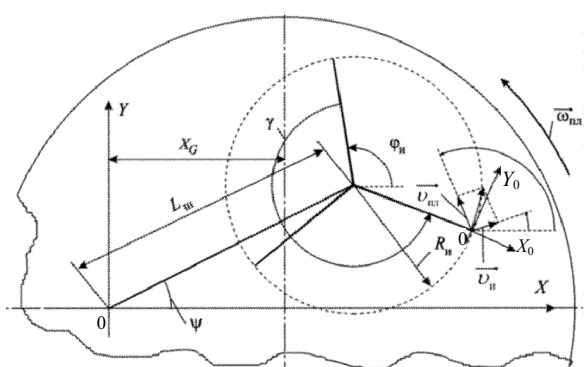


Рис. 2. К определению скоростей движения инструмента и планшайбы

Fig. 2. To determination of speeds of tool and faceplate movement

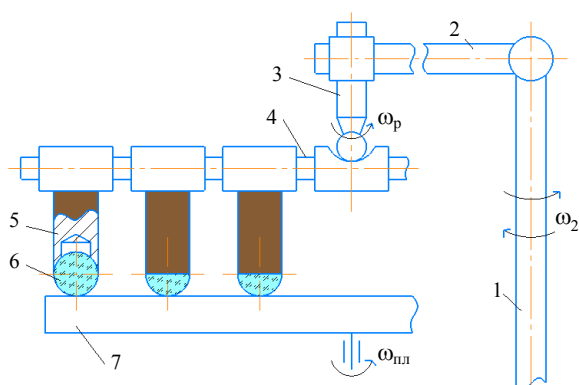


Рис. 3. Схема устройства для обработки шариков:
1 – вал привода, 2 – штанга, 3 – поводок, 4 – рычаг,
5 – инструментальная втулка, 6 – обрабатываемый шарик,
7 – планшайба

Fig. 3. Scheme of device for ball processing:
1 – drive shaft, 2 – rod, 3 – leash, 4 – lever,
5 – tool bushing, 6 – machined ball, 7 – faceplate

Поскольку точка M лежит на поверхности заготовки, можно записать

$$(\Delta r_x + M_x)^2 + (\Delta r_y + M_y)^2 + (\Delta r_z + M_z)^2 = R^2, \quad (6)$$

где M_x, M_y, M_z – координаты точки M в СК $OXYZ$, аналитические выражения для которых приведены в [3].

Совместное решение уравнений (2), (3) и (6) выполняли методом Ньютона – Канторовича (линеаризацией через разложение по формуле Тейлора) [7].

Поскольку

$$\vec{v}_M = \partial \vec{r} / \partial t, \quad (7)$$

а по векторной формуле Эйлера

$$\vec{v}_M = \vec{\omega}_M \times \vec{r}, \quad (8)$$

то

$$\partial \vec{r} = \vec{\omega}_M \times \vec{r} \times \partial t. \quad (9)$$

При малых значениях Δt формула (9) примет вид

$$\Delta \vec{r} \approx \vec{\omega}_M \times \vec{r} \times \Delta t. \quad (10)$$

Записав уравнение (10) в проекциях на оси СК $OXYZ$

$$\begin{bmatrix} \Delta r_x \\ \Delta r_y \\ \Delta r_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_M^x \times M_x \times \Delta t; \\ \omega_M^y \times M_y \times \Delta t; \\ \omega_M^z \times M_z \times \Delta t \end{bmatrix} \quad (11)$$

и определив $\Delta l_k = \Delta r = \sqrt{\Delta r_x^2 + \Delta r_y^2 + \Delta r_z^2}$, по формуле (1) можно рассчитать искомый путь резания $L_{рез}$.

Результаты исследования и их обсуждение

С использованием изложенной выше математической модели и схемы обработки, показанной на рис. 3, выполнен расчет путей резания $l_{рез}$ в диаметральных сечениях шарика диаметром 10 мм за время его поворота на суммарный угол 4000 рад. Расчет выполняли для различных значений отмеченных выше наладочных параметров процесса обработки, а именно: амплитуды L , расстояния R_n , скоростей ω_2 и $\omega_{пл}$. При этом рассматривали сечение с наибольшим расхождением путей резания (с наибольшей разностью между максимальным и минимальным значениями путей резания) и определяли относительное значение этих путей $\Delta l_{отн}$ по формуле [8]

$$\Delta l_{отн} = (l_{max} - l_{min}) / l_{max}, \quad (12)$$

которое пропорционально точности обработки (чем меньше $\Delta l_{отн}$, тем выше точность обработанного шарика).

Результаты расчетов $\Delta l_{отн}$ приведены на рис. 4.

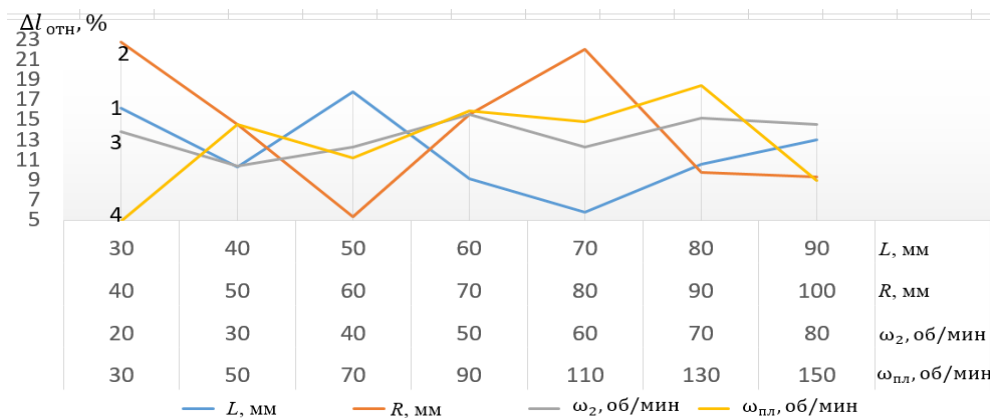


Рис. 4. Характер изменения относительных путей резания $\Delta l_{отн}$ в зависимости от L при $\omega_{пл} = 80$ об/мин, $\omega_2 = 50$ об/мин, $R = 70$ мм (1); R при $\omega_{пл} = 80$ об/мин, $\omega_2 = 50$ об/мин, $L = 55$ мм (2); ω_2 при $\omega_{пл} = 80$ об/мин, $R = 70$ мм, $L = 55$ мм (3); $\omega_{пл}$ при $\omega_2 = 50$ об/мин, $R = 70$ мм, $L = 55$ мм (4)

Fig. 4. Nature of the change in relative cutting paths Δl_{re} depending on L at $\omega_{fac} = 80$ rpm, $\omega_2 = 50$ rpm, $R = 70$ mm (1); R at $\omega_{fac} = 80$ rpm, $\omega_2 = 50$ rpm, $L = 55$ mm (2); ω_2 at $\omega_{fac} = 80$ rpm, $R = 70$ mm, $L = 55$ mm (3); ω_{fac} at $\omega_2 = 50$ rpm, $R = 70$ mm, $L = 55$ mm (4)

Из анализа рис. 4 следует, что изменение значений рассматриваемых наладочных параметров процесса обработки существенно влияет на распределение путей резания по поверхности шарика, т. е. на его точность, которые принимают ряд экстремальных (максимальных и минимальных) значений. Этот результат представляет особый интерес для практики. Например, характер зависимости $\Delta l_{отн}$ от изменения расстояния R (кривая 2 на рис. 4) имеет три минимальных значения: 6,7, 9,3 и 9,8 % для $R = 60; 100; 90$ мм соответственно. Это значит, что если использовать рабочую часть инструментальных втулок 7 (рис. 3) в виде алмазозносных участков разной зернистости (например, 50/40, 40/28 и 20/14 на металлической связке), то можно организовать совмещение операций грубого (предварительного), среднего (основного) и мелкого (окончательного) шлифования шариков в одной технологической операции, поместив заготовки в инструментальные втулки, находящиеся на различных расстояниях R от оси поводка 3 (в нашем случае 60, 100 и 90 мм).

Для проверки степени корреляции результатов теоретических и экспериментальных исследований выполнили шлифование шариков диаметром 10 мм из оптического стекла марки К8 в три перехода абразивной суспензией микропорошков М28, М20 и М10 концентрации Т:Ж = 1:5 (Т – твердая фаза (абразивный порошок), Ж – жидкая фаза (вода)), как это принято в технологии обработки оптических деталей [9]. В качестве инструментальных втулок использовали полые латунные цилиндры диаметром 10 мм с толщиной стенки 1 мм. Шли-

фование выполняли на серийном рычажном станке мод. 3ШП-350 с закрепленной на его шпинделе планшайбой диаметром 350 мм с наклеенной листовой резиной на рабочей поверхности. Поскольку коэффициент трения стекла о резину больше, чем стекла о металл [10], в процессе обработки обеспечивается гарантированное многоосное (трехосное) вращение шарика относительно инструментальной втулки без его проскальзывания по планшайбе.

Продолжительность шлифования каждым номером абразива составляла 12 мин при $L = 55$ мм, $\omega_{пл} = 80$ об/мин, $\omega_2 = 50$ об/мин и силе прижима устройства 20 Н. Обработка проводилась по схеме, приведенной на рис. 3, при расположении инструментальных втулок на каждом звене на расстоянии $R = 40; 60; 80$ мм. Такое положение втулок соответствовало экстремальным точкам кривой 2 на рис. 4, в частности при первом и третьем значениях R имеет место максимальное значение $\Delta l_{отн}$, равное соответственно 22,8 и 22 % (минимальная точность шарика), а во втором случае – минимальное, равное 5,4 % (максимальная точность шарика).

Точность обработки определяли по результатам измерения диаметра шарика в различных диаметральных сечениях. Измерения выполняли с помощью вертикального оптиметра, снабженного специальным устройством. Получены следующие результаты: $\pm 1,8$, ± 1 и $\pm 1,5$ мкм для шариков, находившихся в процессе обработки в инструментальных втулках на расстоянии $R = 40; 60; 80$ мм соответственно, т. е. несовпадение точности обработки шариков на двух крайних расстояниях R составляло 20 %, а для теоре-

тических расчетов этот показатель находится в пределах 4 % ($\Delta l_{\text{отн}} = 22,8$ % для $R = 40$ мм и $\Delta l_{\text{отн}} = 22$ % для $R = 80$ мм). На основании этих результатов можно заключить, что степень совпадения теоретических и экспериментальных результатов находится на уровне 80–85 %.

Выполнили также полирование шариков диаметром 10 мм по рассмотренной выше схеме. Использовали инструментальные втулки с пенополиуретановой рабочей частью. В качестве полирующей суспензии служил полирит с водой концентрации Т:Ж = 1:10. Режимы обработки назначали те же, что и на стадии шлифования, уменьшив силу прижима устройства до 15 Н. Результаты обработки: детали отполировались за 40 мин, что в среднем на 30 % быстрее в сравнении с классической схемой полирования, основанной на использовании двух соосно установленных смоляных полировальников в виде планшайб с проточенными с одной установки канавками для шариков. При этом один из полировальников закреплен на шпинделе станка и в процессе обработки вращается, а второй установлен неподвижно и прижимается к шарикам, расположенным в канавке нижнего полировальника.

ВЫВОДЫ

1. Разработанная математическая модель и выполнение численных исследований на ее основе позволяют выявить по меньшей мере три местоположения обрабатывающих инструментов (инструментальных втулок), в которых достигается минимальное значение относительных путей резания, т. е. максимальная точность обработки, что дает возможность совместить операции предварительного, основного и окончательного шлифования.

2. Проведенные исследования показали, что степень корреляции экспериментальных и теоретических результатов находится на уровне 80–85 %, а производительность полирования по предлагаемой схеме увеличивается примерно на 30 % в сравнении с классической схемой выполнения этой операции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология оптических деталей / М. Н. Семибратов [и др.]. М.: Машиностроение, 1978. 415 с.
2. Зубаков, В. Г. Технология оптических деталей / В. Г. Зубаков, М. Н. Семибратов, С. К. Штандель; под ред. М. Н. Семибратова. М.: Машиностроение, 1985. 368 с.
3. Козерук, А. С. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов на основе математического моделирования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01, 05.02.08 / А. С. Козерук. Минск, 1997. 317 с.

4. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1997. 176 с.
5. Preston, E. W. The Theory and Design Plate Glass Polishing Machines / E. W. Preston // Journal of the Society Technology. 1927. No 11. P. 214–256.
6. Филонов, И. П. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов / И. П. Филонов, Ф. Ф. Климович, А. С. Козерук. Минск: ДизайнПРО, 1995. 208 с.
7. Математика для инженеров: в 2 т. / С. А. Минюк [и др.]; под общ. ред. Н. А. Микулика. Минск: ООО «Элайда», 2006. Т. 2. 496 с.
8. Технологические особенности процесса одновременной двусторонней обработки высокоточных линз малой жесткости / А. С. Козерук [и др.] // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 3. С. 215–224. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-215-224.
9. Бардин, А. Н. Технология оптического стекла / А. Н. Бардин. М.: Высш. шк., 1963. 519 с.
10. Сулим, А. В. Производство оптических деталей / А. В. Сулим. М.: Высш. шк., 1969. 304 с.

Поступила 21.01.2023

Подписана к печати 28.03.2023

Опубликована онлайн 31.05.2023

REFERENCES

1. Semibratov M. N., Zubakov V. G., Shtandel' S. K., Kuznetsov S. M., Dushin E. M., Chebotareva L. P., Yakubovskii S. V., Matveenko L. I., Fradlin B. N., Pogrebyskii I. B., Blyumin I. D., Grigor'yan A. T., Pogrebyskii I. B. (1978) *Technology of Optical Parts*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 415 (in Russian).
2. Zubakov V. G., Semibratov M. N., Shtandel S. K. (1985) *Technology of Optical Parts*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 368 (in Russian).
3. Kozeruk A. S. (1997) *Control of Shaping of Precision Surfaces of Machine and Instrument Parts Based on Mathematical Modeling*. Minsk. 317 (in Russian).
4. Kozeruk A. S. (1997) *Shaping of Precision Surfaces*. Minsk, VUZ-UNITI Publ. 176 (in Russian).
5. Preston E. W. (1927) The Theory and Design Plate Glass Polishing Machines. *Journal of the Society Technology*, (11), 214–256.
6. Filonov I. P., Klimovich F. F., Kozeruk A. S. (1995) *Control of Shaping of Precision Surfaces of Machine and Devices*. Minsk, DesignPRO Publ. 208 (in Russian).
7. Minyuk S. A., Berezkina N. S., Metel'skii A. V., Goncharova M. N., Mikulik N. A. (2006) *Mathematics for Engineers. Vol. 2*. Minsk, Elaida Publ. 496 (in Russian).
8. Kozeruk A. S., Filonov I. P., Filonova M. I., Vlasovet N. S., Malpika D. L. (2017) Technological Distinctive Features Pertaining to Process of Simultaneous Two-Sided Machining of High-Precision Lenses Having Low Stiffness. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (3), 215–224. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-215-224> (in Russian).
9. Bardin A. N. (1963) *Optical Glass Technology*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 519 (in Russian).
10. Sulim A. V. (1969) *Production of Optical Parts*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 304 (in Russian).

Received: 21.01.2023

Accepted: 28.03.2023

Published online: 31.05.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-199-207>

УДК 621.793

Современные тенденции в повышении функциональных свойств внутрисосудистых эндопротезов

Асп. П. А. Августовский¹⁾, канд. техн. наук В. М. Комаровская¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Сердечно-сосудистые заболевания, в частности ишемическая болезнь сердца, являются самой частой причиной смерти в мире. Поиск наиболее эффективного способа лечения представляется передовой задачей. Стентирование выступает малоинвазивным действенным способом ее решения. Сразу же с появлением эндопротезов (стентов) возникла проблема повторного сужения сосудов (рестеноза) вследствие неоинтимальной гиперплазии (избыточное нарастание внутренней оболочки сосуда), причинами которой являются высвобождения ионов металлов из материала стента, повреждение стенки артерии при имплантировании, аллергические реакции. Изначально решение пытались найти посредством поиска оптимальной конструкции и материала стента, о чем свидетельствует выпуск более пяти-сот моделей внутрисосудистых эндопротезов, различающихся конструкцией, материалом, геометрической формой, профилем, габаритными размерами и другими параметрами. В настоящее время наиболее эффективным способом решения проблем биосовместимости материалов стентов является формирование покрытий на их поверхности. Можно выделить целый ряд разнообразных внутрисосудистых эндопротезов с модифицируемыми покрытиями: выделяющие лекарственные вещества, с биodeградируемыми покрытиями, с биоактивными покрытиями. В статье представлены результаты анализа литературных источников наиболее передовых исследований в области модификации поверхности внутрисосудистых эндопротезов, которые позволили обосновать выбор покрытия из оксинитрида титана как рекомендованного для дальнейшей оптимизации и применения благодаря высоким показателям по коррозионной стойкости, биосовместимости с клетками, тканями и жидкостями человеческого организма, хорошему уровню адгезии. В то же время существует ряд ограничивающих факторов, связанных с получением таких покрытий даже при выдерживании всех конструкционных и технологических требований.

Ключевые слова: внутрисосудистые эндопротезы, стенты, рестеноз, гиперплазия неоинтимы, коррозионная стойкость, биосовместимость, модифицируемые покрытия, лекарственные покрытия, биоактивные покрытия, оксинитрид титана

Для цитирования: Августовский, П. А. Современные тенденции в повышении функциональных свойств внутрисосудистых эндопротезов / П. А. Августовский, В. М. Комаровская // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 3. С. 199–207. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-199-207>

Current Trends in Improving Functional Properties of Intravascular Endoprostheses

P. A. Avgustovsky, V. M. Komarovskaya¹⁾

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

Abstract. Cardiovascular diseases, and in particular, coronary heart disease are the most common cause of death worldwide. Finding the most effective method of treatment seems to be an advanced task. Stenting is a minimally invasive effective way to solve this problem. Immediately with the advent of endoprostheses (stents), there was a problem of repeated vasoconstriction (restenosis) due to neointimal hyperplasia (excessive build-up of the inner shell of the vessel), the causes of which are the release of metal ions from the stent material, damage to the artery wall during implantation, allergic reactions. Initially,

Адрес для переписки

Августовский Павел Александрович
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 304-88-48
avgustovsky.pavel@gmail.com

Address for correspondence

Avgustovsky Pavel A.
Belarusian National Technical University
9, B. Hmelnitzkogo str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 304-88-48
avgustovsky.pavel@gmail.com

they tried to find a solution by searching for the optimal design and material of the stent, as evidenced by the release of more than five hundred models of intravascular endoprostheses differing in design, material, geometric shape, profile, overall dimensions and other parameters. Currently, the most effective way to solve the problems of biocompatibility of stent materials is the formation of coatings on the surface of stents. It is possible to distinguish a number of different intravascular endoprostheses with modifiable coatings: secreting medicinal substances, with biodegradable coatings, with bioactive coatings. The paper presents the results of the analysis of the literature sources of the most advanced research in the field of surface modification of intravascular endoprostheses, which allowed to justify the choice of titanium oxynitride coating as recommended for further optimization and application due to high corrosion resistance, biocompatibility with cells, tissues and fluids of the human body, a good level of adhesion. At the same time there are a number of limiting factors associated with obtaining such coatings while maintaining all structural and technological requirements.

Keywords: intravascular endoprostheses, stents, restenosis, neointima hyperplasia, corrosion resistance, biocompatibility, modifiable coatings, medicinal coatings, bioactive coatings, titanium oxynitride

For citation: Avgustovsky P. A., Komarovskaya V. M. (2023) Current Trends in Improving Functional Properties of Intravascular Endoprostheses. *Science and Technique*. 22 (3), 199–207. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-199-207> (in Russian)

Введение

Заболевания сердечно-сосудистой системы являются самой частой причиной смерти в мире. Коронарное шунтирование и стентирование коронарных артерий – хирургические операции, в результате которых происходит более быстрое и резкое восстановление протока артерии [1]. Эндопротезы (стенты) коронарных артерий были впервые представлены в 1990-е гг. [2]. Стентирование – малоинвазивное вмешательство, что важно для пациентов из повышенной группы риска. Наблюдается тенденция увеличения операций стентирования в последние десятилетия на фоне относительного уменьшения количества операций коронарного шунтирования [3]. Это стало возможно благодаря научно-техническому прогрессу, обмену опытом на международном уровне, сотрудничеству и тесному взаимодействию специалистов различных областей науки и практики, что способствует решению все более сложных задач при поражении коронарных артерий [4].

Основная часть

В настоящее время произведено более пяти-сот моделей внутрисосудистых эндопротезов. Они различаются конструкцией, материалом, геометрической формой, профилем, габаритными размерами и др. Все эти параметры как по отдельности, так и в совокупности обеспечивают соответствие требованиям, которые предъявляются к внутрисосудистым эндопротезам. На основании исследований их практического применения для лечения пациентов можно сформулировать следующие требования к конструкции стентов:

приемлемая гибкость конструкции;
способность проходить извилистые участки;
допустимый профиль конструкции;
рентгеноконтрастность;
тромборезистентность;
гидродинамическая совместимость;
биосовместимость;
высокая расширяемость;
большая радиальная прочность;
круговая область действия;
небольшая площадь поверхности контакта.

Следует отметить, что не все параметры для одной конструкции стента можно улучшить одновременно, так как отдельные из них являются взаимоисключающими. Например, высокая радиальная жесткость влечет за собой снижение гибкости конструкции стента, а улучшение дизайна может вызвать ухудшение механических свойств материала. Таким образом, постоянно возникает проблема выбора компромисса, окончательное решение могут дать только сравнительные испытания с изделиями-аналогами, которые давно зарекомендовали себя в медицинской практике [5]. Перечисленные выше требования накладывают ограничения на выбор материалов, из которых могут быть изготовлены данные внутрисосудистые эндопротезы (нержавеющая сталь, тантал, сплавы кобальта и никель-титана (нитинола), титан [6] и с недавнего времени – сплавы магния и полимеров молочной кислоты).

При использовании голометаллического стента существует вероятность высвобождения ионов металлов из него, повреждение стенки артерии, что может вызвать аллергические реакции, неинтимальную гиперплазию (избы-

точное нарастание внутренней оболочки сосуда) и в итоге – рестеноз (повторное сужение сосуда в месте установки стента), увеличивающий вероятность возникновения тромбоза (рис. 1).

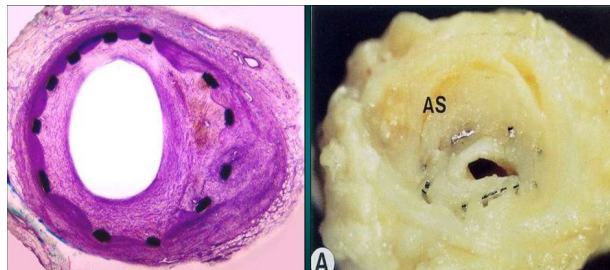


Рис. 1. Рестеноз стента

Fig. 1. Stent restenosis

На сегодняшний день наиболее эффективным способом решения проблем биосовместимости материалов стентов является формирование покрытий на их поверхности [7]. Можно выделить целый ряд разнообразных внутрисосудистых эндопротезов с модифицируемыми покрытиями: выделяющие лекарственные вещества, с биodeградируемыми покрытиями, с биоактивными покрытиями [8, 9].

Целостность покрытия играет важную роль в надежности и безопасности стент-устройства. Такие эффекты, как растрескивание, расслоение и отслоение покрытия стента, связаны с серьезным риском для здоровья, что объясняется распространением по сосудам человека мелких частей покрытия током крови. Эта проблема высвечивает острую потребность в адаптации конструкции стента для снижения вероятности механического повреждения покрытия и самого стента в целом. В связи с высокими механическими напряжениями важно учитывать участки наибольшей пластической деформации [10].

Для того чтобы предотвратить прогрессивный рост гиперплазии неоинтимы (в результате развивается рестеноз), могут применяться лекарства с противовоспалительной и противоопухолевой активностью (сиролимус, паклитаксел, зотаролимус, биолимус, эверолимус и другие препараты «лимус»-группы). Тем не менее в ходе исследований было выявлено, что формирование поздних рестенозов имело место при использовании внутрисосудистых эндопротезов с нанесенными на них вышеперечисленными

препаратами. Хроническое воспаление и аллергические реакции в месте имплантации стента – иммунный ответ на вмешательство. Решением данной проблемы может быть применение биосовместимых биodeградируемых полимеров для имплантации лекарственных препаратов на поверхность стентов, что позволяет снизить это отрицательное влияние [11].

Увеличение биосовместимости с тканями и жидкостями организма, а также снижение развития гиперплазии неоинтимы выявлены при комбинационном использовании таких полимеров, как поли-L-лизин и полиэтиленгликоль, в качестве покрытия голометаллических стентов в сравнении с внутрисосудистыми эндопротезами без покрытия, в то же время воспалительных или тромботических реакций обнаружено не было [12]. На нитиновых стентах с алмазоподобным углеродным покрытием был зафиксирован удовлетворительный антипролиферативный эффект, что позволило почти вдвое уменьшить процент рестенозов, вызванных гиперплазией неоинтимы [13].

Другим материалом, увеличивающим уровень биосовместимости и способствующим адгезии эндотелиальных клеток, является распространенный белок крови альбумин [14].

Удовлетворительные результаты показали экспериментальные исследования по заселению внутренней поверхности стентов эндотелиальными клетками [15]. Как итог, были получены данные, показывающие скорую реэндотелизацию, уменьшение гиперплазии неоинтимы и малое развитие рестенозов внутрисосудистых эндопротезов. Однако трудность заключается в том, что культивирование клеток на поверхности стентов является сложным и трудоемким процессом, доступным для реализации только в специализированных центрах [16].

Покрытия на основе оксинитрида титана (TiNO) являются наиболее перспективными для применения на сердечно-сосудистых стентах среди всех неорганических материалов. Физико-химические и биологические свойства пленки оксинитрида титана зависят от метода осаждения, концентрации оксида азота NO и примесей, включенных в покрытие [17]. Стенты с покрытием TiNO уменьшают адгезию и агрегацию тромбоцитов, связывание фибриногена, а также продемонстрировали лучшие ре-

зультаты в отношении потери массы, рестеноза и целевой васкуляризации [13, 18, 19]. Сообщается, что эти покрытия являются хорошим вариантом, который значительно уменьшает основные недостатки стентов из чистого металла: титан имеет лучшую биосовместимость, чем нержавеющая сталь, золото или другие материалы, которые использовались в качестве покрытия поверхности стента, поскольку он обеспечивает минимальное выделение токсичных ионов, следовательно, реакция тканей и воспалительный процесс будут уменьшены [18]; оксид титана улучшает совместимость стента с живыми клетками и кровью [13, 17]; присутствие азота в этой структуре снижает адгезию тромбоцитов и связывание фибриногена [17]. Покрытие TiNO также предотвращает миграцию никеля, молибдена, хрома или других металлов с поверхности нержавеющей стали, уменьшая воспаление и токсичность [20]. С ростом толщины пленки улучшается биосовместимость. В то же время более толстым покрытиям присуща низкая адгезия с основой, в результате повышается вероятность образования дефектов, ухудшается гемо- и гистосовместимость. Другим сдерживающим фактором широкого применения стентов с покрытием оксинитридом титана являются жесткие требования, предъявляемые к получаемому покрытию: высокая адгезионная и когезионная прочность, отсутствие несплошностей, дефектов, пор и трещин, минимальная шероховатость (не более 500 нм), а также толщина самого покрытия не должна превышать 5 мкм [21].

Покрытие внутренней поверхности стента снижает риск образования тромбов и повторного сужения кровеносных сосудов. Из-за неоднородности соотношения N–O можно получить покрытия с различными свойствами [22, 23]. Количество кислорода и азота в покрытии влияет на топографию поверхности, морфологию, а также на механические и биосовместимые свойства. Стенты становятся менее тромбогенными с увеличением содержания азота [24]. Изучение растворимости покрытий из оксинитрида титана свидетельствует об их низкой степени растворимости в солевом растворе (NaCl), высокой коррозионной стойкости и инертности [23]. Адсорбция альбумина и отложение солей, особенно фосфатов кальция [25, 26],

наблюдались в результате взаимодействия с имитируемыми жидкостями организма.

Авторы работ [22, 23] проводили сравнительные анализы эффективности внутрисосудистых эндопротезов из титана с покрытием из оксида азота и без него для лечения пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями. Выявили, что стенты с покрытием на практике хорошо себя зарекомендовали, при этом снизилась вероятность образования рестеноза до 50 % по сравнению со стентами без покрытия, так как наблюдается уменьшение роста гиперплазии неоинтимы. Высокая эффективность стентов с покрытием отмечается и в [22, 27, 28], при этом их противовоспалительный эффект сравним с противовоспалительным эффектом стентов с лекарственным покрытием. Внутрисосудистый эндопротез Titan из нержавеющей стали с покрытием из оксида азота, который производит компания Nexacath Company (Франция), на данный момент проходит клинические испытания. Промежуточные итоги показывают положительную динамику в виде снижения числа рестенозов по сравнению с голыми металлическими стентами [23, 25].

Авторы работы [29] в течение 18-месячного наблюдения зафиксировали значительно меньшую частоту возникновения первичной конечной точки в виде сердечной смерти, инфаркта миокарда или массивного кровотечения у двух групп пациентов с установленными стентами с покрытием TiNO (3,7 %) по сравнению с пациентами со стентами, выделяющими сиролimus (7,4 %), несмотря на то что группа пациентов, получивших стенты с покрытием из оксинитрида титана, была почти вдвое больше (989 против 502 соответственно).

В статье [30] сообщается, что покрытие из оксинитрида титана, сформированное при соотношении парциального давления газов в рабочей камере $p(\text{O}_2)/p(\text{N}_2)=1/3$ на металлических образцах, имеет наилучшую возможную гемо- и биосовместимость после контакта с искусственной биологической жидкостью в лабораторных условиях, за ним следует покрытие, изготовленное с соотношением $p(\text{O}_2)/p(\text{N}_2)=1/1$, далее – оксид титана TiO_2 , в самом конце – сталь. Данные результаты могут быть обусловлены: 1) антикоррозионными свойствами;

2) сохранением покрытием из оксинитрида титана отрицательного заряда поверхности; 3) меньшим приростом массы и толщины поверхностного слоя, связанного со скоростью процессов минерализации на межфазной границе раствор/твердое тело. Пагубное воздействие имитирующих биологических жидкостей на физико-химические свойства полученных покрытий (повышение шероховатости, уменьшение амплитуды или возврат отрицательного потенциала поверхности, резкий рост смачиваемости поверхности) надлежит принимать во внимание при создании оксидных и оксинитридных покрытий титана и возможного их применения как оптимальных биосовместимых материалов для внутрисосудистых эндопротезов.

Схожие результаты показали исследования [31]. Авторы, изучая различные соотношения парциального давления газов O_2 и N_2 в рабочей камере (1/2, 1/5 и 1/10), обнаружили, что образцы с соотношением $p(O_2)/p(N_2)=1/5$ имеют самую низкую адсорбцию белка и минимальное отложение солей из имитированных жидкостей организма. Они установили, что увеличение содержания азота в покрытии приводит к значительному снижению адсорбции альбумина и уменьшению скорости отложения солей из имитированных жидкостей организма. Замечено, что вариация соотношения $p(O_2)/p(N_2)$ влияет на морфологию поверхности. Поверхности с более высоким содержанием азота более гладкие, имеют меньший размер зерна и меньшую шероховатость по сравнению с поверхностями с низким содержанием азота.

Авторы работы [32] также проводили исследования по разработке покрытия на основе TiNO для стента с улучшенными характеристиками, по сравнению с основным материалом внутрисосудистого эндопротеза (нержавеющая сталь), при разных значениях соотношения парциального давления газов O_2 и N_2 в рабочей камере (1:2; 1:5 и 1:10). Полученные образцы погружали в искусственную жидкость организма с pH крови (7,4), содержащую альбумин, при нормальной температуре тела (36,5 °C) на 1, 3, 7, 14 и 28 дней. Наилучшие результаты получены для образцов с покрытием, сформированным при соотношении $p(O_2)/p(N_2)=1/1$,

где практически не происходило отложение белка и солей после 8 ч или только ограниченные отложения на участках, где возникало некоторое отслоение покрытия.

В [33] изложены результаты исследования коррозионной стойкости образцов из нержавеющей стали (AISI 304) и сравнения их с образцами с нанесенными на них катодно-дуговым методом покрытиями нитрида и оксинитрида титана, а также с образцами с бислойными покрытиями из комбинации двух вышеперечисленных. Все покрытия показали хорошую адгезионную прочность, величина критической нагрузки, при которой начиналось отслаивание, составляла более 30 Н. В основу испытаний на определение коррозионной стойкости был положен гравиметрический метод, позволяющий судить о процессах и скоростях коррозии, протекающих в различных агрессивных средах. Метод заключается в определении потери массы металла образцов за время их пребывания в агрессивных средах (электролит) с единицы поверхности металла образца под воздействием электрического тока. Скорость коррозии покрытия прямо пропорциональна величине плотности тока коррозии $i_{кор}$ [34], а низкое значение коррозионного потенциала $E_{кор}$ указывает на повышенную термодинамическую склонность материала к коррозии [35]. Следовательно, чем ниже значения $i_{кор}$ и выше $E_{кор}$, тем лучшей коррозионной стойкостью обладает исследуемое покрытие/материал [36, 37]. Все нанесенные поверхности показали снижение величин $i_{кор}$ вместе со сдвигом в положительную сторону значений $E_{кор}$, что свидетельствует об уменьшении скорости коррозии [38, 39] по сравнению с непокрытой подложкой. Численные значения всех покрытий представлены в табл. 1.

Таблица 1

Коррозионные параметры исследуемых образцов

Corrosion parameters of the studied samples

Материал покрытия	$i_{кор}$, mA/cm^2	$E_{кор}$, мВ
Нержавеющая сталь	14,689	34
TiN	7,734	101
TiNO	3,385	164
TiN-TiNO	3,723	126
TiNO-TiN	6,630	123

Как видно, наибольший электроположительный коррозионный потенциал продемонстрировал монослой TiNO, за которым следовали бислой TiN–TiNO, двухслойный TiNO–TiN, монослой TiN и подложка без покрытия.

Также интерес представляет динамика изменения показателей шероховатости исследуемых покрытий до и после проведения испытаний на коррозионную стойкость. Результаты отображены в табл. 2.

Таблица 2

Шероховатость поверхностей до и после испытаний
Surface roughness before and after testing

Материал покрытия	Средняя шероховатость R_a до испытания, нм	Средняя шероховатость R_a после испытания, нм
Нержавеющая сталь	50	1300
TiN	410	1350
TiNO	290	375
TiN–TiNO	305	375
TiNO–TiN	360	400

По сравнению с непокрытой подложкой все покрытия имели более высокие значения R_a до испытаний (в среднем в 5–8 раз). Сравнивая результаты, представленные в табл. 2, можно заметить, что шероховатость непокрытой подложки значительно увеличилась после коррозионных испытаний (более чем в 25 раз). Важно, что такая же тенденция была отмечена и у образцов с покрытием TiN. Небольшое увеличение шероховатости после испытаний обнаружено у остальных покрытий, в составе которых присутствовал O_2 . Это указывает на то, что добавление кислорода приводит к значительному снижению шероховатости поверхности из-за аморфизации покрытия (уменьшения размера зерна).

На основании результатов исследования коррозионной стойкости, адгезии и шероховатости покрытий можно сделать вывод, что наилучшим кандидатом в качестве биосовместимого покрытия является двухслойное покрытие TiN–TiNO из-за его хорошей адгезии (37 Н) к металлической подложке и превосходной коррозионной стойкости с параметрами, близкими к монослою TiNO.

Авторы статьи [40] провели исследование, результаты которого показывают, что стент с покрытием на основе оксинитрида титана является хорошим выбором для лечения острого коронарного синдрома с подъемом сегмента ST

с точки зрения как эффективности, так и безопасности по сравнению с последними стентами с лекарственным покрытием, и его можно использовать у пожилых пациентов и/или пациентов с высоким риском кровотечения, требующих меньшего времени двойной антитромбоцитарной терапии. Продолжительность двойной антитромбоцитарной терапии значительно меньше в группе биоактивного стента *Titan* со средним значением $6,46 \pm 4,11$ месяца по сравнению с группой стента *Endeavour* с лекарственным покрытием, которая в среднем составила $10,98 \pm 2,51$ месяца.

ВЫВОДЫ

1. Многообразие стентов, изготовленных из различных материалов, свидетельствует о высокой актуальности данной проблемы. Значительное количество исследований посвящено поиску наиболее эффективного материала для изготовления внутрисосудистых эндопротезов. Многие авторы научных и практических статей излагают свои предложения по решению данного вопроса и предоставляют экспериментальные данные об их доказанной эффективности.

2. Покрытия из оксинитрида титана за счет высоких качественных и эксплуатационных характеристик, а также хорошей биосовместимости с клетками и тканями организма человека являются эффективным способом увеличения функциональности и долговечности использования стентов по сравнению с основным материалом изделия, хотя и существует ряд ограничивающих факторов, связанных с получением таких покрытий даже при выдерживании всех конструкционных и технологических требований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шишкевич, А. Н. Эндоваскулярное лечение бифуркационного поражения коронарных артерий: дис. ... д-ра мед. наук: 14.01.26 / А. Н. Шишкевич. СПб., 2018. 203 л.
2. Karjalainen, P. P. Bioactive Stents for Percutaneous Coronary Intervention: A New Forerunner on the Track / P. P. Karjalainen, W. Namas // *Interventional Cardiology*. 2011. Vol. 3, № 5. P. 527–529. <https://doi.org/10.2217/ica.11.61>.
3. Percutaneous Coronary Intervention Using Drug-Eluting Stents Versus Coronary Artery Bypass Grafting for Unprotected Left Main Coronary Artery Stenosis: A Meta-Analysis of Randomized Trials / N. Nerlekar [et al.] // *Circ. Cardiovasc. Interv.* 2016. Vol. 9, No 12. P. 17–25. <https://doi.org/10.1161/circinterventions.116.004729>.

4. A Collaborative Systematic Review and Meta-Analysis on 1278 Patients Undergoing Percutaneous Drug-Eluting Stenting for Unprotected Left Main Coronary Artery Disease / G. G. Biondi-Zoccai [et al.] // *Am. Heart. J.* 2008. Vol. 155, No 2. P. 274–283. <https://doi.org/10.1016/j.ahj.2007.10.009>.
5. Современное поколение стентов с лекарственным покрытием: фокус на сиролимус-покрытый стент «Калипсо» / А. Н. Кудряшов [и др.] // *Патология кровообращения и кардиохирургия*. 2017. Т. 21, № 1. С. 37–43. <https://doi.org/10.21688/1681-3472-2017-1-37-43>.
6. Serruys, P.W. Handbook of Coronary Stents / P. W. Serruys, M. J. B. Kutryk; ed. by P. W. Serruys, B. J. Rensing. Second ed. London: Martin Dunitz, 1998. 343 p.
7. Покрытия на основе оксинитридов титана, осажденные методом реактивного магнетронного распыления: морфология поверхности и химический состав / Н. М. Иванова [и др.] // *Современные техника и технологии: сб. докл. / Нац. исслед. томский политех. ун-т; редкол.: О. В. Сидорова [и др.].* Томск, 2014. С. 327–328.
8. Evolution of Covered Stents in the Contemporary Era: Clinical Application, Materials and Manufacturing Strategies Using Nanotechnology / Y. Farhatnia [et al.] // *Biotechnol Adv.* 2013. Vol. 31, № 5. P. 524–542. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.12.010>.
9. Kabir, A. M. How Safe and how Good Are Drug-Eluting Stents? / A. M. Kabir, A. Selvarajah, A. M. Seifalian // *Future Cardiol.* 2011. Vol. 7, No 2. P. 251–270. <https://doi.org/10.2217/fca.11.1>.
10. Coronary stents: A Materials Perspective / G. Mani [et al.] // *Biomaterials*. 2007. Vol. 28, No 9. P. 1689–1710. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2006.11.042>.
11. Drug-Eluting Stents – What Should be Improved? / J. Steffel [et al.] // *Ann Med.* 2008. Vol. 40, No 4. P. 242–252. <https://doi.org/10.1080/07853890801964948>.
12. Polymer Stent Coating for Prevention of Neointimal Hyperplasia / M. Billinger [et al.] // *J. Invasive Cardiol.* 2006. Vol. 18, No 9. P. 423–427.
13. Comparison of Diamond-Like Carbon-Coated Nitinol Stents with or Without Polyethylene Glycol Grafting and Uncoated Nitinol Stents in a Canine Iliac Artery Model / J. H. Kim [et al.] // *Br. J. Radiol.* 2011. Vol. 84, No 999. P. 210–215. <https://doi.org/10.1259/bjr/21667521>.
14. Intravenous Administration of Acetylsalicylic Acid During Endovascular Treatment of Cerebral Aneurysms Reduces the rate of Thromboembolic Events / T. Ries [et al.] // *Stroke*. 2006. Vol. 37, No 7. P. 1816–1821. <https://doi.org/10.1161/01.str.0000226933.44962.a6>.
15. Development of a Novel Endothelial Cell-Seeded Endovascular Stent for Intracranial Aneurysm Therapy / W. Zhu [et al.] // *J. Biomed. Mater. Res A*. 2008. Vol. 85, No 3. P. 715–721. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.31592>.
16. Основные направления модификации поверхности металлических эндоваскулярных стентов в решении проблемы рестенозов (часть 1) / А. И. Лотков [и др.] // *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний*. 2017. № 1. С. 122–130. <https://doi.org/10.17802/2306-1278-2017-1-122-130>.
17. Blood Compatibility Improvement of Titanium Oxide Film Modified by Phosphorus Ion Implantation / P. Yang [et al.] // *Nucl. Instrum. Meth. B*. 2006. Vol. 242, No 1–2. P. 15–17. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2005.08.099>.
18. Synthesis and Blood Compatibility of Rutile-Type Titanium Oxide Coated LTI-Carbon / F. Zhang [et al.] // *Sci. China C. Life Sci.* 1998. Vol. 41, № 4. P. 400–405. <https://doi.org/10.1007/bf02882740>.
19. Pavanelli, W. R. The Role of Nitric Oxide in Immune Response Against Trypanosoma Cruzi Infection / W. R. Pavanelli, J. J. N. Silva // *J. Nitric. Oxide*. 2010. Vol. 2. P. 1–10. <https://doi.org/10.2174/1875042701002010001>.
20. The Role of Nitric Oxide on Endothelial Function / D. Tousoulis [et al.] // *Curr. Vasc. Pharm.* 2012. Vol. 10, No 1. P. 4–18. <https://doi.org/10.2174/157016112798829760>.
21. Августовский, П. А. Применение вакуумно-дугового испарения для нанесения покрытий на основе оксинитрида титана на артериальные стенты / П. А. Августовский; В. М. Комаровская // *Инженерно-педагогическое образование в XXI веке: материалы республ. науч.-практ. конф. молодых ученых и студ. (25–26 ноября 2021 г.) / редкол.: А. М. Маляревич [и др.].* Минск: БНТУ, 2021. С. 187–190.
22. Nitric Oxide: A Regulator of Cellular Function in Health and Disease / L. Sobrevia [et al.] // *Oxid Med. Cell Longev.* 2016. Vol. 2016. P. 1–2. <https://doi.org/10.1155/2016/9782346>.
23. Stent Coating with Titanium-Nitride-Oxide for Reduction of Neointimal Hyperplasia / S. Windecker [et al.] // *Circulation*. 2001. Vol. 104, No 8. P. 928–933. <https://doi.org/10.1161/hc3401.093146>.
24. Preclinical Evaluation of the Thrombogenicity and Endothelialization of Bare Metal and Surface-Coated Neurovascular Stents / S. Krajewskia [et al.] // *AJNR Am J Neuroradiol.* 2015. Vol. 36, No 1. P. 133–139. <https://doi.org/10.3174/ajnr.a4109>.
25. Stent-Based Delivery of Sirolimus Reduces Neointimal Formation in a Porcine Coronary Model / T. Suzuki [et al.] // *Circulation*. 2001. Vol. 104, No 10. P. 1188–1193. <https://doi.org/10.1161/hc3601.093987>.
26. Randomized Comparison of a Titanium-Nitride-Oxide-Coated Stent with a Stainless Steel Stent for Coronary Revascularization: the TiNOX Trial / S. Windecker [et al.] // *ACC Current Journal Review*. 2005. Vol. 14, Iss. 9. P. 43. <https://doi.org/10.1016/j.accreview.2005.08.233>.
27. One-Year Follow-Up after Percutaneous Coronary Intervention with Titanium-Nitride-Oxide-Coated Stents Versus Paclitaxel-Eluting Stents in Patients from Real-World Clinical Practice / C. C. Liu [et al.] // *Acta Cardiol. Sin.* 2011. Vol. 27, No 2. P. 94–100.
28. Efficacy and safety of TiNO-Coated Stents 1 Versus Drug-eluting Coronary Stents. Systematic Literature Review and Meta-Analysis / F. C. Daoud [et al.]. 2021. 25 p. (Preprint / medRxiv) <https://doi.org/10.1101/2020.12.19.20248564>.
29. Titanium-Nitride-Oxide-Coated Versus Everolimus-Eluting Stents in Acute Coronary Syndrome: The Randomized TIDES-ACS Trial / P. A. L. Tonino [et al.] // *JACC Cardiovasc Interventions*. 2020. Vol. 13, No 14. P. 1697–1705. <https://doi.org/10.1016/j.jcin.2020.04.021>.
30. Электрокинетические свойства, растворение In Vitro, потенциальная биосовместимость оксидных и оксинитридных пленок титана для сердечно-сосудистых стентов / И. А. Хлусов [и др.] // *Бюллетень сибирской медицины*. 2015. Т. 14, № 2. С. 55–66. <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2015-2-55-66>.
31. Surface Evaluation of Titanium Oxynitride Coatings used for Developing Layered Cardiovascular Stents / N. Beshchasna [et al.] // *Mat. Sci. Eng. C-Mater.* 2019. Vol. 99. P. 405–416. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.01.131>.
32. Titanium Oxynitride Coatings Deposited by Magnetron Sputtering for Improvement of Cardiovascular Stent Design / O. C. Duta [et al.] // *Conference: The 4th World Congress on New Technologies, Madrid, 19–21 August 2018. Madrid, 2018. P. 18–20. https://doi.org/10.11159/icnfa18.112*.

33. In Vitro Corrosion of Titanium Nitride and Oxynitride-Based Biocompatible Coatings Deposited on Stainless Steel / I. Pana [et al.] // *Coatings*. 2020. Vol. 10, No 8. P. 710–728. <https://doi.org/10.3390/coatings10080710>.
34. Velasco, L. Effect of Si Addition on the Structure and Corrosion Behavior of NbN thin Films Deposited by Unbalanced Magnetron Sputtering / L. Velasco, J. J. Olaya, S. E. Rodil // *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* 2016. Vol. 122, No 2. P. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s00339-016-9639-0>.
35. Zhang, X. G. *Corrosion and Electrochemistry of Zinc* / X.G. Zhang – New York: Springer, 1996. 474 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9877-7>.
36. Influence of Bias Voltage on the Microstructure, Mechanical and Corrosion Properties of AlSiN Films Deposited by HiPIMS technique / J. C. Ding [et al.] // *J. Alloy. Compd.* 2019. Vol. 772. P. 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.063>.
37. Mechanical, Tribological, and Biocompatibility Properties of ZrN–Ag Nanocomposite Films / Z. Kertzman [et al.] // *J. Biomed. Mater. Res. Part A*. 2008. Vol. 84, No 4. P. 1061–1067. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.31533>.
38. Exploring Graphene as a Corrosion Protection Barrier / N. T. Kirkland [et al.] // *Corros. Sci.* 2012. Vol. 56. P. 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.12.003>.
39. Ahmad, Z. *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control* / Z. Ahmad. Amsterdam: Elsevier, 2006. 673 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-5924-6.X5000-4>.
40. Comparison of Clinical Outcomes Regarding the use of Titanium-Nitride-Oxide-Coated Stents (Titan) Versus Zotarolimus-Eluting Stents (Endeavor) in Patients with ST-Segment Elevation Myocardial Infarction (STEMI): An Experience From a Cardiac Center-Third Care Level / C. E. Muñoz-Consuegra [et al.] // *Rev. Mex. Cardiol.* 2018. Vol. 29, No 1. P. 13–26.

Поступила 03.01.2023

Подписана к печати 14.03.2023

Опубликована онлайн 31.05.2023

REFERENCES

1. Shishkevich A. N. (2018) *Endovascular Treatment of Bifurcation Lesions of Coronary Arteries*. Saint-Petersburg, 203 (in Russian).
2. Karjalainen P. P., Namas W. (2011) Bioactive Stents for Percutaneous Coronary Intervention: A New Forerunner on the Track. *Interventional Cardiology*, 3(5), 527–529. <https://doi.org/10.2217/ica.11.61>.
3. Nerlekar N., Ha F. J., Verma K. P., Bennett M. R., Cameron J. D., Meredith I. T., Brown A. J. (2016) Percutaneous Coronary Intervention Using Drug-Eluting Stents Versus Coronary Artery Bypass Grafting for Unprotected Left Main Coronary Artery Stenosis: A Meta-Analysis of Randomized Trials. *Circulation: Cardiovascular Interventions*, 9 (12), 17–25. <https://doi.org/10.1161/circinterventions.116.004729>.
4. Biondi-Zoccai G. G., Lotrionte M., Moretti C., Meliga E., Agostoni P., Valgimigli M., Migliorini A., [et al.]. (2008) A Collaborative Systematic Review and Meta-Analysis on 1278 Patients Undergoing Percutaneous Drug-Eluting Stenting for Unprotected Left Main Coronary Artery Disease. *American Heart Journal*, 155 (2), 274–283. <https://doi.org/10.1016/j.ahj.2007.10.009>.
5. Kudryashov A. N., Trebushat D. V., Verin V. V., Vorob'ev V. L. (2017) Current Generation of Drug-Eluting Stents: Focus on Sirolimus-Coated Stent “Calypso”. *Patologiya*

- Krovoobrashcheniya i Kardiokhirurgiya = Circulatory Pathology and Cardiac Surgery*, 21 (1), 37–43. <https://doi.org/10.21688/1681-3472-2017-1-37-43> (in Russian).
6. Serruys P. W., Kutryk M. J. B., Rensing B. J. (ed.). (1998) *Handbook of Coronary Stents*. Second ed. London: Martin Dunitz. 343.
7. Ivanova N. M., Arysheva G. V., Konishchev M. E., Pichugin V. F. (2014) Coatings Based on Titanium Oxynitrides Deposited by Reactive Magnetron Sputtering: Surface Morphology and Chemical Composition. *Sovremennye Tekhnika i Tekhnologii: Sb. Dokl.* [Modern Equipment and Technologies: Collection of Reports]. Tomsk, National Research Tomsk Polytechnic University, 327–328 (in Russian).
8. Farhatnia Y., Tan A., Motiwala A., Cousins B. G., Seifalian A. M. (2013) Evolution of Covered Stents in the Contemporary Era: Clinical Application, Materials and Manufacturing Strategies Using Nanotechnology. *Biotechnology Advances*, 31 (5), 524–542. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.12.010>.
9. Kabir A. M., Selvarajah A., Seifalian A. M. (2011) How safe and How Good are drug-Eluting Stents? *Future Cardiology*, 7 (2), 251–270. <https://doi.org/10.2217/fca.11.11>.
10. Mani G., Feldman M. D., Patel D., Agrawal C. M. (2007) Coronary Stents: A Materials Perspective. *Biomaterials*, 28 (9), 1689–1710. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2006.11.042>.
11. Steffel J., Eberli F. R., Lüscher T. F., Tanner F. C. (2008) Drug-Eluting Stents – what Should be Improved? *Annals of Medicine*, 40 (4), 242–252. <https://doi.org/10.1080/07853890801964948>.
12. Billinger M., Buddeberg F., Hubbell J. A., Elbert D. L., Schaffner T., Mettler D., Windecker S., Meier B., Hess O. M. Polymer Stent Coating for Prevention of Neointimal Hyperplasia. *Journal of Invasive Cardiology*, 18 (9), 423–427.
13. Kim J. H., Shin J. H., Shin D. H., Moon M.-W., Park K., Kim T.-H., Shin K. M., Won Y. H., Han D. K., Lee K.-R. (2014) Comparison of Diamond-Like Carbon-Coated Nitinol Stents with or Without Polyethylene Glycol Grafting and Uncoated Nitinol Stents in a Canine Iliac Artery Model. *British Journal of Radiology*, 84 (999), 210–215. <https://doi.org/10.1259/bjr/21667521>.
14. Ries T., Buhk J. H., Kucinski T., Goebell E., Grzyska U., Zeumer H., Fiehler J. (2006) Intravenous Administration of Acetylsalicylic Acid During Endovascular Treatment of Cerebral Aneurysms Reduces the Rate of Thromboembolic Events. *Stroke*, 37 (7), 1816–1821. <https://doi.org/10.1161/01.str.0000226933.44962.a6>.
15. Zhu W., Tian Y., Zhou L. F., Wang Y., Song D., Mao Y., Yang G. Y. (2008) Development of a Novel Endothelial Cell-Seeded Endovascular Stent for Intracranial Aneurysm Therapy. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 85 (3), 715–721. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.31592>.
16. Lotkov A. I., Antonova L. V., Kashin O. A., Matveeva V. G., Kudryashov A. N. (2017) Surface Modification of Bare-Metal Stents for Preventing Restenosis (Part 1). *Complex Issues of Cardiovascular Diseases*, (1), 122–130. <https://doi.org/10.17802/2306-1278-2017-1-122-130> (in Russian).
17. Yang P., Leng Y. X., Zhao A. S., Zhou H. F., Xu L. X., Hong S., Huang N. (2006) Blood Compatibility Improvement of Titanium Oxide Film Modified by Phosphorus Ion Implantation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and*

- Atoms*, 242 (1–2), 15–17. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2005.08.099>.
18. Zhang F., Chen Y., Zheng Z., Huang N., Liu X., Chen A., Jiang Z. (1998) Synthesis and Blood Compatibility of Rutile-Type Titanium Oxide Coated LTI-Carbon. *Science in China Series C: Life Sciences*, 41 (4), 400–405. <https://doi.org/10.1007/bf02882740>.
 19. Pavanelli W. R., Silva J. J. N. (2010) The Role of Nitric Oxide in Immune Response Against Trypanosoma Cruzi Infection. *The Open Nitric Oxide Journal*, 2 (1), 1–10. <https://doi.org/10.2174/1875042701002010001>.
 20. Tousoulis D., Kampoli A. M., Tentolouris Nikolaos P., Papanagiotou C., Stefanadis C. (2012) The Role of Nitric Oxide on Endothelial Function. *Current Vascular Pharmacology*, 10 (1), 4–18. <https://doi.org/10.2174/157016112798829760>.
 21. Avgustovsky P. A., Komarovskaya V. M. (adviser) (2021) Application of Vacuum-Arc Evaporation for Deposition of Coatings Based on Titanium Oxynitride on Arterial Stents. *Inzhenerno-Pedagogicheskoe Obrazovanie v XXI veke: Materialy Respublikanskoi Nauchno-Prakticheskoi Konferentsii Molodykh Uchenykh i Studentov (25–26 Noyabrya 2021 g.)* [Engineering and Pedagogical Education in the 21st Century: Proceedings of the Republican Scientific-Practical Conference of Young Scientists and Students (November 25–26, 2021)]. Minsk, Belarusian National Technical University, 187–190 (in Russian).
 22. Sobrevia L., Ooi L., Ryan S., Steinert J. R. (2016) Nitric Oxide: A Regulator of Cellular Function in Health and Disease. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2016, 1–2. <https://doi.org/10.1155/2016/9782346>.
 23. Windecker S., Mayer I., De Pasquale G., Maier W., Dirsch O., De Groot P., Wu Y.-P., Noll G., Leskosek B., Meier B., Hess O. M. (2001) Stent Coating with Titanium-Nitride-Oxide for Reduction of Neointimal Hyperplasia. *Circulation*, 104 (8), 928–933. <https://doi.org/10.1161/hc401.093146>.
 24. Krajewski S., Neumann B., Kurz J., Perle N., Avcı-Adali M., Cattaneo G., Wendel H. P. (2015) Preclinical Evaluation of the Thrombogenicity and Endothelialization of Bare Metal and Surface-Coated Neurovascular Stents. *American Journal of Neuroradiology*, 36 (1), 133–139. <https://doi.org/10.3174/ajnr.a4109>.
 25. Suzuki T., Kopia G., Hayashi S. I., Bailey L. R., Llanos G., Wilensky R. [et al.] (2001) Stent-Based Delivery of Sirolimus Reduces Neointimal Formation in a Porcine Coronary Model. *Circulation*, 104 (10), 1188–1193. <https://doi.org/10.1161/hc3601.093987>.
 26. Windecker S., Simon R., Lins M. (2005) Randomized Comparison of a Titanium-Nitride-Oxide-Coated Stent with a Stainless Steel Stent for Coronary Revascularization: the TiNOX Trial. *ACC Current Journal Review*, 14 (9), 43. <https://doi.org/10.1016/j.accreview.2005.08.233>.
 27. Liu C. C., Wang J. Y., Yen I. P., Lai C. J. (2011) One-Year Follow-Up after Percutaneous Coronary Intervention with Titanium-Nitride-Oxide-Coated Stents Versus Paclitaxel-Eluting Stents in Patients from Real-World Clinical Practice. *Acta Cardiologica Sinica*, 27 (2), 94–100.
 28. Daoud F. C., Létinier L., Moore N., Coste P., Karjalainen P. P. (2020) Efficacy and Safety of TiNO-Coated Stents 1 Versus Drug-Eluting Coronary Stents. Systematic Literature Review and Meta-Analysis [Preprint]. *medRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2020.12.19.202485642021>.
 29. Tonino P. A., Pijls N. H., Collet C., Namas W., Van der Heyden J., Romppanen H. (2020) Titanium-Nitride-Oxide-Coated Versus Everolimus-Eluting Stents in Acute Coronary Syndrome: The Randomized TIDES-ACS Trial. *JACC Cardiovasc Interventions*, 13 (1), 1697–1705. <https://doi.org/10.1016/j.jcin.2020.04.021>.
 30. Khlusov I. A., Pichugin V. F., Pustovalova A. A., Konischev M. E., Dzyuman A. N., Epple M., Ulbricht M., Cicinskas E., Gulaya V. S., Vikhareva V. V. (2015) Electrokinetic Properties, In Vitro Dissolution, Potential Biocompatibility of Titanium Oxide and Oxynitride Films for Cardiovascular Stents. *Bulletin of Siberian Medicine*, 14 (2), 55–66 (in Russian). <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2015-2-55-66>.
 31. Beshchasna N., Ho A. Y. K., Saqib M., Kraśkiewicz H., Wasyluk Ł., Kuzmin O. [et al.] Surface Evaluation of Titanium Oxynitride Coatings used for Developing Layered Cardiovascular Stents. *Materials Science and Engineering: C*, 99, 405–416. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.01.131>.
 32. Duta O. C., Ficaí D., Ficaí A., Andronescu E., Beshchasna N., Saqib M., Opitz J., Kraskiewicz H., Wasyluk Ł., Kuzmin O., Pichugin V. (2018) Titanium Oxynitride Coatings Deposited by Magnetron Sputtering for Improvement of Cardiovascular Stent Design. *Proceedings of the 4th World Congress on New Technologies, Madrid, 19–21 August 2018*. Madrid, 18–20. <https://doi.org/10.11159/icnfa18.112>.
 33. Pana I., Braic V., Dinu M., Mouele E. S. M., Parau A. C., Petrik L. F., Braic M. (2020) In Vitro Corrosion of Titanium Nitride and Oxynitride-Based Biocompatible Coatings Deposited on Stainless Steel. *Coatings*, 10 (8), 710–728. <https://doi.org/10.3390/coatings10080710>.
 34. Velasco L., Olaya J. J., Rodil S. E. (2016) Effect of Si Addition on the Structure and Corrosion Behavior of NbN thin Films Deposited by Unbalanced Magnetron Sputtering. *Applied Physics A*, 122 (2), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s00339-016-9639-0>.
 35. Zhang X. G. (1996) *Corrosion and Electrochemistry of Zinc*. New York, Springer, 474. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9877-7>.
 36. Ding J. C., Wang Q. M., Liu Z. R., Jeong S., Zhang T. F., Kim K. H. (2019) Influence of Bias Voltage on the Microstructure, Mechanical and Corrosion Properties of AlSiN Films Deposited by HiPIMS Technique. *Journal of Alloys and Compounds*, 772, 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.063>.
 37. Kertzman Z., Marchal J., Suarez M., Staia M. H., Filip P., Kohli P., Aouadi S. M. (2008) Mechanical, Tribological, and Biocompatibility Properties of ZrN–Ag Nanocomposite Films. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 84 (4), 1061–1067. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.31533>.
 38. Kirkland N. T., Schiller T., Medhekar N., Biribilis N. (2012) Exploring Graphene as a Corrosion Protection Barrier. *Corrosion Science*, 56, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.12.003>.
 39. Ahmad Z. (2006) *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. Amsterdam, Elsevier, 673. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-5924-6.X5000-4>.
 40. Muñoz-Consuegra C. E., Rodríguez-Palacios J. M., Arboine-Aguirre L., Sierra-Fragoso Á., Zapata-Rodríguez A. (2018) Comparison of Clinical Outcomes Regarding the use of Titanium-Nitride-Oxide-Coated Stents (Titan) Versus Zotarolimus-Eluting Stents (Endeavor) in Patients with ST-Segment Elevation Myocardial Infarction (STEMI): An Experience From a Cardiac Center-Third Care Level. *Revista Mexicana de Cardiología*, 29 (1), 13–26.

Received: 03.01.2023

Accepted: 14.03.2023

Published online: 31.05.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-208-215>

УДК 626.3:627.86

Оптимизация параметров магистральных каналов в области гидравлически наивыгоднейших сечений

Докт. техн. наук, проф. Э. И. Михневич¹⁾, асп. Ли Цзэмин¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Магистральные каналы мелиоративных систем, наряду с наилучшими экономическими показателями, должны также соответствовать требованиям сопряжения проводящей сети в вертикальной плоскости и технологии производства работ по сооружению русла. Каналы гидравлически наивыгоднейшего профиля, хотя и являются самыми экономичными по объему земляной выемки, часто получаются слишком глубокими и небольшой ширины по дну, что не удовлетворяет указанным требованиям. Учесть все эти факторы можно, незначительно снижая скорость течения воды v (по сравнению со скоростью в русле с гидравлически наивыгоднейшим сечением $v_{г.н.}$), что приводит к существенному уменьшению глубины русла и соответственно увеличению его ширины по дну. Такое снижение скорости экономически оправдано (без существенного увеличения площади сечения) в области гидравлически наивыгоднейших сечений, где кривая функции $h = f(v)$ резко возрастает и асимптотически приближается к ординате с максимальной возможной скоростью $v_{г.н.}$. Эту область можно приближенно охарактеризовать значениями скорости $v = (0,95-1,0)v_{г.н.}$. Для удобства расчета полученная ранее автором формула для глубины канала гидравлически наивыгоднейшего профиля преобразована к более простому виду. Предложена аналитическая методика расчета оптимальных параметров сечения русла, находящихся в области гидравлически наивыгоднейших сечений, которая характеризуется коэффициентом оптимизации $K_{опт} = v/v_{г.н.}$, изменяющимся в пределах $K_{опт} = 0,95-1,0$. В этой области сечение русла незначительно отличается от гидравлически наивыгоднейшего профиля и при этом удовлетворяет требованиям сопряжения проводящей сети в вертикальной плоскости и условиям производства работ. Предложенный метод расчета менее трудоемкий и применим в широком диапазоне изменения показателя степени y в формуле Н. Н. Павловского для определения коэффициента Шези. Расчет по предлагаемой методике выполняют на основе использования зависимостей для определения характеристик гидравлически наивыгоднейшего сечения и формул русловой гидравлики (при незначительном поэтапном снижении скорости течения воды v). Получены формулы для определения глубины и ширины русла по дну при различных значениях скорости.

Ключевые слова: магистральные каналы, оптимальные параметры, гидравлически наивыгоднейшие сечения, методика расчета

Для цитирования: Михневич, Э. И. Оптимизация параметров магистральных каналов в области гидравлически наивыгоднейших сечений / Э. И. Михневич, Ли Цзэмин // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 3. С. 208–215. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-208-215>

Optimization of Main Canal Parameters in the Area of Hydraulically Most Advantageous Sections

E. I. Mikhnevich¹⁾, Li Zeming¹⁾

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

Abstract. The main canals of reclamation systems, along with the best economic performance, must also meet the requirements for connecting the conductive network in the vertical plane and the technology for the construction of the channel.

Адрес для переписки

Михневич Эдуард Иванович
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-10
fes@bntu.by

Address for correspondence

Mikhnevich Eduard I.
Belarusian National Technical University
9, B. Hmelnitzkogo str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-10
fes@bntu.by

Although the channels of the hydraulically most advantageous profile are the most economical in terms of excavation volume, often turn out to be too deep and of small width along the bottom, which does not meet the specified requirements. All these factors can be taken into account by slightly reducing the water flow velocity v (compared to the velocity in the channel with the most hydraulically advantageous cross section $v_{h.a.}$), which leads to a significant decrease in the channel depth and, accordingly, an increase in the width of the channel along the bottom. Such a decrease in velocity is economically justified (without a significant increase in the cross-sectional area) in the region of the most hydraulically advantageous sections, where the curve of the function $h = f(v)$ sharply increases and asymptotically approaches the ordinate with the maximum possible velocity $v_{h.a.}$. This area can be approximately characterized by the values of the velocity $v = (0.95-1.0)v_{h.a.}$. For the convenience of calculation, the formula obtained earlier by the author for the channel depth of the hydraulically most advantageous profile has been converted to a simpler form. An analytical method is proposed for calculating the optimal parameters of the channel section, located in the area of the most hydraulically advantageous sections, which is characterized by the optimization coefficient $K_{opt} = v/v_{h.a.}$, varying within $K_{opt} = 0.95-1.0$. In this area, the cross section of the channel differs slightly from the most hydraulically advantageous profile, and, at the same time, satisfies the requirements for conjugation of the conductive network in the vertical plane and the conditions of work. The proposed calculation method is less laborious and is applicable in a wide range of changes pertaining to exponent γ in the formula of N. N. Pavlovsky to determine the Chezy's coefficient. The calculation according to the proposed method is performed based on the use of dependencies to determine the characteristics of the most hydraulically advantageous section and the formulas of channel hydraulics (with a slight gradual decrease in the water flow rate Q). Formulas are obtained for determining the depth and width of the channel along the bottom at various values of velocity.

Keywords: main channels, optimal parameters, hydraulically advantageous sections, calculation method

For citation: Mikhnevich E. I., Li Zeming (2023) Optimization of Main Canal Parameters in the Area of Hydraulically Most Advantageous Sections. *Science and Technique*. 22 (3), 208–215. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-208-215> (in Russian)

Введение

Магистральные каналы являются важнейшими элементами мелиоративных систем и предназначены обеспечивать гарантированную подачу воды на орошение и отведение воды с осушаемых земель в реку-водоприемник. На осушительных системах магистральные каналы, принимающие воду с открытых коллекторов, обычно имеют глубину: $h = 2-2,5$ м – на малых и средних системах и $h = 2,5-3,0$ м – на крупных с площадью мелиорированных земель 4–5 тыс. га и более. Более глубокие каналы могут привести к значительному понижению уровня грунтовых вод и ухудшить водный режим мелиорируемых земель. Кроме того, глубокие магистральные каналы не обеспечат в меженный период требуемое сопряжение «уровень в уровень» с впадающими каналами [1].

Глубина магистральных каналов, подающих воду на орошение, определяется в основном расчетным расходом воды и может достигать на крупных ирригационных системах Китая 4–5 м и более [2]. Однако слишком глубокие магистральные каналы не могут в полной мере обеспечить подачу воды в необходимом объеме в каналы второго порядка и оросители, так как уровень воды в глубоком магистральном кана-

ле в период межени может опускаться ниже дна менее глубоких водоотводящих каналов.

Наиболее экономичными по объемам земляной выемки и соответственно по строительным затратам являются каналы гидравлически наивыгоднейшего сечения. В то же время они часто слишком глубокие и узкие, что не всегда удобно при производстве работ и может не соответствовать требованиям сопряжения проводящей сети в вертикальной плоскости. Поэтому имеет большое практическое значение разработка методики расчета оптимальных параметров канала, близких к гидравлически наивыгоднейшему сечению, но менее глубоких и достаточно широких, чтобы быть вполне приемлемыми для производства работ по их сооружению и удовлетворять требованиям сопряжения проводящей сети в вертикальной плоскости.

Цель исследования – разработка удобной в практическом применении аналитической методики расчета оптимальных параметров канала, находящихся в области гидравлически наивыгоднейших сечений и удовлетворяющих требованиям сопряжения проводящей сети в вертикальной плоскости и условиям производства работ, применимой в широком диапазоне изменения показателя степени γ в формуле

Н. Н. Павловского для определения коэффициента Шези и обеспечивающей пропуск заданного расчетного расхода.

Методика расчета оптимальных параметров магистральных каналов

Проектируемый канал имеет наилучшие экономические показатели с поперечным сечением русла гидравлически наивыгоднейшего профиля, который характеризуется максимально возможной средней скоростью v , а следовательно, минимальной площадью живого сечения ω [3–5]. Для трапецидального сечения, наиболее распространенного в водохозяйственном строительстве, такой профиль характеризуется соотношением $\beta_{г.н}$ между шириной русла по дну b и глубиной h [4, 5]

$$\beta_{г.н} = (b/h)_{г.н} = 2(\sqrt{1+m^2} - m). \quad (1)$$

Гидравлический радиус таких русел $R = 0,5h$.

На основе совместного решения уравнения неразрывности потока, выражения для определения площади трапецидального сечения русла и соотношения (1) между его шириной по дну и глубиной автором [5, 6] получена формула для определения глубины канала гидравлически наивыгоднейшего профиля

$$h = \frac{(Qn)^{1/(2,5+y)}}{0,5^{\frac{0,5+y}{2,5+y}} (\beta_{г.н} + m)^{1/(2,5+y)} i^{0,5/(2,5+y)}}, \quad (2)$$

где Q – максимальный расчетный расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$; n – коэффициент шероховатости русла; m – то же заложения откосов; i – уклон дна канала; y – показатель степени в формуле Н. Н. Павловского для определения скоростного коэффициента (коэффициента Шези) C , $\text{м}^{0,5}/\text{с}$:

$$C = \frac{1}{n} R^y, \quad (3)$$

R – гидравлический радиус, м, равный

$$R = \frac{\omega}{\chi}; \quad (4)$$

ω – площадь живого сечения потока, м^2 ; χ – смоченный периметр, м.

Значение показателя степени y с достаточной степенью точности может быть определено по упрощенным формулам Н. Н. Павловского [5, 7]:

$$\left. \begin{aligned} y &= 1,5\sqrt{n} \text{ при } R < 1 \text{ м;} \\ y &= 1,3\sqrt{n} \text{ при } R > 1 \text{ м.} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Для земляных русел с гидравлическим радиусом $R = 0,5\text{--}3$ м значение показателя степени может быть принято приближенно $y = 0,2$ [3, 5].

Площадь живого сечения ω и смоченный периметр χ определяют соответственно по формулам:

$$\omega = (b + mh)h; \quad (6)$$

$$\chi = b + 2h\sqrt{1+m^2}. \quad (7)$$

Для удобства расчетов приведем формулу (2) к более простому виду. Выражение $(\beta_{г.н} + m)$ в (2) численно равно характеристике откоса m_0 , которая определяется по выражению

$$m_0 = 2\sqrt{1+m^2} - m. \quad (8)$$

Заменяя в формуле (2) выражение $(\beta_{г.н} + m)$ на m_0 по (8) и учитывая, что $2 \cdot (0,5)^{\frac{0,5+y}{2,5+y}} = (4)^{\frac{1}{2,5+y}}$, эту формулу можно представить в более простом виде

$$h = 2 \left(\frac{Qn}{4m_0\sqrt{i}} \right)^{\frac{1}{2,5+y}}. \quad (9)$$

Запроектировать параметры сечения канала, которые незначительно отличались бы от гидравлически наивыгоднейшего профиля и при этом соответствовали требованиям сопряжения проводящей сети в вертикальной плоскости и технологии производства работ по сооружению русла, можно, незначительно снижая скорость течения воды v (по сравнению со скоростью в русле с гидравлически наивыгоднейшим сечением $v_{г.н}$). Это приводит к существенному уменьшению глубины русла и соответственно увеличению его ширины по дну. Такое сниже-

ние скорости экономически оправдано (без существенного увеличения площади сечения) в области гидравлически наивыгоднейших сечений, где кривая функции $h = f(v)$ резко возрастает и асимптотически приближается к ординате с максимально возможной скоростью $v_{г.н}$ (рис. 1). Эту область можно приближенно охарактеризовать значениями скорости $v = (0,95-1,0)v_{г.н}$.

О значительном уменьшении глубины русла при небольшом снижении скорости v по отношению к $v_{г.н}$ писали А. А. Угинчус [8], Д. В. Штеренлихт [4], которые считали возможным уменьшать отношение $v/v_{г.н}$ и соответственно увеличивать $\omega/\omega_{г.н}$ на 1–5 %. При таких малых отклонениях ω от $\omega_{г.н}$ отношения b/h при удалении от гидравлически наивыгоднейшего профиля резко возрастают, ширина канала увеличивается, что создает благоприятные условия для производства работ.

Вопросу оптимизации магистральных каналов уделил внимание М. А. Михалев [9], который в качестве параметра оптимизации принял уклон дна русла и рассмотрел различные соотношения выемки канала и объема воды в нем. Такая постановка задачи имеет научный интерес, но не сможет найти практическое применение. Уклон, как правило, определяется топографической характеристикой местности, длиной канала в общей схеме проводящей сети и условиями ее сопряжения. Объем выемки канала практически равен объему воды в период пропуска максимального расчетного расхода и лишь незначительно (на величину строительного запаса) отличается от объема воды в русле.

Н. Ф. Гульков [10] предложил графоаналитический метод расчета экономически наивыгоднейшего живого сечения трапецидального канала путем построения графиков функциональных зависимостей $v = f_1(h)$ и $b = f_2(h)$ для профиля канала в диапазоне скоростей от незаияющей до скорости в русле гидравлически наивыгоднейшего сечения и затем выбора приемлемой скорости и соответствующих ей параметров канала с учетом технических и производственных требований. Недостатком этого метода является большая трудоемкость: необходимость предварительного выполнения

большого объема гидравлических расчетов и составления таблиц для построения графиков указанных функций. Следует также иметь в виду, что этот метод предложен только для одного значения показателя степени $y = 0,2$ в формуле (3) Н. Н. Павловского.

Нами предложена более удобная и применимая в широком диапазоне изменения показателя степени y аналитическая методика расчета оптимальных параметров канала, находящихся в области гидравлически наивыгоднейших сечений и удовлетворяющих требованиям сопряжения проводящей сети в вертикальной плоскости и условиям производства работ. Расчет выполняют по предлагаемой методике в следующем порядке:

1. Рассчитывают гидравлически наивыгоднейший радиус $R_{г.н}$ по формуле (вытекает из (9), так как $R_{г.н} = 0,5h_{г.н}$):

$$R_{г.н} = \left(\frac{Qn}{4m_0\sqrt{i}} \right)^{\frac{1}{2,5+y}}. \quad (10)$$

2. Определяют площадь гидравлически наивыгоднейшего сечения $\omega_{г.н}$ по формуле [3, 4]

$$\omega_{г.н} = 4m_0R_{г.н}^2. \quad (11)$$

3. Находят среднюю скорость потока $v_{г.н}$, которая является максимально возможной при заданных уклоне i и коэффициенте шероховатости n :

$$v_{г.н} = \frac{Q}{\omega_{г.н}}. \quad (12)$$

4. Задаются скоростью v , меньшей максимально возможной $v_{г.н}$:

$$v = K_{опт} v_{г.н}, \quad (13)$$

где $K_{опт}$ – коэффициент оптимизации параметров поперечного сечения канала, который рекомендуется назначать в пределах $K_{опт} = 0,95-1,0$.

5. Принимают на первом этапе расчета скорость в русле v на 1 % меньше $v_{г.н}$, т. е. $v = 0,99v_{г.н}$, определяют гидравлический радиус поперечного сечения канала при этой скорости по формуле

$$R = \left(\frac{\omega n}{\sqrt{i}} \right)^{\frac{1}{0,5+y}}. \quad (14)$$

6. Вычисляют площадь живого сечения ω и смоченный периметр χ соответственно по формулам:

$$\omega = \frac{Q}{v}; \quad (15)$$

$$\chi = \frac{\omega}{R}. \quad (16)$$

7. Определяют глубину русла, для этого решают систему уравнений (6) и (7), откуда получают квадратное уравнение относительно неизвестного h :

$$\left(2\sqrt{1+m^2} - m \right) h^2 - \chi h + \omega = 0, \quad (17)$$

из которого находят значение глубины русла

$$h = \frac{\chi - \sqrt{\chi^2 - 4m_0\omega}}{2m_0}, \quad (18)$$

где m_0 – характеристика откоса, определяемая по формуле (8).

8. Находят ширину русла по дну b из уравнения (6) по выражению

$$b = \frac{\omega}{h} - mh. \quad (19)$$

Если найденные на первом этапе расчета значения глубины h и ширины русла по дну b не полностью соответствуют требованиям сопряжения проводящей сети и условиям производства работ, то расчет повторяют, уменьшая коэффициент оптимизации $K_{\text{опт}}$ и соответственно скорость v до тех значений, при которых получают приемлемые величины глубины h и ширины b .

Принимать коэффициент $K_{\text{опт}} < 0,95$ не рекомендуется, так как в этом случае параметры канала не будут находиться в области гидравлически наивыгоднейших сечений и экономические затраты на строительство канала значительно возрастут.

По предлагаемой методике в качестве примера рассчитан канал при исходных данных,

приведенных в табл. 1. По результатам расчета (табл. 2) построен график $h = f(v)$ (рис. 1), из которого видно, что незначительное снижение скорости v по сравнению с $v_{\text{г.н}}$ позволяет существенно уменьшить глубину канала h . Из графика прослеживается область гидравлически наивыгоднейших сечений примерно в диапазоне $v = (0,95 - 1,0)v_{\text{г.н}}$ (на рис. 1 эта область выделена штриховыми линиями).

Таблица 1

Исходные данные для расчета параметров канала

Initial data for calculating channel parameters

$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	n	y	m	m_0	i
20	0,024	0,2014	2	2,472	0,0002

Таблица 2

Результаты расчета параметров канала при различных скоростях течения воды

Channel parameter calculation results at different water flow rates

$K_{\text{опт}}$	$v, \text{ м/с}$	$R, \text{ м}$	$\omega, \text{ м}^2$	$\chi, \text{ м}$	$h, \text{ м}$	$b, \text{ м}$
1,00	0,812	1,579	24,641	15,609	3,157	1,490
0,99	0,804	1,556	24,890	15,994	2,605	4,344
0,98	0,795	1,534	25,144	16,393	2,409	5,621
0,97	0,787	1,512	25,403	16,806	2,268	6,661
0,96	0,779	1,489	25,668	17,234	2,156	7,591
0,95	0,771	1,467	25,938	17,677	2,062	8,457
0,92	0,747	1,402	26,784	19,108	1,839	10,882
0,90	0,730	1,358	27,379	20,155	1,722	12,453
0,85	0,690	1,252	28,989	23,152	1,489	16,494
0,80	0,649	1,148	30,801	26,820	1,306	20,981
0,70	0,568	0,949	35,201	37,079	1,019	32,524
0,60	0,487	0,762	41,068	53,892	0,791	50,356

Из табл. 2 видно, что снижение скорости потока только на 1 % ($K_{\text{опт}} = 0,99$) до значения $v = 0,804$ м/с позволило уменьшить глубину русла на 17,5 % до величины $h = 2,6$ м, что при заданном расходе $Q = 20 \text{ м}^3/\text{с}$ может быть приемлемым для сопряжения проводящей сети в вертикальной плоскости. При этом ширина русла по дну $b = 4,34$ м вполне удобна при производстве работ по сооружению канала.

Если глубина реки h не ограничивается какими-либо условиями, а ширину русла по дну b необходимо увеличить (по сравнению с $b_{г.н.}$) для удобства производства работ по сооружению канала, то, уменьшая скорость до значения $v \leq 0,98v_{г.н.}$, можно получить формулу для определения ширины по дну b . Для этого выражение (6) для определения площади живого сечения представим в виде квадратного уравнения относительно неизвестного h

$$mh^2 + bh - \omega = 0, \quad (20)$$

откуда

$$h = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4m\omega}}{2m}. \quad (21)$$

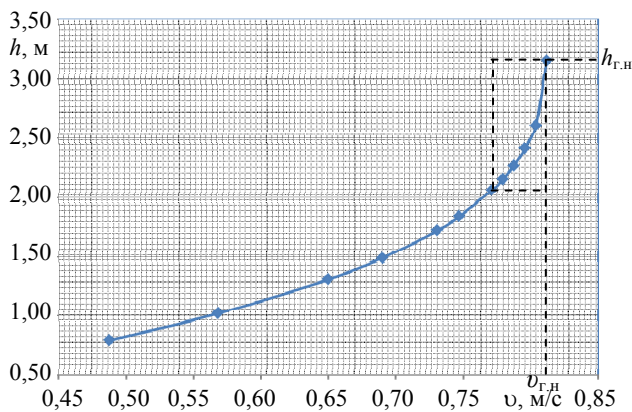


Рис. 1. График зависимости $h = f(v)$

Fig. 1. Dependency graph $h = f(v)$

Из формулы (7) для определения смоченного периметра выразим значение h

$$h = \frac{\chi - b}{2\sqrt{1 + m^2}}. \quad (22)$$

Приравняем уравнения (21) и (22)

$$\frac{-b + \sqrt{b^2 + 4m\omega}}{2m} = \frac{\chi - b}{2\sqrt{1 + m^2}}. \quad (23)$$

Из равенства (23) получим квадратное уравнение относительно неизвестного b

$$4(m_1^2 - m_2^2)b^2 - 8mm_2\chi b + 4m(4m_1^2\omega - m\chi) = 0, \quad (24)$$

где $m_1 = \sqrt{1 + m^2}$; $m_2 = m_1 - m$.

Решая уравнение (24) относительно b , получим формулу для определения значения ширины русла по дну

$$b = \frac{8mm_2\chi + \sqrt{(8mm_2\chi)^2 - 64m(m_1^2 - m_2^2) \times \frac{4m_1^2\omega - m\chi^2}{8(m_1^2 - m_2^2)}}}{8(m_1^2 - m_2^2)} \rightarrow \quad (25)$$

В отличие от характера функции $h = f(v)$, где глубина канала h существенно уменьшается при снижении скорости v , ширина русла по дну b значительно возрастает с уменьшением скорости, что видно из графика функции $b = f(v)$ (рис. 2) (область гидравлически наивыгоднейших сечений выделена штриховыми линиями).

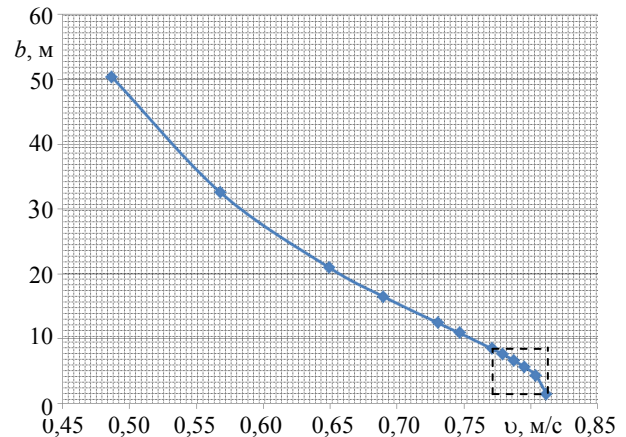


Рис. 2. График зависимости $b = f(v)$

Fig. 2. Dependency graph $b = f(v)$

Для обеспечения устойчивости русла канала окончательно принятое значение скорости v в области гидравлически наивыгоднейших сечений необходимо сравнить с допускаемой неразрывающей скоростью $v_{доп}$, которую рекомендуется определять по разработанным ранее формулам автора [5, 6]. В приведенном выше примере при $Q = 20 \text{ м}^3/\text{с}$ (табл. 1) назначают допускаемую скорость, соответствующую стадии начала грядобразования [5, 6]. Если окажется, что $v > v_{доп}$, то потребуется крепление русла от размыва. При соответствующем технико-экономическом обосновании принимают

значение $v = v_{\text{доп}}$, и в этом случае крепление не требуется.

Расчет параметров русла при назначенной скорости $v = v_{\text{доп}}$ производят при заданной (соответствующей требованиям сопряжения проводящей сети в вертикальной плоскости) глубине h в следующем порядке. Вначале определяют площадь живого сечения $\omega = Q/v_{\text{доп}}$. Затем рассчитывают ширину русла по дну b по формуле (19), смоченный периметр – по (7) и гидравлический радиус – по (4). В качестве проверки определяют скорость v по формуле Шези

$$v = C\sqrt{Ri}, \quad (26)$$

где коэффициент Шези C определяют по формуле (3).

Если скорость по (26) $v = v_{\text{доп}}$, то расчет выполнен правильно.

Необходимо также, чтобы скорость в русле была не менее допускаемой по условию заиления $v_{\text{нез}}$, т.е. $v > v_{\text{нез}}$. Величину незаиляющей скорости $v_{\text{нез}}$, м/с, при которой не будет происходить осаждение взвешенных наносов, рекомендуется определять по формуле автора [5, 6]

$$v_{\text{нез}} = \sqrt[3]{\frac{\alpha \eta S R g u}{(\rho_s - \rho_v) \cdot 10^{-3}}}, \quad (27)$$

где S – средневзвешенная мутность потока, кг/м³; η – коэффициент неоднородности взвешенных наносов $\eta = d_{90}/d_{50}$ (d_{90} – диаметр частиц крупной фракции, которых содержится в составе наносов менее 90% по массе, м; d_{50} – средний диаметр частиц наносов, м); R – гидравлический радиус живого сечения, м; u – гидравлическая крупность частиц средневзвешенного диаметра, м/с; ρ_s, ρ_v – плотность соответственно частиц наносов и воды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; α – коэффициент, зависящий от характера осаждения наносов, принимается:

$$\alpha = 4,0 \text{ при } d = 0,1\text{--}2,5 \text{ мм}; \alpha = 4,5 \text{ при } d > 2,5 \text{ мм} \\ \text{и } \alpha = 3,5 \text{ при } d < 0,1 \text{ мм}.$$

Если окажется, что скорость потока $v > v_{\text{нез}}$, то будет происходить осаждение наносов и заиление русла. Практически можно допустить

превышение на 10 % незаиляющей скорости над средней скоростью потока и незначительное осаждение крупной фракции ($>d_{90}$). Если $v < 1,1v_{\text{нез}}$, то предусматривают увеличение уклона дна и соответственно средней скорости.

Принципиально иной подход к назначению параметров судоходных каналов, для которых определяющими и по глубине, и по ширине русла являются габариты судов, курсирующих по таким водотокам [11, 12].

По приведенной выше методике может быть дана оценка оптимальности параметров эксплуатируемых каналов. Для этого по формулам (10)–(12) рассчитывают значения $R_{\text{г.н.}}$, $\omega_{\text{г.н.}}$, $v_{\text{г.н.}}$. Затем определяют коэффициент оптимизации $K_{\text{опт}} = v/v_{\text{г.н.}}$. Если значение коэффициента $K_{\text{опт}}$ находится в пределах 0,95–1,0, то можно полагать, что параметры канала находятся в области гидравлически наивыгоднейших сечений. Соответственно, чем меньше значения коэффициента $K_{\text{опт}}$, тем больше отклоняются параметры канала от гидравлически наивыгоднейшего профиля.

ВЫВОДЫ

1. На основе совместного решения уравнений русловой гидравлики и формул для расчета характеристик трапецеидального сечения русла получена простая формула (9) для определения глубины канала гидравлически наивыгоднейшего профиля.

2. Построен график функции $h = f(v)$ и выделена область гидравлически наивыгоднейших сечений, которая характеризуется коэффициентом оптимизации $K_{\text{опт}} = v/v_{\text{г.н.}}$, изменяющимся в пределах $K_{\text{опт}} = 0,95\text{--}1,0$.

3. Получены формулы для определения глубины и ширины русла по дну в области гидравлически наивыгоднейших сечений. Предложенная аналитическая методика расчета параметров каналов в этой области позволяет непосредственно по формулам определять размеры поперечного сечения русла и тем самым избежать трудоемкого процесса расчета каналов путем подбора. Эта методика может быть также использована для оценки степени оптимальности параметров эксплуатируемых магистральных каналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мелиоративные системы и сооружения. Нормы проектирования: ТКП 45-3.04-8-2005 (02250) / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. Минск, 2006. 106 с.
2. Михневич, Э. И. Пропускная способность главного магистрального канала, подающего воду из р. Хуанхэ на ирригационную систему Хэтао / Э. И. Михневич, Ли Цзэмин // Тридцать седьмое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов (г. Рязань, 3–7 октября 2022 г.): докл. и сообщения. М.: МГУ, 2022. С. 128–130.
3. Агроскин, И. И. Гидравлика / И. И. Агроскин, И. И. Дмитриев, Ф. И. Пикалов. 4-е изд. М.–Л.: Энергия, 1964. 352 с.
4. Штеренлихт, Д. В. Гидравлика / Д. В. Штеренлихт; ред. Н. М. Щербакова. М.: Колос С, 2007. 655 с.
5. Михневич, Э. И. Открытые водотоки: пропускная способность и устойчивость / Э. И. Михневич. Минск: БНТУ, 2021. 311 с.
6. Михневич, Э. И. Расчет пропускной способности и устойчивости каналов / Э. И. Михневич // Экология и строительство. 2020. № 1. С. 23–31.
7. Спицин, И. П. Общая и речная гидравлика / И. П. Спицин, В. А. Соколова. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 360 с.
8. Угинчус, А. А. Гидравлические и технико-экономические расчеты каналов. / А. А. Угинчус. М.: Изд-во лит. по строительству, 1965. 274 с.
9. Михалев, М. А. Расчет магистральных каналов / М. А. Михалев // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 4. С. 83–93.
10. Гульков, Н. Ф. Расчет экономически наивыгоднейшего живого сечения трапецеидального канала / Н. Ф. Гульков // НТИ по мелиорации и водному хозяйству / Минводхоз БССР. Минск, 1991. Вып. 5. С. 21–27.
11. Михневич, Э. И. Устойчивость русел и регулирование стока судоходных рек и каналов / Э. И. Михневич, В. Е. Левкевич. Минск: Право и экономика, 2022. 188 с.
12. Гладков, Г. Л. Гидроморфология русел судоходных рек: монография / Г. Л. Гладков, Р. С. Чалов, К. М. Беркович. 2-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2019. 432 с.

Поступила 11.01.2023

Подписана к печати 14.03.2023

Опубликована онлайн 31.05.2023

REFERENCES

1. TKP [Technical Code of Common Practice] 45-3.04-8-2005 (02250) *Ameliorative Systems and Structures. Design Standards*. Minsk, 2006, 106 (in Russian).
2. Mikhnevich E. I., Li Zé Ming (2022) Capacity of the Main Canal That Supplies Water from Huághé River to Hetao Irrigation Systemo. *Tridtsat' Sed'moe Plenarnoe Mezhu-zovskoe Koordina-Tsionnoe Soveshchanie po Probleme Eroziionnykh, Ruslovykh i Ust'evykh Protssessov (g. Rya-zan', 3–7 Oktyabrya 2022 g.): Doklady i Soobshcheniya* [37th Plenary Interuniversity Coordination Meeting on the Problem of Erosion, Channel and Estuary Processes (Ryazan, October 3 – 7, 2022): Reports and Messages]. Moscow, Moscow State University, 128–130 (in Russian).
3. Agroskin I. I., Dmitriev I. I., Pikalov F. I. (1964) *Hydraulics*. 4th ed. Moscow – Leningrad, Energiya Publ, 352 (in Russian).
4. Shterenlikht D. V. (2007) *Hydraulics*. Moscow, Kolos S Publ, 655 (in Russian).
5. Mikhnevich E. I. (2021) *Open Watercourses: Carrying Capacity and Sustainability*. Minsk, Belarusian National Technical University, 311 (in Russian).
6. Mikhnevich E. I. (2020) Calculation of Throughput and Stability of Channels. *Ekologiya i Stroitelstvo*, (1), 23–31 (in Russian).
7. Spitsin I. P., Sokolova V. A. (1990) *General and River Hydraulics*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ, 360 (in Russian).
8. Uginchus A. A. (1965) *Hydraulic and Technical and Economic Calculations of Channels*. Moscow, Publishing House of Literature on Construction, 274 (in Russian).
9. Mikhalyov M. A. (2013) Calculation of Main Channels. *Inzhenerno-Stroitelny Zhurnal = Magazine of Civil Engineering*, (4), 83–93 (in Russian).
10. Gulkov N. F. (1991) Calculation of the Most Economically Advantageous Living Section of a Trapezoidal Channel. *Nauchno-Tekhnicheskaya Informatsiya po Melioratsii i Vodnomu Khozyaistvu* [Scientific and Technical Institute of Land Reclamation and Water Management]. Minsk, Ministry of Water Resources of Belarussian Soviet Socialist Republic, (5), 21–27 (in Russian).
11. Mikhnevich E. I., Levkevich V. E. (2022) *Stability of Channels and Regulation of the Flow of Navigable Rivers and Canals*. Minsk, Pravo i Ekonomika Publ, 188 (in Russian).
12. Gladkov G. L., Chalov R. S., Berkovich K. M. (2019) *Hydromorphology of the Chan of Navigable Rivers*. 2nd ed. Saint-Peterburg, Lan Publ, 432 (in Russian).

Received: 11.01.2023

Accepted: 14.03.2023

Published online: 31.05.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-216-223>

УДК 624.154.546:620.179

Однородность ствола буронабивных свай по результатам четырехканального межскважинного ультразвукового мониторинга

Канд. техн. наук, доц. Д. Ю. Снежков¹⁾,
докт. техн. наук, проф. С. Н. Леонович¹⁾, асп. Н. А. Будревич¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Исследована однородность структуры ствола буронабивных свай по результатам четырехканального межскважинного ультразвукового (УЗ) мониторинга. Определена фактическая длина свай с выявлением дефрагментации ствола сваи, определена прочность на сжатие, выявлены дефекты сплошности на основе совместного анализа данных метода межскважинного ультразвукового мониторинга. Использование четырех каналов позволяет отдельно контролировать периферийную и центральную области сваи в шести направлениях. Данные сейсмоакустического метода совпали с параметрами ультразвукового мониторинга в части выявления зон неоднородности бетона, уменьшения сечения сваи и т. д. Для всех перечисленных свай названными методами испытаний не зарегистрированы данные, указывающие на дефрагментацию ствола сваи – присутствие участков, в поперечных сечениях которых полностью отсутствует бетон. Этими методами испытаний для всех свай подтверждено соответствие их фактической длины проектным значениям. Значимый дефект сплошности бетона сваи 40оп, по данным УЗ мониторинга и сейсмоакустического метода, зарегистрирован в интервале отметок $-(17,5-18)$ м, проявляющий себя снижением скорости распространения УЗ импульса от 25 до 50 % по двум направлениям прозвучивания, включая диаметрально. Указанный дефект можно интерпретировать как снижение эффективного сечения сваи до 25–50 % от среднего значения. Дефектные участки свай обнаруживались в их верхней части на отметках по глубине от 0 до $-1,5$ м, считая от торцевой поверхности оголовка. При этом различия по физико-механическим параметрам бетона на этих отметках наблюдались и в пределах поперечного сечения свай [1–5].

Ключевые слова: межскважинный ультразвуковой мониторинг, виброакустический метод, буронабивная свая, каналобразующие трубы

Для цитирования: Снежков, Д. Ю. Однородность ствола буронабивных свай по результатам четырехканального межскважинного ультразвукового мониторинга / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович, Н. А. Будревич // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 3. С. 216–223. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-216-223>

Homogeneity of Bored Piles According to Results of Four-Channel Cross-Well Ultrasonic Monitoring

D. Yu. Snezhkov, S. N. Leonovich, N. A. Budrevich

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

Abstract. The homogeneity of the structure of the bored pile shaft has been studied based on the results of four-channel interwell ultrasonic (US) monitoring. The actual length of the piles has been determined with the detection of defragmentation of the pile shaft, the compressive defects have been determined, and continuity defects have been identified based on a joint analysis of data from the method of interwell ultrasonic monitoring. The use of four channels allows to control separately the peripheral and central areas of the pile in six directions. The data of the seismoacoustic method coincided with the parameters of ultrasonic monitoring in terms of identifying zones of concrete heterogeneity, reducing the pile cross section, etc.

Адрес для переписки
Леонович Сергей Николаевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 368-61-56
sleonovich@mail.ru

Address for correspondence
Leonovich Sergey N.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 368-61-56
sleonovich@mail.ru

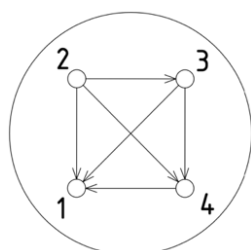
For all of the listed piles, data are not registered by the named test methods indicating defragmentation of the pile shaft – the presence of sections in the cross sections of which there is no concrete at all. These test methods for all piles confirmed the compliance of their actual length with the design values. A significant defect in the continuity of the concrete of the 40op pile, according to the data of ultrasonic monitoring and seismoacoustic method, was registered in the interval of marks – (17.5–18) m, manifesting itself as a decrease in the propagation velocity of the ultrasonic pulse from 25 to 50 % in two sounding directions, including diametrical. This defect can be interpreted as a decrease in the effective section of the pile to 25–50 % of the average value. Defective sections of piles were found in their upper part at depth marks from 0 to –1.5 m, counting from the end surface of the head. At the same time, differences in the physical and mechanical parameters of concrete at these marks were also observed within the cross section of piles [1–5].

Keywords: cross-well ultrasonic monitoring, vibroacoustic method, bored pile, channel forming pipes

For citation: Snezhkov D. Yu., Leonovich S. N., Budrevich N. A (2023) Homogeneity of Bored Piles According to Results of Four-Channel Cross-Well Ultrasonic Monitoring. *Science and Technique*. 22 (3), 216–223. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-216-223> (in Russian)

Методика выполнения испытаний

Выполнены испытания следующих свай: 8оп, 39оп, 40оп, 66оп, 121оп, 148оп. Для проведения межскважинного ультразвукового мониторинга в арматурном каркасе свай предусмотрена установка четырех каналаобразующих труб внутренним диаметром 50 мм, прикрепленных к пространственному арматурному каркасу сваркой (рис. 1, 2). Использование четырех каналов позволяет отдельно контролировать периферийную область сечения ствола сваи – направления 1–2, 2–3, 3–4, 1–4 – и его центральную область – направления 1–3 и 2–4.



1–2 – направление ультразвукового прозвучивания бетона опытных свай

Рис. 1. Схемы расположения труб доступа и трасс (сечений) по методу межскважинного ультразвукового мониторинга

Рис. 1. Access pipe layouts and traces (sections) according to the interwell method of ultrasound monitoring

Контроль этим методом требует предварительного определения скорости распространения акустической волны v в бетоне свай. Для этого были выполнены ультразвуковые измерения на выступающих из грунта оголовках свай. На каждой свае проведены пять измерений скорости ультразвукового импульса

в двух взаимно перпендикулярных направлениях прибором «Пульсар-2.2» (версия ДБС) [6–13].

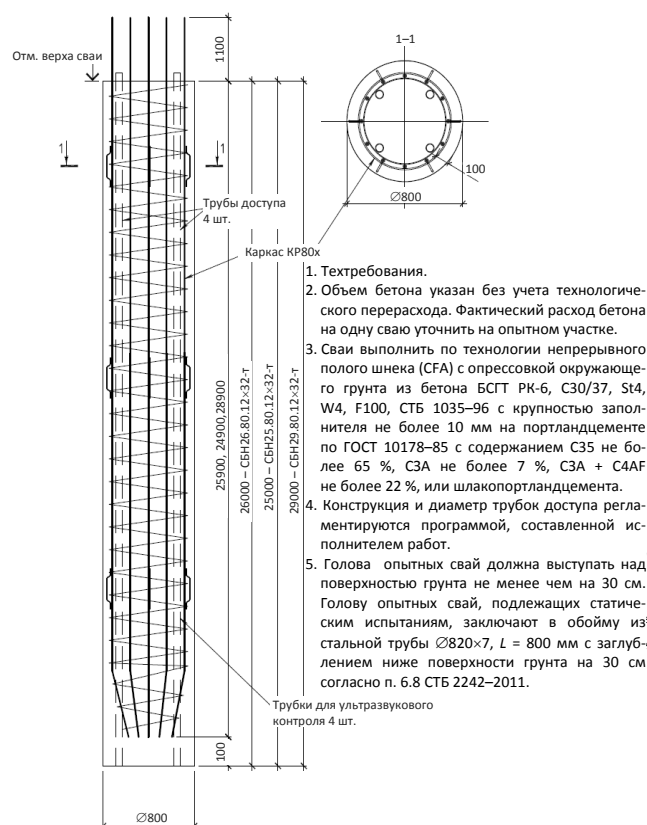


Рис. 2. Свая буронабивная с каналаобразующими трубами

Рис. 2. Bored pile with channel forming pipes

Результаты испытаний

Основные результаты контроля свай 8оп, 40оп, 66оп, 121оп, 148оп методом четырехканального межскважинного ультразвукового мониторинга приведены в табл. 1, 2.

Основные результаты испытания свай 8оп, 40оп, 66оп, 121оп, 148оп сейсмоакустическим методом приведены в табл. 3.

Таблица 1

Результаты измерений скорости ультразвукового контроля
Results of ultrasonic inspection velocity measurement

№ сваи	Скорость распространения УЗ импульса, м·с ⁻¹							Коэффициент вариации, %
	1–2	2–3	3–4	1–4	1–3	2–4	Средняя	
8оп	3 698	3 712	3 685	3 714	3 901	3 861	3 762	2,492
40оп	3 795	3 860	3 815	3 878	3 817	3 837	3 834	0,807
66оп	3 724	3 782	3 799	3 786	3 801	3 826	3 786	0,904
121оп	3 735	3 693	3 879	3 740	3 772	3 809	3 771	1,737
148оп	3 902	3 820	3 837	3 849	3 837	3 861	3 851	0,740

Таблица 2

Результаты межскважинного ультразвукового мониторинга свай
Results of cross-well ultrasonic monitoring of piles

№ сваи	Трасса измерения	Отметка расположения дефектного участка, м					Нижняя отметка*, м
8оп	1–2	0,5–1!		14,5	17,5; 19		–26,3
	2–3	0,5–1!	7,5–8	13,5–14			–26,3
	3–4	0,5–1!	3,5–8				–26,0
	1–4	0,5–1!	7,5–8		20,5	24,5–25,5	–26,3
	1–3	0,5–1!					–26,3
	2–4	0,5–1!	7,5			24,5–25,0	–26,3
40оп	1–2	0,5–2!	3–5			26–27,5	–28,0
	2–3		7,5				–28,5
	3–4			12–13,5	16,5		–28,5
	1–4	0,5		12	16–17;18		–28,5
	1–3				18!		–28,5
	2–4						–28,5
66оп	1–2		6,5; 7,5–8			24–25!	–26,0
	2–3	1–1,5	7,5				–26,5
	3–4			14,5			–26,0
	1–4	1–1,5	7,5	12			–26,5
	1–3	1!					–26,0
	2–4					25	–26,5
121оп	1–2	0,5–1,5		8–9	15,5	21	–25,5
	2–3		5,5	12,5; 14,5		20–21	–25,5
	3–4						–25,0
	1–4		6–6,5				–25,5
	1–3	0,5–1!					–25,5
	2–4	0,5–1!				25	–25,5
148оп	1–2			8–8,5			–26,0
	2–3	0,5–1,5!	3,5–4	9			–26,0
	3–4	0,5–1,5!					–26,0
	1–4	0,5–1,5!	3,5				–26,0
	1–3	0,5–1,5!	3,5!				–26,0
	2–4	0,5–1,5!		9		25	–26,0
Примечания: ! – значительное (>5 %) снижение скорости УЗК; остальные значения соответствуют одиночным отсчетам со снижением скорости УЗК на 2–5 %; * нижняя отметка определена по проходимости канальных труб.							

Таблица 3

Результаты контроля свай сейсмоакустическим методом

Results of pile control by seismoacoustic method

№ свай по генплану	Отметка дефектов сечения («шейка» – «бочка»), м					Акустическая длина свай, м
	1	2	3	4	5	
8оп	2,5 ⁻		12 ⁺	23 ⁻	25	25
39оп	4 ⁺				29,5	29,5
40оп	1,5 ⁺	8 ⁻	19 ⁻	24 ⁻	27–29	27–29
66оп		11 ⁻	19 ⁻	24–25 ⁺	26	26
121оп		12–14 ⁻	18–19 ⁺	23 ⁺	25	25
148оп		11 ⁻	21 ⁻	23 ⁺	25–25,5	25,5

Примечания: (–) – дефект типа «шейка»; (+) – дефект «выпучивание».

Свая 8оп. По данным УЗ мониторинга (рис. 3) выявлена выраженная зона неоднородности и пониженной прочности бетона на 50–75 % в интервале отметок $-(0,5-1,5)$ м. Дефект распространяется как на внутреннюю область сечения, так и на периферийные участки, то есть захватывает все сечение свай. На отметках в интервале $-(3,5-8)$ м выявлено снижение прочности бетона на сжатие на трассе прозвучивания 3–4 в этом сечении свай на 30 %, а на отметке $-7,5$ м – на 40 % по трассе 3–4 и на 25 % по трассе 1–4. На отметках $-(13,5-14)$ м обнаружено снижение прочности на 30 % по трассе 2–3, на отметках $-(17-20)$ м снижение прочности на 30 % по трассе 1–2, на отметке -19 м снижение прочности по трассе 1–2 достигает 40 %. На отметках $-(24-25,5)$ м зарегистрировано аномальное уменьшение скорости УЗ импульса по трассам 1–4 и 2–4, которое может быть связано со снижением прочности бетона на 50–60 %.

По данным сейсмоакустического метода, на отметках $-(12-13)$ м регистрируется акустический отклик, соответствующий дефекту типа «бочка». Такого типа акустический отклик может также возникать вследствие скачкообразного увеличения плотности – модуля упругости (прочности) бетона.

На рис. 3 на отметке $-(12-14)$ м присутствует локальная область увеличенной скорости УЗ по трассам 1–3, 2–4 и 1–4. На отметке -23 м регистрируется дефект типа «шейка». Данный дефект может являться следствием уменьшения эффективного сечения свай на 10–15 %.

Общая длина свай составляет: 26,0–26,3 м – по проходимости канальных труб; 25 м – по данным сейсмоакустического метода.

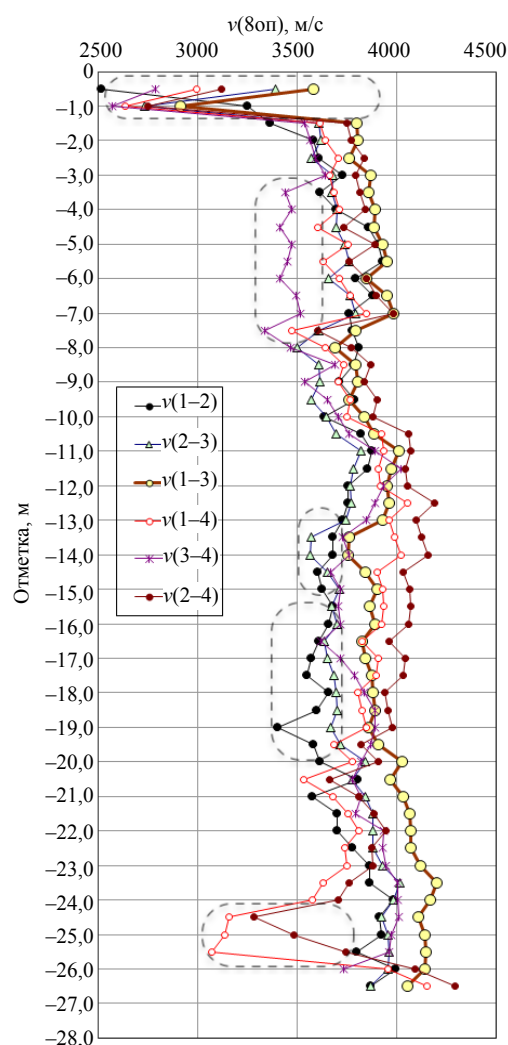


Рис. 3. Ультразвуковой профиль свай 8оп

Fig. 3. Ultrasonic profile of 8op pile

Свая 39оп. Выявлена в испытаниях ультразвуком выраженная зона неоднородности и пониженной прочности бетона на 50–75 % в интервале отметок $-(0,5-1,5)$ м. Дефект регистри-

руется по всем трассам прозвучивания. На отметке –4 м регистрируется снижение прочности на 20–25 % по трассе 1–2. На этой же отметке сейсмоакустическим методом (рис. 4) регистрируется дефект типа «бочка». На отметке –6,5 м снижение прочности на 20–25 % по трассе 1–4. Регистрируется снижение прочности: на отметках –8 и –9 м по отдельным трассам 1–2 и 2–3 на 25–35 %; на отметке –25 м по трассе 2–4 – на 20–25 %.

Длина свай: 28,5–29,0 м – по проходимости канальных труб; 29,5 м – по данным сейсмоакустического метода.

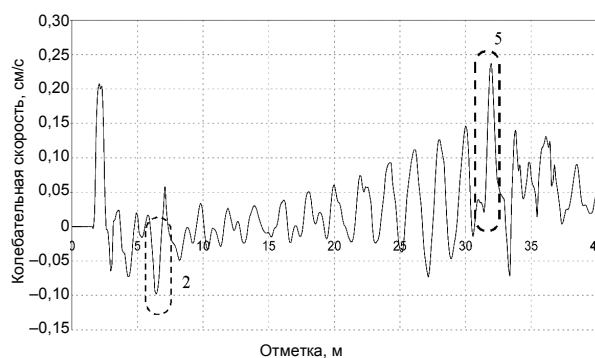


Рис. 4. Рефлектограмма свай 39оп

Fig. 4. Reflectogram of 39op pile

Свая 40оп. Выявленного дефекта, как это было зарегистрировано для свай 8оп и 39оп, в зоне оголовка для свай 40оп не выявлено. До отметки –2 м наблюдается снижение прочности бетона по трассе 1–2 на величину порядка 40–50 %. На отметках –(3–4) м по этой же трассе снижение прочности на 20–25 %. На отметке –7,5 м регистрируется уменьшение прочности по трассе 2–3 на 15–20 %. На отметках –(12–13,5) м выявлено снижение прочности по трассе 3–4 на 15–20 %. На отметках –(6–17) м зафиксировано уменьшение прочности на сжатие по трассе 1–4 на 15–20 %. Значимый дефект регистрируется на отметке –18 м по трассам 1–4 и 2–4, снижение прочности достигает 50–75 %. На этой отметке регистрируется дефект типа «шейка» сейсмоакустическим методом. На отметках –13,5, –(19–21), –(24–27,5) м регистрируется значительная разница (до 15 %) в скорости УЗ импульса, что указывает на неоднородность структуры бетона. На отметках –(21–23) м вероятно увеличение эффективного сечения сваи (дефект типа «бочка») на 15–25 %.

Общая длина свай: 28,0–28,5 м – по проходимости канальных труб; 27–29 м – по данным сейсмоакустического метода.

Свая 66оп. Выявлена в результате ультразвукового мониторинга (рис. 5) зона неоднородности бетона в интервале отметок –(0,5–1,5) м. Дефект занимает 25–40 % площади сечения сваи на этих отметках, с падением прочности до 30 %.

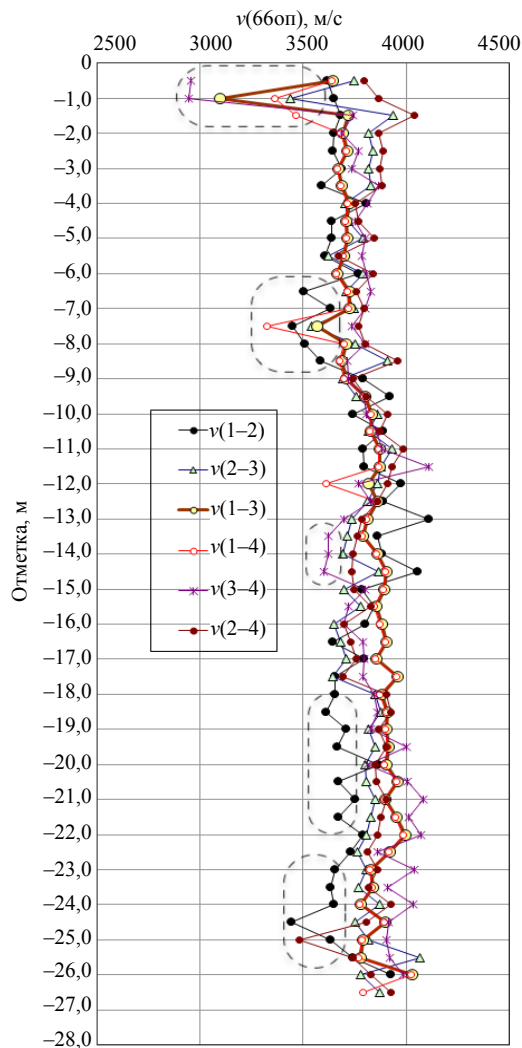


Рис. 5. Ультразвуковой профиль свай 66оп

Fig 5. Ultrasonic profile of 66op pile

На отметке –7,5 м выявлен дефект снижения прочности бетона на сжатие в диапазоне 2–30 % по трассам прозвучивания 1–2, 1–4, 2–3. Акустические отклики (рис. 5) на отметке –10 м интерпретируются как локальное уменьшение сечения сваи в пределах 20 %, прочность и однородность бетона на этих отметках не отличаются от средних показателей по всей длине

свай. На отметках $-(24,5-25)$ м снижение прочности по трассам 1–2 и 2–4 на 20–35 %. С этой же отметки вероятна «бочка» на 15–20 % эффективного сечения. На отметках $-(24-25)$ м обнаружено выпучивание боковой поверхности сваи: ультразвуковые характеристики в этой зоне соответствуют средним значениям.

Длина сваи: 26,0–26,5 м – по проходимости канальных труб; 26 м – по данным сейсмоакустического метода.

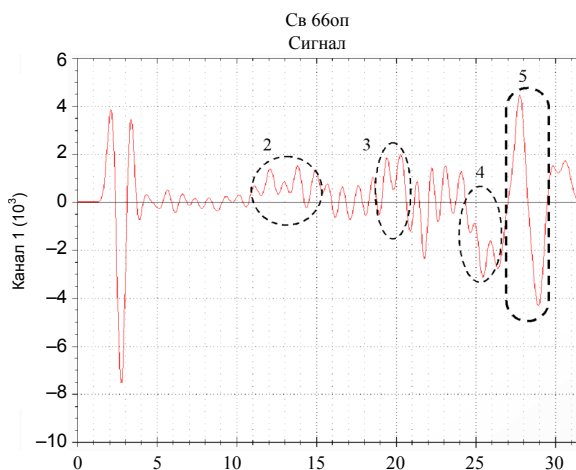


Рис. 6. Рефлектограмма сваи 66оп

Рис. 6. Reflectogram of 66op pile

Свая 121оп. По данным УЗ мониторинга зафиксирована зона неоднородности бетона в интервале отметок 0–(–1,5) м. Дефект распространяется на 20–40 % площади в центральной области сечения сваи на этой отметке. В периферийных областях указанного сечения такого рода дефект не обнаружен. Менее выраженные дефектные участки бетона выявлены на отметках $-(6-6,5)$ м (1–4, 2–3), $-(8,5-9)$ м (1–2), $-(12-12,5)$ м (2–3), $-(15,5)$ м (1–2), $-(20-21)$ м (2–3, 1–2), $-(2,5)$ м (2–4). Дефект занимает 20–25 % площади сечения сваи на указанной отметке. Прочность снижается на указанных направлениях прозвучивания от 20 до 30 %.

Акустический отклик на отметке –12 м интерпретируется как локальное уменьшение сечения сваи в пределах 20 %. Прочность и однородность бетона на этих отметках соответствуют средним показателям по всей длине сваи. На отметке –24 м и до пяти сваи регистрируется «бочка».

Общая длина сваи: 25,0–25,5 м – по проходимости канальных труб; 25,5 м – по данным сейсмоакустического метода.

Свая 148оп. По данным УЗ мониторинга выявлена выраженная зона неоднородности бетона в интервале отметок $-(0,5-2)$ м с максимумом на отметке –1,5 м. Дефект захватывает практически все сечение, исключая часть периферии сечения сваи, распространяясь на 50–70 % площади сечения сваи на указанной отметке. Снижение средней прочности бетона в сечении на отметке –1,5 м по всем траекториям, за исключением 1–2, до 50–70 %. Зарегистрирован дефект структуры бетона на отметке $-(3,5)$ м по трассам прозвучивания 1–3, 2–3 и 1–4, интерпретируемый как снижение прочности бетона сваи на 25–30 %. Присутствует менее выраженный дефект в интервале отметок $-(8-10)$ м со снижением прочности по трассам сечения на 20–25 %. На отметке –25 м регистрируется уменьшение прочности до 30 % по трассе 2–4.

Данные сейсмоакустического метода указывают на вероятное увеличение эффективно-го сечения сваи на 20–25 % в интервале отметок $-(21-24)$ м. Показатели однородности бетона на этих отметках совпадают со средними значениями по стволу сваи. Регистрируется небольшая шейка на отметке –19 м.

Общая длина сваи: 26,0 м – по проходимости канальных труб; 25 м – по данным сейсмоакустического метода.

ВЫВОДЫ

1. Разработана и апробирована на объекте строительства в г. Минске методика четырех-канального межскважинного ультразвукового мониторинга с использованием прибора «Пульсар-2.2» (версия ДБС), с помощью которого выполнен контроль сплошности и однородности опытных буронабивных свай 8оп, 39оп, 40оп, 66оп, 121оп, 148оп. Сваи 8оп, 40оп, 66оп, 121оп, 148оп дополнительно контролировались сейсмоакустическим методом.

2. Для всех перечисленных свай названными методами испытаний не зарегистрированы данные, указывающие на дефрагментацию ствола сваи – присутствие участков, в поперечных сечениях которых полностью отсутствует бетон.

3. Значимый дефект сплошности бетона сваи 40оп, по данным УЗ мониторинга и сейсмоакустического метода, зарегистрирован в интервале отметок $-(17,5-18)$ м, проявляющий себя снижением скорости распространения УЗ импульса от 25 до 50 % по двум направлениям прозвучивания, включая диаметрально. Указанный дефект можно интерпретировать как снижение эффективного сечения сваи до 25–50 % от среднего значения.

4. Для ряда свай (8оп, 39оп, 66оп, 121оп и 148оп) зарегистрированы дефектные участки, значительно отличающиеся по физико-механическим параметрам от среднего значения по продольному сечению сваи. Дефектные участки указанных свай обнаруживались в их верхней части на отметках по глубине от 0 до $-1,5$ м, считая от торцевой поверхности оголовка. При этом различия по физико-механическим параметрам бетона на этих отметках наблюдались и в пределах поперечного сечения свай. Есть основание предположить, что указанный массовый дефект явился следствием испытаний свай нагружением. Для уточнения характера дефекта (образование трещин или диффузные включения в бетон) целесообразно вскрыть грунтовое основание в зоне верхней части указанных свай на глубину до 2 м. Для сваи 40оп такого рода дефект не обнаружен.

5. Для всех свай указанными методами испытаний подтверждено соответствие их фактической длины проектным значениям.

6. Существующие методики обработки данных сейсмоакустического и УЗ методов контроля не позволяют получать более точные оценки состояния свай. Целесообразным видится сопоставление полученных данных с параметрами испытаний методом нагружения и результатами вскрытия дефектных областей ствола свай 8оп, 39оп и 148оп на отметках 0– (-2) м.

ЛИТЕРАТУРА

- Leonovich, S. N. Complex Method of Strength Estimation of the Monolithic Reinforced Concrete Structures / S. N. Leonovich, D. Yu. Snezhkov // Concrete Structures – Stimulators of Development, Proceedings of the Fib Symposium Dubrovnik 2007. Zagreb, 2007. P. 947–954.
- Снежков, Д. Ю. Мониторинг возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович. Минск: БНТУ, 2016. 331 с.
- Снежков, Д. Ю. Неразрушающий контроль бетона в монолитном строительстве / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович. Минск: БНТУ, 2006. 223 с.
- Снежков, Д. Ю. Оценка качества буронабивных свай сейсмоакустическим и межскважинным ультразвуковым методами / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович, Н. А. Будревич, Miao Jijun // Бетон и железобетон. 2022. № 4–5. С. 52–59. <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-52-59>.
- Леонович, С. Н. Анализ эхо-импульсного метода контроля буронабивных свай / С. Н. Леонович, Д. Ю. Снежков, Н. А. Будревич // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2021. № 3 (48). С. 74–82.
- Снежков, Д. Ю. Анализ методик неразрушающих испытаний бетона конструкций по действующим государственным стандартам и нормам Евросоюза / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович, А. В. Вознищик // Наука и техника. 2013. № 2. С. 33–39.
- Снежков, Д. Ю. Неразрушающий контроль бетона монолитных конструкций / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович // Строительная наука и техника. 2009. № 4 (25). С. 76–84.
- Леонович, С. Н. Исследование неравномерности бетона на объекте монолитного строительства комплексным неразрушающим методом контроля / С. Н. Леонович, Д. Ю. Снежков // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2009. № 8 (608). С. 108–115.
- Снежков, Д. Ю. Повышение достоверности контроля прочности бетона неразрушающими методами на основе их комбинирования / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 1. С. 25–32.
- Снежков, Д. Ю. Неразрушающий контроль прочности бетона конструкций сегодня: практический аспект / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович // Современные проблемы внедрения европейских стандартов в области строительства: сб. междунар. науч.-техн. ст. (материалы науч.-метод. конф.), 27–28 мая 2014 г. / ред. кол.: В. Ф. Зверев, С. М. Коледа, С. Н. Делендик. Минск: БНТУ, 2015. Ч. 1. С. 145–157.
- Снежков, Д. Ю. О влиянии армирования при ультразвуковом контроле прочности бетона / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович, Ю. И. Лагун // Строительная наука и техника. 2009. № 3. С. 46–52.
- Снежков, Д. Ю. Мультиволновой ультразвуковой контроль бетона / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. 2017. № 1. С. 13–21.
- Снежков, Д. Ю. Мультиволновой ультразвуковой контроль бетона / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович // Наука и техника. 2017. № 4. С. 289–297.

Поступила 13.04.2022

Подписана к печати 21.06.2022

Опубликована онлайн 31.05.2023

REFERENCES

1. Leonovich S. N., Snezhkov D. Yu. (2007) Complex Method of Strength Estimation of the Monolithic Reinforced Concrete Structures. *Concrete Structures – Stimulators of Development, Proceedings of the fib Symposium Dubrovnik 2007*. Zagreb, 947–954.
2. Snezhkov D. Yu., Leonovich S. N. (2016) *Monitoring of Erected and Operated Reinforced Concrete Structures by Non-Destructive Methods*. Minsk, Belarusian National Technical University, 331 (in Russian).
3. Snezhkov D. Yu., Leonovich S. N. (2006) *Non-Destructive Testing of Concrete in Monolithic Construction*. Minsk, Belarusian National Technical University, 223 (in Russian).
4. Snezhkov D. Yu., Leonovich S. N., Budrevich N. A., Miao Jijun (2022) Evaluation of the Quality of Bored Piles by Seismo-Acoustic and Inter-Well Ultrasonic Methods. *Beton i Zhelezobeton*, 2022, (4–5), 52–55 <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-52-59> (in Russian).
5. Leonovich S. N., Snezhkov D. Yu., Budrevich N. A. (2021) Analysis of the Echo-Pulse Method for Monitoring Bored Piles. *Vestnik Inzhenernoi Shkoly DVFU = FEFU: School of Engineering Bulletin*, (3), 74–82 (in Russian).
6. Snezhkov D. Yu., Leonovich S. N., Voznishchik A. V. (2013) Analysis of Methods for Non-Destructive Testing of Concrete Structures According to the Current National and EU Standards. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (2), 33–39 (in Russian).
7. Snezhkov D. Yu., Leonovich S. N. (2009) Non-Destructive Testing of Concrete of Monolithic Structures. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Building Science and Technology], (4), 76–84 (in Russian).
8. Leonovich, S. N., Snezhkov D. Yu. (2009) Investigation of Unevenness of Concrete At a Monolithic Construction Site by a Complex Non-Destructive Control Method. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*, (8), 108–115 (in Russian).
9. Snezhkov D. Yu., Leonovich S. N. (2018) Increasing the Reliability of Concrete Strength Control by Non-Destructive Methods Based on their Combination. *Promyshlennoye i Grazhdanskoye Stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*, (1), 25–32 (in Russian).
10. Snezhkov D. Yu., Leonovich S. N. (2015) Non-Destructive Testing of the Strength of Concrete Structures Today: a Practical Aspect. Zverev V. F., Koleda S. M., Delendik S. N. *Sovremennyye Problemy Vnedreniya Evropeiskikh Standartov v Oblasti Stroitel'stva: Sb. Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. St. (Materialy Nauch.-Metod. Konf.)*, 27–28 Maya 2014 g. Ch. 1 [Modern Problems of the Implementation of European Standards in the Field of Construction: Collection of International Scientific and Technical Papers (Proceedings of Scientific and Methodological Conference), May 27–28, 2014. Part 1]. Minsk, Belarusian National Technical University, 145–157 (in Russian).
11. Snezhkov D. Yu., Leonovich S. N., Lagun Yu. I. (2009) On the Influence of Reinforcement Du-Ring Ultrasonic Testing of Concrete Strength. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Building Science and Technology], (3), 46–52 (in Russian).
12. Snezhkov D. Yu., Leonovich S. N. (2017) Multiwave Ultrasonic Testing of Concrete. *Vestnik Povolzhskogo Gosudarstvennogo Tekhnologicheskogo Universiteta. Seriya: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii = Vestnik of Volga State University of Technology. Series «Materials. Constructions. Technologies*, (1), 13–21 (in Russian).
13. Snezhkov D. Yu., Leonovich S. N. (2017) Multiwave Ultrasonic Testing of Concrete / D. Yu. Snezhkov, S. N. Leonovich. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (4), 289–297 (in Russian).

Received: 13.04.2022

Accepted: 21.06.2022

Published online: 31.05.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-224-230>

УДК 517.958:519.633

Приближенное решение с помощью элементарных функций смешанной задачи с краевыми условиями второго рода для одномерного волнового уравнения

Канд. физ.-мат. наук, доц. П. Г. Ласый¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. В статье рассматривается смешанная задача с краевыми условиями второго рода для одномерного волнового уравнения. Решение этой задачи записывается в интегральной форме с помощью функции Грина. Для практического использования это решение малоприспособно, так как, во-первых, функция Грина представляет собой тригонометрический ряд и, следовательно, ее вычисление представляет определенные трудности, во-вторых, приходится приближенно вычислять пять интегралов с функцией Грина, входящих в решение задачи, и, в-третьих, крайне затруднительно оценить погрешность приближенного вычисления решения. В настоящей работе преодолены эти трудности, а именно, для функции Грина найдено простое выражение через периодическую кусочно-линейную функцию, интегралы, входящие в приближенное решение, вычисляются с помощью периодических кусочно-линейной, кусочно-квадратичной и кусочно-кубической функций, и, наконец, получена простая и эффективная оценка погрешности аппроксимации. Оценка погрешности линейна по шагам сеток задачи и в любой фиксированный момент времени равномерна по пространственной переменной. Таким образом, приближенное решение задачи со сколь угодно малой погрешностью эффективно выражается через элементарные функции. Приведен пример решения задачи предложенным методом, а также построены графики точного и приближенного решений.

Ключевые слова: волновое уравнение, смешанная задача, краевое условие второго рода, приближенное решение, функция Грина, оценка погрешности

Для цитирования: Ласый, П. Г. Приближенное решение с помощью элементарных функций смешанной задачи с краевыми условиями второго рода для одномерного волнового уравнения / П. Г. Ласый // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 3. С. 224–230. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-224-230>

Approximate Solution Using Elementary Functions of Mixed Problem with Boundary Conditions of the Second Kind for One-Dimensional Wave Equation

Lasy P. G.

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

Abstract. The paper considers a mixed problem with boundary conditions of the second kind for a one-dimensional wave equation. The solution to this problem is written in integral form using the Green's function. For practical use, this solution is of little use, since, firstly, the Green's function is a trigonometric series and, therefore, its calculation presents certain difficulties,

Адрес для переписки

Ласый Петр Григорьевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-82-73
kafvm2@bntu.by

Address for correspondence

Lasy Peter G.
Belarusian National Technical University
9, B. Khmel'nitskogo str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-82-73
kafvm2@bntu.by

secondly, it is necessary to calculate approximately the five integrals with the Green's function included in the solution of the problem, and, thirdly, it is extremely difficult to estimate the error of the approximate calculation of the solution. In this work, these difficulties are overcome, namely, simple expression for the Green's function is found in terms of a periodic piecewise linear function, the integrals included in the approximate solution are calculated using periodic piecewise linear, piecewise quadratic and piecewise cubic functions, and, finally, a simple and efficient estimate of the approximation error is obtained. The error estimate is linear in the grid steps of the problem and uniform in the spatial variable at any fixed point in time. Thus, an approximate solution of the problem with an arbitrarily small error is effectively expressed in terms of elementary functions. An example of solving the problem by the proposed method is given, and graphs of the exact and approximate solutions are plotted.

Keywords: wave equation, mixed problem, boundary condition of the second kind, approximate solution, Green's function, error estimate

For citation: Lasy P. G. (2023) Approximate Solution Using Elementary Functions of Mixed Problem with Boundary Conditions of the Second Kind for One-Dimensional Wave Equation. *Science and Technique*. 22 (3), 224–230. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-224-230> (in Russian)

Введение

Смешанная задача с краевыми условиями второго рода для одномерного волнового уравнения может возникнуть, например, при изучении малых продольных или крутильных колебаний стержня конечной длины с заданной динамической нагрузкой на его концах. Постановки такого рода задач и обсуждение методов их решения можно найти в [1–4]. Другим примером могут служить колебания силы тока или напряжения, возникающие в прямолинейном проводнике конечной длины. Телеграфное уравнение, описывающее эти колебания, переходит в волновое в случае линии без искажений. В [5, 6] приведены примеры использования этих уравнений в электротехнике и электросвязи. В работах [7–9] найдены точные и приближенные решения с помощью специальных функций волнового и телеграфного уравнений в случае краевых условий первого рода.

Основная часть

Рассмотрим смешанную краевую задачу с краевыми условиями второго рода для одномерного волнового уравнения

$$\partial_{tt}u = a^2 \partial_{xx}u + q(x, t) \quad (1)$$

в полосе

$$\Pi_{l\infty} = \{(x, t) \mid x \in [0, l], t \in [0, +\infty)\}$$

при заданных начальных

$$u(x, 0) = f(x), \partial_t u(x, 0) = F(x), x \in [0, l] \quad (2)$$

и краевых условиях второго рода

$$\partial_x u(0, t) = \varphi_0(t), \partial_x u(l, t) = \varphi_l(t), t \in [0, +\infty), \quad (3)$$

где функцию $f(x)$ мы будем предполагать дифференцируемой, а ее производную – удовлетворяющей условию Липшица с константой L_f на отрезке $[0, l]$, функции $F(x)$, $\varphi_0(t)$, $\varphi_l(t)$ будем считать удовлетворяющими условию Липшица с константами L_F , L_{φ_0} , L_{φ_l} на соответствующих промежутках. Заметим здесь, что для функции $f(x)$ также будет выполнено условие Липшица с константой $L_f = \max_{x \in [0, l]} |f'(x)|$. Предположим также, что и функция $q(x, t)$ удовлетворяет условию Липшица с постоянной L_q в полосе $\Pi_{l\infty}$.

Известно [10], что точное решение задачи (1)–(3) представляется в виде

$$\begin{aligned} u(x, t) = & \partial_t \int_0^l f(\xi) G(x, \xi, t) d\xi + \\ & + \int_0^l F(\xi) G(x, \xi, t) d\xi - a^2 \int_0^t \varphi_0(t-s) G(x, 0, s) ds + \\ & + a^2 \int_0^t \varphi_l(t-s) G(x, l, s) ds + \iint_{\Pi_l} q(\xi, t-s) G(x, \xi, s) d\xi ds. \end{aligned}$$

$$\text{Здесь } G(x, \xi, t) = \frac{t}{l} + \frac{2}{a\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos \omega n x \cos \omega n \xi \times$$

$\times \sin a \omega n t$, $\omega = \frac{\pi}{l}$ – функция Грина этой задачи,

$$\Pi_l = \{(\xi, s) \mid \xi \in [0, l], s \in [0, t]\}.$$

Поскольку

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin nz}{n} = \frac{1}{2}(\pi - z), \quad z \in (0, \pi],$$

то после несложных преобразований функция Грина приводится к виду

$$G(x, \xi, t) = \frac{t}{l} + \frac{1}{2\pi a} G^1(x, \xi, t),$$

где $G^1(x, \xi, t) = \sum_{\alpha_1 + \alpha_2 = 0}^2 g_1(\omega((-1)^{\alpha_1} x + (-1)^{\alpha_2} \xi + at))$

и $g_1(z) - 2\pi$ -периодическая функция, которая задана выражением

$$g_1(z) = \frac{\operatorname{sgn} z}{2}(\pi - |z|), \quad z \in [-\pi, \pi]. \quad (4)$$

Таким образом, функция Грина задачи выражается через кусочно-линейную функцию $g_1(z)$.

Заметим здесь попутно для дальнейшего, что первообразной функции $g_1(z)$ на всей числовой оси, исключая точки, кратные 2π , является 2π -периодическая функция

$$g_2(z) = -\frac{1}{4}(\pi - |z|)^2, \quad z \in [-\pi, \pi], \quad (5)$$

а первообразной последней на всей оси служит также 2π -периодическая функция

$$g_3(z) = \frac{1}{12} z(|z| - \pi)(2\pi - |z|), \quad z \in [-\pi, \pi]. \quad (6)$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} u(f, x, t) &= \partial_t \int_0^l f(\xi) G(x, \xi, t) d\xi, \quad u(F, x, t) = \\ &= \int_0^l F(\xi) G(x, \xi, t) d\xi, \quad u(\varphi_0, x, t) = \\ &= -a^2 \int_0^t \varphi_0(t-s) G(x, 0, s) ds, \quad u(\varphi_l, x, t) = \\ &= a^2 \int_0^t \varphi_l(t-s) G(x, l, s) ds, \quad u(q, x, t) = \\ &= \iint_{\Pi_t} q(\xi, t-s) G(x, \xi, s) d\xi ds. \end{aligned}$$

Значит:

$$u(x, t) = u(f, x, t) + u(F, x, t) + u(\varphi_0, x, t) + u(\varphi_l, x, t) + u(q, x, t). \quad (7)$$

Найдем приближенные выражения для каждой функции в правой части (7). Первую из них сначала преобразуем. Первообразная функции $G^1(x, \xi, t)$ по переменной ξ равна $\frac{1}{\omega} G_\xi^2(x, \xi, t)$, где

$$\begin{aligned} G_\xi^2(x, \xi, t) &= \\ &= \sum_{\alpha_1 + \alpha_2 = 0}^2 (-1)^{\alpha_2} g_2(\omega((-1)^{\alpha_1} x + (-1)^{\alpha_2} \xi + at)). \end{aligned}$$

Тогда после интегрирования по частям получим:

$$\begin{aligned} \int_0^l f(\xi) G(x, \xi, t) d\xi &= \int_0^l f(\xi) \left(\frac{t}{l} + \frac{1}{2\pi a} G^1(x, \xi, t) \right) d\xi = \\ &= \frac{t}{l} \int_0^l f(\xi) d\xi + \frac{1}{2\pi a \omega} \times \\ &\times \left(f(\xi) G_\xi^2(x, \xi, t) \Big|_0^l - \int_0^l f'(\xi) G_\xi^2(x, \xi, t) d\xi \right). \end{aligned}$$

Отсюда

$$\begin{aligned} u(f, x, t) &= \frac{1}{l} \int_0^l f(\xi) d\xi + \frac{1}{2\pi} \times \\ &\times \left(f(\xi) \tilde{G}^1(x, \xi, t) \Big|_0^l - \int_0^l f'(\xi) \tilde{G}^1(x, \xi, t) d\xi \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где $\tilde{G}^1(x, \xi, t) = \sum_{\alpha_1 + \alpha_2 = 0}^2 (-1)^{\alpha_2} g_1(\omega((-1)^{\alpha_1} x + (-1)^{\alpha_2} \xi + at))$. Возьмем на отрезке $[0, l]$ равномерную сетку с узлами в точках $x_k = kh_l$, $k = \overline{0, n_l}$, где $h_l = \frac{l}{n_l}$ – шаг сетки и заменим под знаком каждого интеграла в правой части формулы (8) на каждом из частичных отрезков $[x_{k-1}, x_k]$, $k = \overline{1, n_l}$ функции $f(\xi)$ и $f'(\xi)$ их значениями в средней точке $x_{k-0,5} = x_{k-1} + 0,5h_l$ отрезка. Тогда, учитывая, что первообразная функции $\tilde{G}^1(x, \xi, t)$ по переменной ξ равна $\frac{1}{\omega} G_t^2(x, \xi, t)$, где

$$G_t^2(x, \xi, t) = \sum_{\alpha_1 + \alpha_2 = 0}^2 g_2(\omega((-1)^{\alpha_1} x + (-1)^{\alpha_2} \xi + at)),$$

мы находим приближенное представление для функции (8):

$$u_{n_l}(f, x, t) = \frac{1}{n_l} \sum_{k=1}^{n_l} f(x_{k-0,5}) + \frac{1}{2\pi} \times \left(f(\xi) \tilde{G}^1(x, \xi, t) \Big|_0^l - \frac{1}{\omega} \sum_{k=1}^{n_l} f'(x_{k-0,5}) G_t^2(x, \xi, t) \Big|_{x_{k-1}}^{x_k} \right). \quad (9)$$

Оценим погрешность приближенной формулы (9), принимая во внимание условие Липшица для функций $f(x)$ и $f'(x)$, а также ограниченность функции $\tilde{G}^1(x, \xi, t)$ по абсолютной величине числом 2π . Так как

$$u(f, x, t) - u_{n_l}(f, x, t) = \frac{1}{l} \sum_{k=1}^{n_l} \int_{x_{k-1}}^{x_k} (f(\xi) - f(x_{k-0,5})) d\xi -$$

$$- \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^{n_l} \int_{x_{k-1}}^{x_k} (f'(\xi) - f'(x_{k-0,5})) \tilde{G}^1(x, \xi, t) d\xi,$$

то

$$|u(f, x, t) - u_{n_l}(f, x, t)| \leq \frac{1}{l} \sum_{k=1}^{n_l} \int_{x_{k-1}}^{x_k} |f(\xi) - f(x_{k-0,5})| d\xi +$$

$$+ \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^{n_l} \int_{x_{k-1}}^{x_k} |f'(\xi) - f'(x_{k-0,5})| |\tilde{G}^1(x, \xi, t)| d\xi \leq$$

$$\leq \frac{1}{l} \sum_{k=1}^{n_l} \int_{x_{k-1}}^{x_k} L_f |\xi - x_{k-0,5}| d\xi +$$

$$+ \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^{n_l} \int_{x_{k-1}}^{x_k} L_{f'} |\xi - x_{k-0,5}| 2\pi d\xi \leq \left(\frac{L_f}{l} + L_{f'} \right) \times$$

$$\times \sum_{k=1}^{n_l} \int_{x_{k-1}}^{x_k} \frac{h_l}{2} d\xi = \frac{1}{2} (L_f + lL_{f'}) h_l.$$

Аналогично находится аппроксимация и оценивается ее погрешность для функции

$$u(F, x, t) = \int_0^l F(\xi) \left(\frac{t}{l} + \frac{1}{2\pi a} G^1(x, \xi, t) \right) d\xi \quad (10)$$

на той же сетке. Здесь аппроксимирующая функция равна

$$u_{n_l}(F, x, t) = \sum_{k=1}^{n_l} F(x_{k-0,5}) \times \left(\frac{h_l t}{l} + \frac{1}{2\pi a \omega} G_\xi^2(x, \xi, t) \Big|_{x_{k-1}}^{x_k} \right) \quad (11)$$

и ошибка аппроксимации имеет оценку

$$|u(F, x, t) - u_{n_l}(F, x, t)| \leq \frac{1}{2} L_F \left(t + \frac{l}{a} \right) h_l.$$

Займемся теперь функцией

$$u(\varphi_0, x, t) = -a^2 \int_0^t \varphi_0(t-s) \left(\frac{s}{l} + \frac{1}{2\pi a} G^1(x, 0, s) \right) ds. \quad (12)$$

Здесь для аппроксимации мы будем пользоваться временной сеткой с узлами в точках $t_k = kh_l$, $k = \overline{0, n_l}$, где $h_l = \frac{t}{n_l}$ – шаг сетки.

В интеграле в правой части формулы (12) на каждом из частичных отрезков $[t_{k-1}, t_k]$, $k = \overline{1, n_l}$ заменим функцию $\varphi_0(t-s)$ ее значением в средней точке $t_{k-0,5} = t_{k-1} + 0,5h_l$ отрезка. В результате, учитывая, что первообразная для функции $G^1(x, \xi, t)$ по переменной t равна $\frac{1}{a\omega} G_t^2(x, \xi, t)$, получим

$$u_{n_l}(\varphi_0, x, t) = -\frac{a^2}{2} \times \quad (13)$$

$$\times \sum_{k=1}^{n_l} \varphi_0(t - t_{k-0,5}) \left(\frac{2k-1}{l} h_l^2 + \frac{1}{\pi a^2 \omega} G_t^2(x, 0, s) \Big|_{t_{k-1}}^{t_k} \right).$$

Оценим погрешность вычисления функции (12) по формуле (13). Поскольку функция $\varphi_0(t)$ удовлетворяет условию Липшица и $|G^1(x, \xi, t)| \leq 2\pi$ при всех x, ξ, t , то из равенства

$$u(\varphi_0, x, t) - u_{n_l}(\varphi_0, x, t) =$$

$$= -a^2 \sum_{k=1}^{n_l} \int_{t_{k-1}}^{t_k} (\varphi_0(t-s) - \varphi_0(t - t_{k-0,5})) \times \left(\frac{s}{l} + \frac{1}{2\pi a} G^1(x, 0, s) \right) ds$$

следует, что

$$\begin{aligned} |u(\varphi_0, x, t) - u_{n_t}(\varphi_0, x, t)| &\leq a^2 \sum_{k=1}^{n_t} \int_{t_{k-1}}^{t_k} |\varphi_0(t-s) - \varphi_0(t-t_{k-0,5})| \left(\frac{s}{l} + \frac{1}{2\pi a} |G^1(x, 0, s)| \right) ds \leq \\ &\leq a^2 \sum_{k=1}^{n_t} \int_{t_{k-1}}^{t_k} L_{\varphi_0} |s - t_{k-0,5}| \left(\frac{s}{l} + \frac{1}{a} \right) ds \leq a^2 L_{\varphi_0} \sum_{k=1}^{n_t} \int_{t_{k-1}}^{t_k} \frac{h_t}{2} \left(\frac{s}{l} + \frac{1}{a} \right) ds = \\ &= \frac{1}{2} a^2 L_{\varphi_0} h_t \sum_{k=1}^{n_t} \left(\frac{2k-1}{2l} h_t^2 + \frac{h_t}{a} \right) = \frac{1}{2} a^2 L_{\varphi_0} h_t \left(\frac{n_t^2 h_t^2}{2l} + \frac{t}{a} \right) = \frac{1}{2} a^2 L_{\varphi_0} \left(\frac{t^2}{2l} + \frac{t}{a} \right) h_t. \end{aligned}$$

Для функции

$$u(\varphi_l, x, t) = a^2 \int_0^t \varphi_l(t-s) \left(\frac{s}{l} + \frac{1}{2\pi a} G^1(x, l, s) \right) ds, \quad (14)$$

пользуясь той же временной сеткой, мы получим аппроксимацию

$$\begin{aligned} u_{n_t}(\varphi_l, x, t) &= \frac{a^2}{2} \sum_{k=1}^{n_t} \varphi_l(t-t_{k-0,5}) \times \\ &\times \left(\frac{2k-1}{l} h_t^2 + \frac{1}{\pi a^2 \omega} G_t^2(x, l, s) \right) \Big|_{t_{k-1}}^{t_k} \end{aligned} \quad (15)$$

с оценкой погрешности

$$|u(\varphi_l, x, t) - u_{n_t}(\varphi_0, x, t)| \leq \frac{1}{2} a^2 L_{\varphi_l} \left(\frac{t^2}{2l} + \frac{t}{a} \right) h_t.$$

Найдем, наконец, приближенное представление для функции

$$u(q, x, t) = \iint_{\Pi_{lt}} q(\xi, t-s) \left(\frac{s}{l} + \frac{1}{2\pi a} G^1(x, \xi, s) \right) d\xi ds. \quad (16)$$

Набросим на прямоугольник Π_{lt} сетку с узлами в точках (x_i, t_j) , где x_i, t_j – те же узлы по переменным x и t соответственно, которые мы использовали выше. Заменим, далее, в (16) под знаком двойного интеграла в каждом из $n_l n_t$ прямоугольников $\Pi_{ij} = \{(\xi, s) | x_{i-1} \leq \xi \leq x_i, t_{j-1} \leq s \leq t_j\}$ функцию $q(\xi, t-s)$ ее значением в средней точке $(x_{i-0,5}, t_{j-0,5})$. Тогда, учитывая, что первообразная по переменным ξ и t функции $G^1(x, \xi, t)$ равна $\frac{1}{a\omega^2} G_{\xi t}^3(x, \xi, t)$, где

$$\begin{aligned} G_{\xi t}^3(x, \xi, t) &= \\ &= \sum_{\alpha_1 + \alpha_2 = 0}^2 (-1)^{\alpha_2} g_3(\omega((-1)^{\alpha_1} x + (-1)^{\alpha_2} \xi + at)), \end{aligned}$$

получим следующее приближенное выражение для функции $u(q, x, t)$:

$$\begin{aligned} u_{n_l n_t}(q, x, t) &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_l} \sum_{j=1}^{n_t} q(x_{i-0,5}, t-t_{j-0,5}) \times \\ &\times \left(\frac{2j-1}{l} h_t h_l^2 + \frac{1}{\pi a^2 \omega^2} G_{\xi t}^3(x, \xi, s) \Big|_{x_{i-1}}^{x_i} \Big|_{t_{j-1}}^{t_j} \right). \end{aligned} \quad (17)$$

Учитывая, далее, что

$$u(q, x, t) - u_{n_l n_t}(q, x, t) =$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{i=1}^{n_l} \sum_{j=1}^{n_t} \iint_{\Pi_{ij}} (q(\xi, t-s) - q(x_{i-0,5}, t-t_{j-0,5})) \times \\ &\times \left(\frac{s}{l} + \frac{1}{2\pi a} G^1(x, \xi, s) \right) d\xi ds, \end{aligned}$$

находим

$$\begin{aligned} |u(q, x, t) - u_{n_l n_t}(q, x, t)| &\leq \sum_{i=1}^{n_l} \sum_{j=1}^{n_t} \iint_{\Pi_{ij}} |q(\xi, t-s) - \\ &- q(x_{i-0,5}, t-t_{j-0,5})| \left(\frac{s}{l} + \frac{1}{2\pi a} |G^1(x, \xi, s)| \right) d\xi ds \leq \\ &\leq \frac{1}{2} L_q (h_l + h_t) \sum_{i=1}^{n_l} \sum_{j=1}^{n_t} \iint_{\Pi_{ij}} \left(\frac{s}{l} + \frac{1}{a} \right) d\xi ds = \frac{1}{2} L_q (h_l + h_t) \times \\ &\times \sum_{i=1}^{n_l} \sum_{j=1}^{n_t} \left(\frac{2j-1}{2l} h_t^2 h_l + \frac{h_t h_l}{a} \right) = \frac{1}{2} L_q \left(\frac{t^2}{2} + \frac{lt}{a} \right) (h_l + h_t). \end{aligned}$$

Сформулируем теперь результат наших изысканий в виде следующего утверждения.

Теорема. При сформулированных выше предположениях на функции $q(x, t)$, $f(x)$, $F(x)$, $\varphi_0(t)$, $\varphi_l(t)$ точное решение задачи (1)–(3) при любом $x \in [0, l]$ и любом фиксированном $t > 0$ находится по формулам (7), (8), (10), (12), (14), (16), а приближенное – по формуле

$$u_{n_l n_t}(x, t) = u_{n_l}(f, x, t) + u_{n_l}(F, x, t) + \\ + u_{n_l}(\varphi_0, x, t) + u_{n_l}(\varphi_l, x, t) + u_{n_l n_t}(q, x, t), \quad (18)$$

где функции в правой части имеют соответственно выражения (9), (11), (13), (15), (17). Суммарная абсолютная погрешность аппроксимации имеет оценку

$$|u(x, t) - u_{n_l n_t}(x, t)| \leq \frac{1}{2} \left(L_f + l L_{f'} + L_F \left(t + \frac{l}{a} \right) \right) h_l + \\ + \frac{1}{2} a^2 (L_{\varphi_0} + L_{\varphi_l}) \left(\frac{t^2}{2l} + \frac{t}{a} \right) h_t + \\ + \frac{1}{2} L_q \left(\frac{t^2}{2} + \frac{lt}{a} \right) (h_l + h_t),$$

т. е. погрешность линейна относительно шагов сеток по каждой переменной и равномерна по переменной x .

Заметим, что формулы (9), (11), (13), (15) и (17) являются эффективными, так как для вычисления функций $\tilde{G}^1(x, \xi, t)$, $G_{\xi}^2(x, \xi, t)$, $G_t^2(x, \xi, t)$, $G_{\xi}^3(x, \xi, t)$ используются 2π -периодические функции $g_1(z)$, $g_2(z)$ и $g_3(z)$, заданные формулами (4), (5) и (6) соответственно. Первая из них кусочно-линейная, вторая – кусочно-квадратичная, третья – кусочно-кубическая. Они заданы на отрезке $[-\pi, \pi]$. Для вычисления значений этих функций в произвольной точке $z \in \mathbb{R}$ следует, учитывая их перио-

дичность, заменить в их выражениях z на $\gamma(z)$, где

$$\gamma(z) = \operatorname{sgn}(z) \left(|z| - 2\pi \left\lfloor \frac{|z|}{2\pi} \right\rfloor \right).$$

Пример. Найти точное и приближенное решение следующей смешанной задачи для волнового уравнения

$$\partial_{xx} u = 4 \partial_{xt} u + \pi^2 (16 \sin 2\pi x - 9 \cos 3\pi t),$$

$$u(x, 0) = 1 + x^2 + \sin 2x + \sin 2\pi x, \quad \partial_t u(x, 0) = \\ = -4x + 4 \cos 2x, \quad x \in [0, 1],$$

$$\partial_x u(0, t) = 2\pi - 4t + 2 \cos 4t, \quad \partial_x u(1, t) = \\ = 2\pi + 2(1 - 2t) + 2 \cos 2(1 + 2t), \quad t \in [0, +\infty).$$

Точным решением этой задачи является функция

$$u(x, t) = (x - 2t)^2 + \sin 2(x + 2t) + \\ + \sin 2\pi x + \cos 3\pi t,$$

в чем можно убедиться непосредственной проверкой. Вычисление приближенного решения задачи по формуле (18) в квадрате $\{(x, t) | x \in [0, 1], t \in [0, 1]\}$ при $n_l = n_t = 50$ дает максимальную погрешность, не превышающую 0,0046, что является вполне приемлемым для сеток задачи с суммой шагов $h_l + h_t = 0,04$. Графики точного и приближенного решений задачи имеют вид:

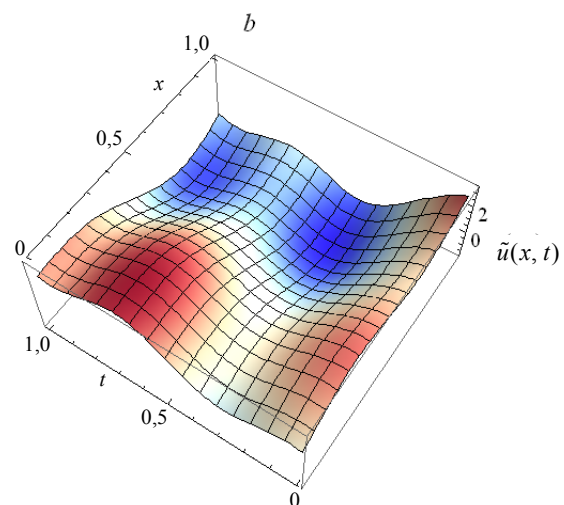
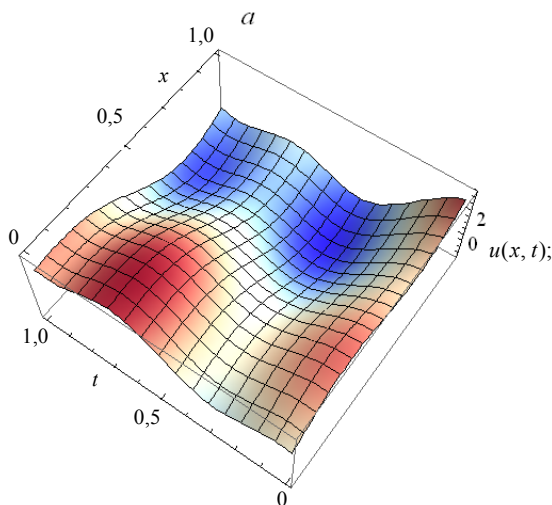


Рис. 1. Графики решений: а – точного $u(x, t)$; б – приближенного $\tilde{u}(x, t) = u_{50,50}(x, t)$

Fig. 1. Solution graphs: а – exact one $u(x, t)$; б – approximate one $\tilde{u}(x, t) = u_{50,50}(x, t)$

ВЫВОД

В работе найдено точное и приближенное решения смешанной задачи с краевыми условиями второго рода для одномерного волнового уравнения. Эти решения эффективно вычисляются через три 2π -периодические функции, одна из которых является кусочно-линейной, вторая – кусочно-квадратичной, а третья – кусочно-кубической. Получена оценка погрешности приближенного решения, линейная относительно шагов сеток по каждой переменной задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кошляков, Н. С. Дифференциальные уравнения математической физики / Н. С. Кошляков, Э. Б. Глинер, М. М. Смирнов. М.: ГИФМЛ, 1962. 767 с.
2. Владимиров, В. С. Уравнения математической физики: учеб. / В. С. Владимиров, В. В. Жаринов. М.: Физматлит, 2000. 400 с.
3. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. М.: Наука, 2004. 798 с.
4. Мышкис, А. Д. Лекции по высшей математике / А. Д. Мышкис. СПб.: Лань, 2007. 688 с.
5. Остапенко, В. Телеграфное уравнение. Краевые задачи / В. Остапенко. Саарбрюккен: LAP Lambert Academic Pub, 2012. 272 с.
6. Дубнищев, Ю. Н. Колебания и волны / Ю. Н. Дубнищев. СПб.: Лань, 2011. 384 с.
7. Ласый, П. Г. Приближенное решение одной задачи об электрических колебаниях в проводах с помощью полилогарифмов / П. Г. Ласый, И. Н. Мелешко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 4. С. 334–340. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-4-334-340>.
8. Ласый, П. Г. Применение полилогарифмов к приближенному решению неоднородного телеграфного уравнения для линии без искажений / П. Г. Ласый, И. Н. Мелешко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 5. С. 413–421. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-413-421>.
9. Ласый, П. Г. Приближенное решение смешанной задачи для телеграфного уравнения с однородными краевыми условиями первого рода с помощью специальных функций / П. Г. Ласый, И. Н. Мелешко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 2. С. 152–163. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-152-163>.
10. Полянин, А. Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики / А. Д. Полянин. М.: Физматлит, 2001. 576 с.

REFERENCES

1. Koshlyakov N. S., Gliner E. B., Smirnov M. M. (1962) *Differential Equations of Mathematical Physics*. Moscow, State Publishing House of Physical and Mathematical Literature, 767 (in Russian).
2. Vladimirov V. S., Zharinov V. V. (2000) *Equations of Mathematical Physics*. Moscow, Fizmatlit Publ, 400 (in Russian).
3. Tikhonov A. N., Samarsky A. A. (2004) *Equations of Mathematical Physics*. Moscow, Nauka Publ, 798 (in Russian).
4. Myshkis A. D. (2007) *Lectures on Higher Mathematics*. Saint-Petersburg, Lan Publ, 688 (in Russian).
5. Ostapenko V. (2012) *Telegraph Equation. Boundary Problems*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 272 (in Russian).
6. Dubnishchev Yu. N. (2011) *Vibrations and Waves*. Saint-Petersburg, Lan Publ, 384 (in Russian).
7. Lasy P. G., Meleshko I. N. (2017) Approximate Solution of One Problem on Electrical Oscillations in Wires with the Use of Polylogarithms. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (4), 334–340. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-4-334-340> (in Russian).
8. Lasy P. G., Meleshko I. N. (2019) Application of Polylogarithms to the Approximate Solution of the Inhomogeneous Telegraph Equation for the Distortionless Line. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (5), 413–421. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-413-421> (in Russian).
9. Lasy P. G., Meleshko I. N. (2021) Approximate Solution of Mixed Problem for Telegrapher Equation with Homogeneous Boundary Conditions of First Kind Using Special Functions. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (2), 152–163. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-152-163> (in Russian).
10. Polyanin A. D. (2001) *Handbook of Linear Equations of Mathematical Physics*. Moscow, Fizmatlit Publ, 576 (in Russian).

Received: 10.01.2023

Accepted: 14.03.2023

Published online: 31.05.2023

Поступила 10.01.2023
Подписана к печати 14.03.2023
Опубликована онлайн 31.05.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-231-243>

УДК 004.4+621.1+621.373.8

Моделирование процессов возникновения и роста фрактальных структур и дефектов камер теплоэнергетических установок

Часть 1

Канд. техн. наук Т. В. Рыжова¹⁾, Д. Н. Бухаров²⁾, докт. физ.-мат. наук, проф. С. М. Аракелян²⁾

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

²⁾Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (Владимир, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Рассматривается моделирование возникновения и роста возможных фрактальных структур и дефектов на внутренней поверхности камер тепловых энергетических установок, допускающих контролирование и регулирование развития таких стохастических динамических процессов. Речь идет об использовании процедур моделирования для приводимого анализа, имеющих достаточно универсальный характер в рамках определенных подходов. Приведено общее качественное рассмотрение моделирования процессов как осаждения материалов на твердую поверхность различных сложных конфигураций, так и возникновения ее трещиноватости и дефектов фрактальных типов. В первой части проводится аналогия процессов возникновения и роста фрактальных структур и дефектов камер с лазерными процессами управляемого осаждения веществ на поверхность твердого тела и роста ее трещиноватости. Развита модель возникновения и роста фрактальных неоднородностей разного типа и конфигураций на твердой поверхности с выявлением возможности их предварительного мониторинга на начальном этапе появления. При этом проанализированы как различные поверхности в виде покрытий, так и образование трещиноватости и кластерных зон неоднородностей и дефектов. Акцент в ходе исследований сделан на анализе регулируемой их структуры, а также на динамике роста трещиноватости и кластерных зон неоднородностей и дефектов в определенном направлении. На начальном этапе осуществлялся мониторинг указанного процесса образования в пространстве трещиноватости и кластерных зон неоднородностей и дефектов с различным масштабированием: нано- и микромасштабами. Данное исследование проведено в рамках аналогии в условиях: во-первых, заданного управления характеристиками подобных объектов в соответствующем лазерном эксперименте; во-вторых, наличия реальной возможности обеспечения их образования на внутренних поверхностях камер при контакте с рабочим веществом; в-третьих, возможности влияния таких структур на эффективность работы тепловых энергетических установок разного типа в контексте достижения нужной направленности и/или нежелательности изменения показателей и характеристик установок с учетом закономерностей технической термодинамики.

Ключевые слова: дефекты и неоднородности поверхности, моделирование, камеры теплоэнергетических установок, фрактальная структура, аналогия с лазерными процессами, заданное осаждение структур, предварительная диагностика, управляемое воздействие, влияние на режим работы

Для цитирования: Рыжова, Т. В. Моделирование процессов возникновения и роста фрактальных структур и дефектов камер теплоэнергетических установок. Часть 1 / Т. В. Рыжова, Д. Н. Бухаров, С. М. Аракелян // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 3. С. 231–243. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-231-243>

Адрес для переписки

Рыжова Татьяна Викторовна
Белорусский национальный технический университет
Партизанский проспект, 77,
220107, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 250-36-95
tatsiana.rizhova@yandex.by

Address for correspondence

Ryzhova Tatiana V.
Belarusian National Technical University
77, Partizansky Ave.,
220107, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 250-36-95
tatsiana.rizhova@yandex.by

Modeling Processes of Emergence and Growth of Fractal Structures and Chamber Defects of Thermal Power Units

Part 1

T. V. Ryzhova¹⁾, D. N. Bukharov²⁾, S. M. Arakelyan²⁾

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

²⁾Vladimir State University A. G. and N. G. Stoletovs (Vladimir, Russian Federation)

Abstract. The paper considers modeling the emergence and growth of possible fractal structures and defects on the inner surface of the chambers of thermal power units, which allow control and regulation of the development of such stochastic dynamic processes. We are talking about the use of modeling procedures for the given analysis, which are quite universal in the framework of certain approaches. A general qualitative consideration of the modeling of processes such as the deposition of materials on a solid surface of various complex configurations, and the occurrence of its fracturing and defects of fractal types, is given. In the first part, we consider an analogy between the processes of the emergence and growth of fractal structures and chamber defects with laser processes of controlled deposition of substances on the surface of a solid body and the growth of its fracturing. A number of models have been developed for the emergence and growth of fractal inhomogeneities of various types and configurations on a solid surface with identification of the possibility of their preliminary monitoring at the initial stage of their appearance. At the same time, both various surfaces in the form of coatings and the formation of fracturing and cluster zones of inhomogeneities and defects have been analyzed. The emphasis in the course of research has been made both on the analysis of their regulated structure, and also on the dynamics of the growth of fracturing and cluster zones of heterogeneities and defects in a certain direction. At the initial stage, the indicated process of formation of fractures and cluster zones of inhomogeneities and defects in space was monitored with different scaling: nano- and microscales. This study has been carried out within the framework of an analogy under the following conditions: firstly, given control over the characteristics of similar objects in the corresponding laser experiment; secondly, the presence of a real possibility of ensuring their formation on the inner surfaces of the chambers in contact with the working substance; thirdly, the possibility of such structures influencing on the efficiency of various types of thermal power units in the context of achieving the desired direction and/or undesirability of changing the indicators and characteristics of units taking into account the laws of technical thermodynamics.

Keywords: defects and inhomogeneities of surfaces, modeling, chambers for thermal power units, fractal structure, analogy with laser processes, controlled target deposition of structures, preliminary diagnostics, controllable impact, influence on working regime

For citation: Ryzhova T. V., Bukharov D. N., Arakelyan S. M. (2023) Modeling Processes of Emergence and Growth of Fractal Structures and Chamber Defects of Thermal Power Units. Part 1. *Science and Technique*. 22 (3), 231–243. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-231-243> (in Russian)

Введение

Актуальность мониторинга и возможности получения предварительной оценки состояния внутренних поверхностей энергоустановок (в аспекте эффективности их работы и прогнозирования безопасности работы в различных условиях и режимах) очевидна и требует использования методов предсказательного моделирования [1–3]. Важно проследить сходную динамику и аналогию формирования подобных структур, с одной стороны, в демонстрационных исследованиях и управляемом моделировании при лазерном поверхностном осаждении веществ разного состава и при воздействии лазерного излучения на подложку и материалы [4, 5], включая также общие закономерности процессов в газожидкостных капельно-коллоидных системах с соответствующими физико-химическими процессами (ср. с [6–11]). Но,

с другой стороны, эти процессы развиваются и в реальных высокотемпературных тепло-технологических жидкостно-газовых тепловых энергетических машинах разного типа [1, 3].

В первом случае удастся провести численное и имитационное моделирование регулируемым образом возникающих динамических структур и неустойчивостей, а также разработать методы управления их конфигурацией и характеристиками в тестовых экспериментах по выявлению особенностей их жизненного цикла в условиях заданного регулирования развития динамических процессов [4, 5, 11, 12].

Во втором случае такие явления взаимодействия рабочего вещества в конкретных энергетических установках с внутренней поверхностью их камер могут приводить к появлению определенных фиксированных стационарных зон локализации дефектов и трещиноватости разной конфигурации в них при состоянии ра-

бочего вещества в разных физических условиях, которое выпадает из непрерывного цикла динамических процессов теплонагрева при эксплуатации тепловых установок [6, 7]. Это, с одной стороны, может приводить к понижению эффективности и КПД тепловых машин. С другой стороны, такие исходные локализованные зоны (даже незначительные), являясь по сути дефектами, стимулируют дальнейшее развитие неоднородностей и трещин на внутренних поверхностях тепловых камер, которые со временем могут трансформироваться в механические повреждения и разрушения [1, 3, 12]. Для тепловых установок это может приводить к катастрофическим последствиям.

Поэтому предварительная диагностика и моделирование таких очагов неоднородностей в процессах их возникновения и разрушающего контроля – неотъемлемая часть эксплуатации тепловых установок. Рассмотрение удобно производить по аналогии с лазерными экспериментами с разными объектами и материалами, в которых можно детально исследовать подобные явления с неустойчивостями и неоднородностями и управлять ими в заданном направлении уже на начальной стадии их возникновения в пространственных микро- и наномасштабах [4, 5, 10–12].

Большое внимание должно уделяться повышению уровня метрологического обеспечения при оценке работы подобных тепловых энергетических машин, причем уже на раннем этапе возникновения таких локализованных неоднородностей микро- и наномасштаба. Нанометрология – новое направление в метрологии, которое обеспечено единством измерений и стандартов с созданием эталонов соответствующих физических объектов и величин, эталонных устройств (ср. с [8, 9]). При этом разработка соответствующих методов поверки и калибровки средств измерений, применяемых в нанотехнологиях, аттестация методик выполнения измерений физико-химических параметров и свойств поверхностных структур как объектов нанотехнологий – достижения сегодняшнего дня [5] в соответствии с ФЗ РФ от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений». Принципы такого метрологического обеспечения должны иметь опережающий характер и использоваться в любых без исключения технологических процессах еще на этапах их разработки и оптимиза-

ции режимов эксплуатации и конструирования соответствующих установок, тем более в высокоэнергетических тепловых установках разного предназначения.

Необходимость опережающего развития измерительной информации на рынке современных технологий постоянно подчеркивается в ежегодных докладах Национального института стандартов и технологий США (NIST). В них именно инновации в измерениях и метрологии будут являться фактором успешного технологического прорыва почти во всех сферах экономики, особенно в высокотехнологичных секторах промышленности и энергетики.

В настоящее время необходимое контрольно-измерительное оборудование имеется в профильных научно-образовательных и производственно-технологических организациях, например речь идет об электронных, туннельных, атомно-силовых микроскопах и др. Поэтому при создании соответствующей нормативно-правовой и нормативно-технической базы для данной деятельности произойдет гармонизация необходимых нормативных документов, удовлетворяющих международным требованиям.

Кроме того, это предполагает в том числе и проведение работ (на необходимом предварительном этапе) с помощью создаваемых специализированных многомодульных прототипов опытных образцов автоматизированных лазерных технологических комплексов [4]. Они должны обеспечивать соответствующее качество лазерного излучения с согласованными параметрами и достижением необходимой стабильности при выбранных рабочих режимах еще до их промышленной реализации. Это важно в аспекте будущей коммерциализации данных экспериментальных исследований по разработке оригинальных высоких технологий двойного назначения для задач поверхностного термоупрочнения металлических изделий, а также для моделирования предупреждения возможных условий повреждения и разрушения высокоэнергетических тепловых установок с внутренними камерами с рабочим веществом.

Данным исследованиям и должна быть посвящена принципиальная активность в этой области в условиях соответствия мировым конкурентным процессам в такой стратегической отрасли, какой является теплоэнергетика, в частности с газожидкостными рабочими веществами в разных условиях эксплуатации, в том чис-

ле и в экстремальных условиях по разным параметрам (ср. с [1, 3, 13]).

При лазерном воздействии на поверхность некоторого твердого тела, когда речь идет о непрозрачном материале, обычно рассматриваются процессы теплопередачи, например при лазерном поверхностном термоупрочнении (закалке) металлов. При этом базовые принципы такого по сути технологического процесса определяются закономерностями технической термодинамики с учетом свойства теплоты как формы обмена энергией и ее преобразования [1–4].

Но, исходя из простого соотношения Р. Клаузиуса ($dQ = mc_x dT$), связи количества теплоты dQ , полученной телом, с изменением его температуры dT для равновесного процесса нагревания однородного тела с массой m и теплоемкостью в рассматриваемом процессе c_x , известного еще из школьного курса физики, видно, что даже при большом значении dQ , но и большой величине m для определенного материала можем иметь малую величину dT , т. е. тело нагревается в среднем незначительно (что также определяется его теплопроводностью, теплоемкостью и другими процессами, в частности тепловым расширением и деформациями). В то же время, при малых значениях m в зернистых структурах наномасштаба локальная температура в последних может быть очень высокой и должна учитываться при соответствующих пиковых значениях временных параметров (ср., например, с [4, 5, 11]). Однако, как уже отмечалось, изменение температуры тела происходит не только в результате теплообмена, но и зависит от ряда сопутствующих процессов, среди которых необходимо отметить следующие [1–4, 11].

Во-первых, речь идет о том, что под воздействием одновременно протекающей разного типа деформации тела в условиях упругой или неупругой/пластической деформации, а также теплового расширения (т. е. в результате чего совершается работа) часть энергии уходит на это и в итоге температура тела возрастает на еще меньшую величину.

Во-вторых, данная деформация происходит по-разному в различных локальных областях тела (зависит от его формы и химического элементного состава в каждой такой области – термохимия с разными адсорбентами).

В-третьих, явление передачи энергии в форме теплоты в твердом теле зависит от теплопроводности в таком неравномерно нагретом теле с соответствующим коэффициентом температуропроводности, определяемым различными механизмами теплопроводности (электронной, решеточной и т. д.).

В-четвертых, происходящий поверхностный нагрев тела (именно он характерен для лазерного воздействия на тело) имеет свою специфику и зависит от граничных условий на его поверхности, его структуры, слоистости и глубины прогрева, что определяет различные фазовые состояния среды (с оплавлением или без него, с диффузией различных состояний и химических элементов, а в целом – открытостью системы (динамические процессы по механике) и др.).

В-пятых, принципиальными являются время нагрева тела (время лазерного облучения тела) и реализуемый режим охлаждения (естественный в соответствующей окружающей среде или внешнее охлаждение) с химическими превращениями и течением газов/паров (с экранированием лазерного излучения в месте облучения).

В-шестых, при наличии на поверхности неоднородностей и дефектов/шероховатостей пиковое значение температуры и давления на них может быть очень высоким.

Поэтому современные лазерные технологии обработки материалов и решение существующих проблем могут быть весьма полезными при рассмотрении механизмов возникновения различных неоднородностей и дефектов на поверхности твердого тела, но требуют проведения целенаправленных фундаментальных исследований для последующих прикладных разработок [4, 11]. В частности, это относится к обработке и повышению износостойкости внутренних поверхностей и/или их фрагментов для камер, находящихся в контакте с рабочим веществом в определенных динамических тепловых условиях для газа и жидкости (весьма экстремальных), в тепловой установке при ее дальнейшей реальной эксплуатации. В таком конкретном аспекте подобные предварительные диагностика и управляемое воздействие на поверхность объекта с выявлением условий возникновения на ней неоднородностей и дефектов по разным причинам могут иметь немаловажное значение при выборе и контроле режимов работы тепловой машины.

Действительно, при лазерном воздействии, допускающем управляемые и моделируемые процессы развития, на различные образцы и детали из разных материалов с разным химическим составом, с разной структурой, разной формы, разной массы и с разными требованиями к реализуемому изменению/модификации их функциональных и конструкционных характеристик/свойств (объемных поверхностных, граничных, в тонких пленках и в местах соприкосновения разных частей и фрагментов – ср. с [4, 5, 11]) должны использоваться специализированные типы лазерных комплексов и реализовываться с их помощью выбираемые режимы обработки изделий, а также оценки их стойкости и надежности в агрессивной среде для каждой определенной номенклатуры изделий, включая внутренние (поверхностные) области камер тепловых установок.

Это основывается на нижеследующих базовых позициях [4, 11]. Первое, разные параметры используемого лазерного излучения для каждой конкретной операции: размеры и форма лазерного пучка, длительность лазерных импульсов по времени, пиковая и средняя мощности излучения, время облучения, фокусировка в одно- и/или многопучковом режимах лазерного воздействия на деталь определенной конфигурации на определенную ее поверхность/фрагмент. Второе, применение в процессе проведения технологических работ вспомогательных удерживающих механизмов и устройств для крепления, перемещения или протяжки (например, цилиндрических объектов типа проводов) обрабатываемого изделия/образца с определенным (подготовленным заранее) состоянием его поверхности и управляемой ее поглотительной способностью (гибридные технологии с термо- и механообработкой, химической техноподготовкой и наносимыми покрытиями). Третье, при этом по физике само воздействие лазерного излучения на вещество определяется фундаментальными процессами и неустойчивостями с нестационарными гидродинамическими и волновыми стохастическими явлениями теплопередачи и диффузии (в объеме и на поверхности) при разных условиях сканирования лазерного пучка и времени выдержки в нагретом состоянии поверхности тела под лазерным пучком, что также зависит от скорости нагрева и закона охлаждения. В результате

достигается цель для получения необходимого каналирования излучения с заданными параметрами в обрабатываемой пространственно-распределенной среде с локализованными и де-локализованными неоднородностями и локальным беспорядком лазерно-индуцированных микро- и наномасштаба кластеров с определенными топологией (их плотности, дисперсности и морфологии), деформациями и примесями разного состава (легирование), размерами и характером взаимодействия.

Все это и составляет предмет необходимых поисковых исследований с серией тестовых экспериментов и с проведением физико-математического моделирования. При этом используются дифференциальные нелинейные (с переменными коэффициентами) уравнения [12] с:

временными и пространственными координатами,
обратной связью;

а также технологии имитационного компьютерного моделирования с языками программирования высокого уровня, имеющие широкую область применимости для разных задач.

Данный базовый подход позволяет спрогнозировать ожидаемое состояние образца после его лазерной обработки и произвести оптимизацию ряда параметров – теплофизических для материалов и для реализующихся лазерных технологических процессов [4, 11]. Это дает возможность, в частности, целенаправленно моделировать разные процессы, возникающие на поверхности объектов при определенных условиях, а также определять процедуры для требуемых конечных результатов обработки изделий для разработки соответствующих новых технологий. Важно подчеркнуть, что это касается и лазерного термоупрочнения (закалки) с определенной глубиной для металлов и их комбинаций. Кроме того, удастся улучшать теплопроводность/электропроводимость с индуцированием фазовых превращений – температурных и структурных (поверхностных и/или объемных) в различных композитных материалах [10, 12]. Это имеет принципиальное значение для задач разного направления с учетом закономерностей технической термодинамики при лазерной обработке поверхности, включая внутренние поверхности рабочих камер тепловых энергетических установок [1–3].

Объективная эффективность и достоверность полученных достижений в разработанных технологиях с помощью лазерных технологических комплексов может быть доказана и в реальном масштабе времени, т. е. с управлением режимами в реализуемых процессах, а также на основе проведенных последующих измерений для полученных результатов на высокоточных современных приборах метрологического обеспечения [4, 5]. Именно они позволяют проводить анализ состояний поверхности образцов после проведенной лазерной обработки при разных выбираемых и тестируемых режимах с оптической, нанотехнологической, электрофизической и механико-технологической диагностикой в численных параметрах по соответствующим маршрутным картам и детальным процедурам измерения и детектирования требуемых управляющих параметров для изучения и моделирования возникающих неоднородностей и дефектов в реальных установках при их эксплуатации (ср. с [10]).

Хотя в предмет технической термодинамики входит анализ циклических процессов в тепловых/теплоэнергетических машинах разного типа [3] – от классических газопаровых и жидкостных до энергообразующих (в частности, магнитогидродинамических, термоэлектронных), – однако оценка их работоспособности невозможна без рассмотрения комплексных явлений физико-химических, газо- и гидродинамических процессов, требующих разработки соответствующих математических моделей пневмогидравлических систем на основе матрично-топологических методов (ср. с [13]).

В общем случае это является довольно сложной задачей нелинейной динамики с рассмотрением стохастических волновых дифференциальных уравнений и неустойчивостей с возникновением турбулентности и вихревых движений [4, 5, 12].

Однако даже в рамках простой модели открытой неизолированной системы с обменом с окружающими объектами теплотой и работой удается проанализировать на основе фазовых диаграмм ключевые параметры и режимы работ различных тепловых машин с оценкой максимального количества получаемой теплоты и эффективности их работы на основании термического КПД [1–3, 6, 7]. Этим вопросам посвящена обширная как научно-техническая, так и производственно-технологическая литература.

В данной статье остановимся на двух конкретных демонстрационных примерах: капельной модели возникновения различных структур, включая фрактальные объекты, и на развитии трещиноватых 1D-структур и замкнутых полостей 2D-конфигураций также фрактального типа в условиях, когда можно проводить аналогию с лазерным управляемым воздействием на поверхность твердого тела (ср. с [4, 5, 11]).

Эти стохастические модельные фрактальные структуры самоподобия с дробными размерностями (обычно от 1 для 1D-структур до 2 для 2D-структур, которые будем рассматривать [5, 11]) могут возникать в реальных процессах и установках на поверхности раздела различных фаз, например при различных (начальных) этапах развития кавитационных течений рабочего вещества тепловой машины для процессов пузырькового и/или осаждений пленочного типа и соответственно возможных конфигураций и факторов начала повреждений оболочки и камеры на внутренней поверхности, находящейся в контакте с рабочим веществом тепловой машины [3, 6, 7].

Подобные имитационные модели именно с лазерным излучением, воздействующим на поверхность твердого тела, могут представлять интерес и в прогнозном аспекте возможности исследования режимов и их управляемого регулирования (ср. с [5]) с проведением аналогий для разных используемых на практике оптимальных режимов работы реальных тепловых установок (ср. с [3, 6]).

Модели поверхностных топологических структур определенных типов, индуцированных лазерным излучением в ряде объектов из разных материалов

Изучим результаты экспериментов по капельному осаждению нанокластерных металлических структур на поверхность тела, а также соответствующее математическое моделирование (в относительных условных единицах общего характера) их структуры с использованием фрактальной модели диффузионно-ограниченной агрегации (Diffusion-Limited Aggregation (DLA)).

Системы нанокластеров металлов на различных поверхностях находят широкое применение в качестве разработки новых эффективных тонкопленочных систем с требуемыми

функциональными и конструкционными характеристиками для материалов, используемых, в частности, для задач создания современных приборов нанoeлектроники и оптофотоники [14, 15]. Однако они представляют интерес и в аспекте отмеченной выше аналогии с конфигурацией дефектов, возникающих на поверхности камеры тепловой установки с жидкостным рабочим веществом, а также для нанесения на поверхность защитных покрытий. Именно этот аспект и рассматривается нами в данном разделе.

Целенаправленная разработка таких материалов с заранее заданными свойствами требует создания новых способов синтеза нанодисперсных фаз металлов и осаждения их на внутреннюю поверхность камеры из различных материалов для создания на ней определенных защитных слоев, обладающих теми или иными функциональными свойствами. Перспективным способом получения подобных нанокластерных систем металлов является капельное осаждение на твердую поверхность из соответствующего по составу коллоида. Это может быть использовано в качестве предварительной модельной системы для нанесения заданной поверхностной структуры, например, на кварцевую и/или керамическую/фарфоровую подложку, что позволяет сгенерировать требуемые покрытия из специальных материалов с необходимой конфигурацией управляемым образом [16]. В дальнейшем данные отработанные технологии могут быть использованы и для поверхности других выбираемых материалов в разных приложениях.

Морфология/топология полученных модельных структур существенным образом зависит от свойств жидкой фракции, частиц коллоида, температуры капли и подложки. Металлические нанокластерные структуры, например серебра (Ag), были получены в результате осаждения капли коллоидного раствора с наночастицами на поверхность подложки при комнатной температуре. Процесс формирования структур рассматривался в результате естественного высыхания капли и/или какого-либо принудительного процесса (нагрева подложки, например), а в нашем рассмотрении – под действием лазерного излучения.

На рис. 1а представлено оптическое изображение структур, полученных в результате естественного высыхания капли воды при темпера-

туре подложки 20 °С за 10 мин, на рис. 1б – нанокластеров после высыхания капли водной компоненты под действием лазерного излучения спустя 20 мин.

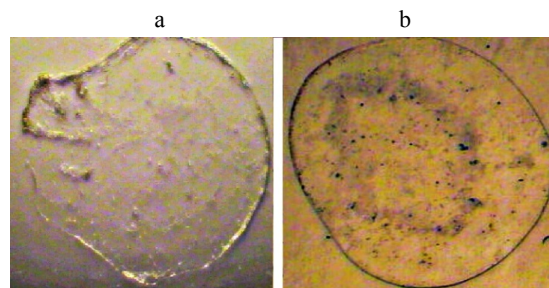


Рис. 1. Оптическое изображение осажденной капли коллоидного раствора и сформированные нанокластеры Ag при температуре 20 °С: а – естественное высыхание; б – высыхание после воздействия лазерного излучения

Fig. 1. Optical image of deposited drop from colloidal solution and formed Ag nanoclusters at 20 °C: a – natural drying; b – drying after exposure to laser radiation

В обоих случаях осажденная система обладала ярко выраженной границей, совпадавшей с границей капли. Как видно из рис. 1, морфология формируемой системы нанокластеров существенно зависит от процесса высыхания капли. При естественном остывании системы температуры подложки и капли коллоида остаются примерно одинаковыми. В это время происходит активное движение наночастиц к границам, но сравнительно медленная скорость испарения позволяет сформировать на границе достаточно обширную кольцевидную систему разветвленных дендритообразных нитевидных нанокластеров с характерным зерном порядка 100 нм шириной и характерной высотой 3 мкм и 150 нм соответственно. При принудительном высыхании жидкой фазы на поверхности при воздействии лазерного излучения температура коллоида увеличивается, высота граничного слоя возрастает и при температуре порядка 100 °С составляет 500 нм (ширина порядка 5 мкм). В этом случае наблюдается более однородное распределение нанокластеров. Они формируются не только на границе, но и внутри, объединяясь во вторую кольцевидную структуру. Система нанокластеров обладает более плотной структурой, в которой можно выделить отдельные кластеры величиной 1,5 мкм, образованные частицами серебра со средними размерами порядка 50 нм.

Их наблюдение можно проводить с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ).

Для изображений систем Ag-нанокластеров, полученных с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ-изображений), проведена оценка фрактальной размерности. Она реализовывалась методом boxcounting [17]. Величина фрактальной размерности варьировалась от 1,65 до 2,02, что соответствовало фрактальным дендритным структурам. В связи с этим в качестве модели структуры системы нанокластеров выбрана модель диффузионно-ограниченной агрегации [18] на круговой расчетной области.

Алгоритм формирования фрактальных кластеров заключается в том, что в круговой расчетной области с наложенной на нее равномерной сеткой генерируются частицы, совершающие по ней случайные блуждания. В случае попадания на границу или в окрестность, содержащую четыре заполненные ячейки (так называемая окрестность Неймана), блуждающая частица фиксируется в текущей позиции с заданной вероятностью p , формируя фрактальный агрегат. Параметр p определяет вероятность локализации частицы/прилипания в данном месте, которая в итоге приводит к образованию нанокластера по данному алгоритму, а темп такого процесса в физическом аспекте обусловлен реализующимся в реальных условиях температурным градиентом на поверхности образца.

На рис. 2 приведены результаты моделирования системы фрактальных нанокластеров в приближении DLA для круговой расчетной области радиусом 400 о. е. Структура формировалась из $2 \cdot 10^4$ частиц. Влияние величины вероятности прилипания на характер системы нанокластеров можно оценить из рис. 2.

При малых значениях вероятности прилипания получаемая фрактальная структура локализуется на краю расчетной области и становится практически равномерно распределенной. Такой режим соответствует естественному остыванию капли коллоида.

Так, на рисунке 1а максимальная ширина/диаметр нанокластерного кольца не превосходит величины 12 о. е. Однако, при средних и больших значениях вероятности прилипания генерируется сильно разветвленная структура (с дендритным характером). Степень заполнения расчетной области в этом случае выше и структуры формируют второе кольцо. Так, на рис. 2b диаметр нанокластерного кольца не превосходит уже 125 о. е., а на рис. 2с – 150 о. е. Результаты такого моделирования могут соответствовать режиму остывания капли жидкости под действием лазерного излучения.

Оценка фрактальных размерностей смоделированных структур показывает тенденцию, аналогичную реальным образцам: с увеличением вероятности прилипания величина фрактальной размерности также возрастает.

На рис. 3 представлены DLA-модели бокового сечения нанокластерных структур при наличии источника теплоты на верхней границе. Расчет температуры T производился на четырех точечных шаблонах (показаны желтым цветом) по явной схеме [18]. Присоединение частицы к агрегату реализовывалось с вероятностью, экспоненциально зависящей от температуры. Таким образом, получалось, что при высокой температуре частица не присоединялась к агрегату. Из рис. 3 можно установить, что рост агрегатов с учетом источников теплоты наблюдается в направлениях против распространения теплоты, но система нанокластеров все-таки остается однородной.

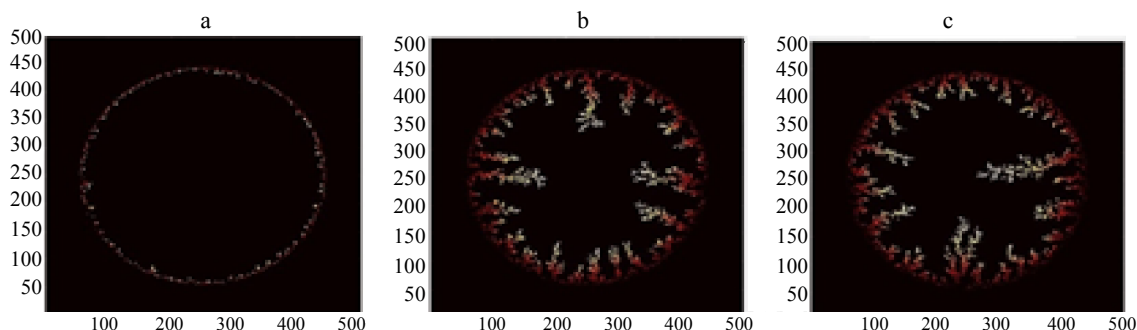


Рис. 2. Модельные изображения фрактальных нанокластерных структур при разной величине вероятности p прилипания: а – 0,1; б – 0,5; в – 1

Fig. 2. Model images of fractal nanocluster structures for different sticking probability parameter p : а – 0.1; б – 0.5; в – 1

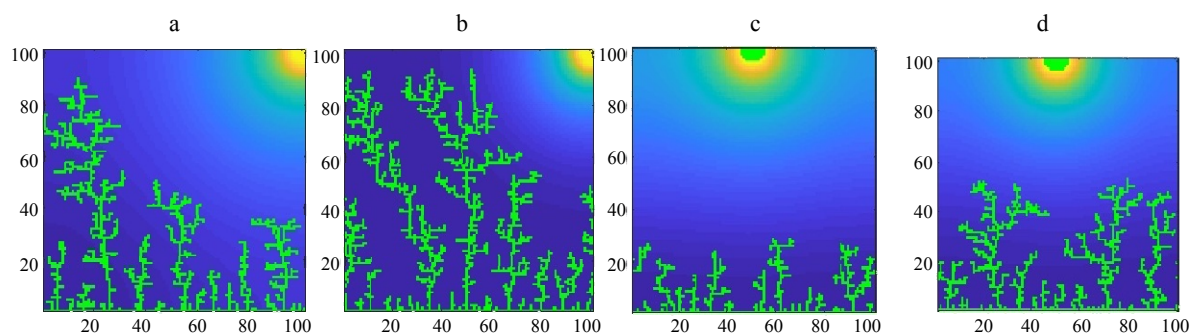


Рис. 3. Модельные изображения фрактальных нанокластерных структур (боковое сечение) с учетом расположения источника теплоты:

a – источник располагается сверху справа – быстрый нагрев; b – медленный нагрев;
c – источник располагается сверху в центре – быстрый нагрев; d – медленный нагрев

Fig. 3. Model images of fractal nanocluster structures (side section) with different localization of heat source:

a – the source is located at the top right – fast heating; b – the same but for slow heating;
c – the source is located at the top in the center – fast heating; d – the same but for slow heating

Для оценки результатов моделирования можно осуществить переход от относительных единиц к абсолютным, усреднить размеры модельных структур и сравнить их с реальными тестовыми образцами. В случае случайных моделей, к которым принадлежат рассмотренные выше, применима качественная оценка на основе сравнения фрактальных размерностей модельных (из литературы) и реальных образцов. Такой подход с достаточной вероятностью позволяет добиться соответствия свойств (например, механических/прочностных, электрофизических или оптических) модельных и реальных образцов при их разнообразных использованиях.

Таким образом, можно утверждать, что представленные модели на качественном уровне могут быть полезными для достаточно верного отображения реально получаемых нано- и микроструктур на поверхностях различных объектов из разных материалов, включая внутренние поверхности камеры тепловой установки.

1D-модель трещиноватой структуры с фрактальными фрагментами

В наиболее наглядном (но в относительных условных единицах) представлении моделирование сложной типологии/топологии возможного появления трещиноватой структуры на поверхности камеры с рабочим веществом можно инициировать с наличия начальных базовых 1D-нитевидных центральных объектов (трещин), с разным числом исходных элементов во фрагменте, определяющих начало и скорость развития трещиноватости в дальнейшем. Данные трещины затем консолидируются в сложные конфигурации и геометрические обра-

зы фрактального типа, понижающие КПД тепловой машины и способствующие ее возможным повреждениям.

В данном пункте большие возможности для изучения таких комплексных 1D-структур доминирующей центральной трещины со случайным ростом дополнительных отрезков трещин фрактального типа определяются с помощью геометрического анализа в рамках соответствующих нелинейных моделей. Нами использовались в этом аспекте две модели для рассмотрения развития возникающих фрактальных трещиноватых структур [17, 18]: во-первых, диффузионное распространение/рост локальных отрезков трещин; во-вторых, с диффузно-ограниченной агрегацией их распространения. Приведем итоговые результаты расчетов для второй модели без деталей их процедуры, что достаточно для наглядного и качественного определения процесса роста трещин. Результаты расчета по первой модели, в принципе, подобны изображениям, полученным по второй модели, но с отличием в численных параметрах.

Не останавливаясь на фиксации определенного количества таких элементарных флуктуационно индуцированных фрактальных отрезков трещин при трансформации исходных линейных трещиноватых цепочек с разным количеством элементов с их объединением в последовательные фрагменты, рассмотрим качественно возникающие модельные конфигурации сети трещин в классификации их морфологии (топологии), которые являются регулируемыми в зависимости от начальных условий. Для количественного анализа потребовался бы учет конкретных характеристик тепловой машины и тех различных взаимодействий (в ее камере как из-

за внешних причин, так и с окружением рабочего вещества в определенном состоянии), под которыми она находится, но при общем сохранении преимущественного 1D-направления в целом [19–22]. Однако это выходит за рамки данного нашего исследования, хотя феноменологически мы учитываем анизотропию по пространственным направлениям при образовании таких фрактальных структур.

Результаты представим в горизонтальной плоскостной проекции разреза камеры. Поскольку все моделирование идет в относительных единицах, конкретные цифры параметров не указываем: ими можно произвольно манипулировать для наглядности разных возможных конфигураций на картинках. С учетом процессов взаимодействия отмечаем принимаемое количество исходных элементов в рассматриваемом фрагменте базовой 1D-трещины.

Результаты проведенного моделирования случайного роста отмеченных дополнительных отрезков трещиноватости показаны на рис. 4 (приближение DLA-модели) для системной сети трещин. Рассмотрено возникновение структуры 1D-трещин, состоящей из разного числа исходных элементов, во фрагментах этих трещин,

которые определяют длину трещины для определенного механизма (с соответствующим физическим потенциалом) взаимодействия в рассматриваемых фрагментах. Он анализируется в теории хрупкого разрушения в физике твердого тела [22], но данные механизмы процессов формирования дефектов и трещин и состояния внутренней поверхности объемного тела находятся в целом вне нашего обсуждения. Сфокусируемся только на геометрических образах и качественной модельной демонстрации разного расположения новых отрезков трещин относительно доминирующей оси возникшей исходной линейной структуры трещин, приведенных на рис. 4. Скорости роста данных дополнительных отрезков к ней и направлений их роста проиллюстрированы в виде геометрических образов относительно преимущественного исходного направления фрагмента 1D-структуры (без фиксации причин выбранных значений относительных параметров, хотя они и отмечены в некоторых условных единицах на координатных осях рис. 4). Именно подобные конфигурации и структуры реально формируются в лазерном эксперименте при разных схемах воздействия излучения на материалы (ср. с [23–25]).

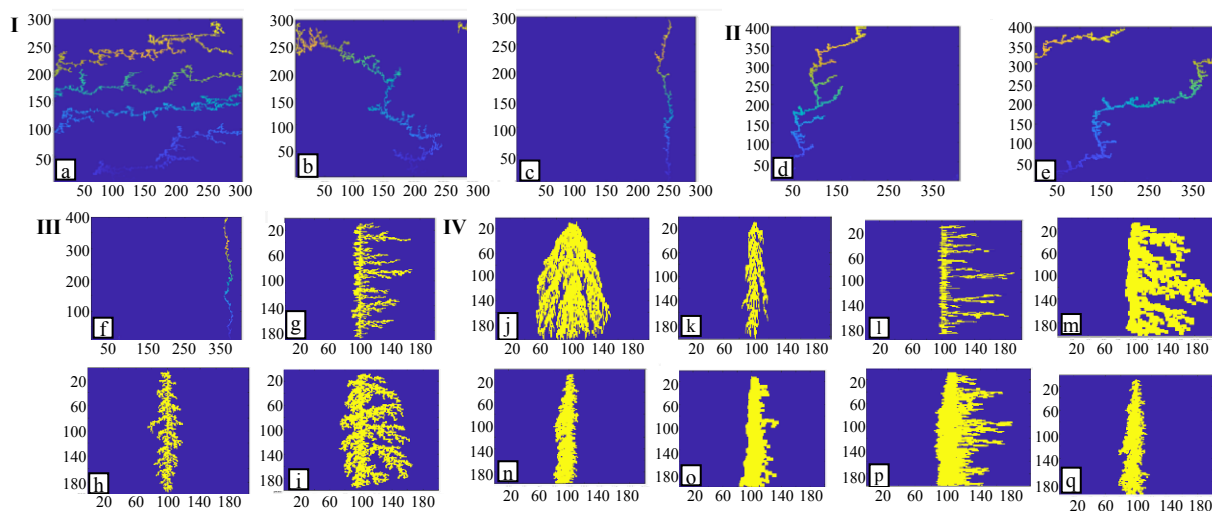


Рис. 4. Результаты расчета фрактальных структур по модели DLA с выделенным преимущественным 1D-ростом трещины (указано как геометрическое название): I – трещины длиной 2 (исходные фрагменты трещины из двух элементов): а – рост по горизонтали; б – рост по диагонали; с – рост по вертикали (вверх);

II – диагональные трещины длиной 3 (исходные фрагменты трещины из трех элементов): d – рост вверх; e – рост вбок;

III – вертикальные трещины длиной 4 (фрагменты трещины из четырех исходных элементов):

f – рост вверх; g – рост направо вбок; h, i – рост симметрично вбок направо и налево, но с разной скоростью;

IV – трещины длиной 5 (исходные фрагменты трещины из пяти элементов): рост по вертикали из начального источника наверху (показано выше на рис. 3с), но с разными скоростями и по разным направлениям роста: j, k, l, m, n, o, p, q

Fig. 4. Results of calculation of fractal structures by DLA-model with the selected advantageous 1D-growth for cracks (given as a geometric name): I – cracks of length 2 (original crack fragments of two elements): a – horizontal growth; b – diagonal growth; c – vertical growth (up); II – diagonal cracks of length 3 (original crack fragments of three elements): d – growth (up); e – sideways growth; III – vertical crack of length 4 (fragments of a crack from four initial elements): f – growth (up); g – growth to the right side; h, i – growth symmetrically sideways to the right and left, but at different speeds; IV – cracks of length 5 (original crack fragments of five elements): vertical growth from the initial source at the top (shown above in Fig. 3c) but at different rates and in different directions of growth: j, k, l, m, n, o, p, q

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены модели и алгоритмы различных механизмов осаждения вещества с возникновением поверхностных топологических структур с соответствующими геометрическими параметрами, индуцированных лазерным излучением на определенных и выбранных типах поверхностей, и проведены аналогии с процессами, происходящими с материалом рабочего вещества на внутренних поверхностях камеры тепловой установки.

2. Выявлены условия доминирования появления 1D-трещиноватой структуры (в рамках модельных представлений, но без рассмотрения конкретных реальных причин ее возникновения) с последующим случайным ростом ее фрактальных фрагментов/отрезков по разным направлениям и образованием 3D-сети с неоднородной картой давлений, влияющих на нежелательные стационарные конфигурации аккумуляции и утечки рабочего вещества в камере энергетической установки из-за случайной проницаемости его в поверхностных дефектах разной глубины.

3. Проведенные исследования, несмотря на всю условность полученных результатов и их качественный характер, могут быть полезными при конструировании различных ответственных деталей и элементов энергетических установок с требуемыми прочностными характеристиками, а также для разработки различных маршрутных карт испытаний с алгоритмами для прогноза последствий их проведения и предварительного планирования допустимых реализуемых рабочих режимов.

4. Показано, что при реализации, например, процессов поверхностного лазерного термоупрочнения с формированием регулируемым образом и в нужном направлении неоднородностей и структур на начальном этапе образования микро- и нанокластеров в лазерных экспериментах оказывается возможным нахождение параметров наиболее потенциально опасных их конфигураций с последующим нежелательным их ростом в динамике.

ЛИТЕРАТУРА

- Хрусталева, Б. М. Техническая термодинамика: учеб. для строит. и энергетич. специальностей вузов: в 2 ч. / Б. М. Хрусталева, А. П. Несенчук, В. Н. Романюк. Минск: Технопринт, 2004. Ч. 1. 486 с.
- Техническая термодинамика: учеб. для машиностроит. специальностей вузов / В. И. Крутов [и др.]; под ред. В. И. Крутова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1991. 384 с.
- Несенчук, А. П. Тепловые расчеты пламенных печей для нагрева и термообработки металла / А. П. Несенчук, Н. П. Жмакин. Минск: Вышэйш. шк., 1974. 295 с.
- Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / В. Я. Панченко [и др.]; под ред. В. Я. Панченко. М.: Физматлит, 2009. 664 с.
- Введение в фемтонаноплатонику: фундаментальные основы и лазерные методы управляемого получения и диагностики наноструктурированных материалов: учебное пособие / С. М. Аракелян [и др.]; под общ. ред. С. М. Аракеляна. М.: Логос, 2015. 744 с.
- Benderskiy, B. Numerical Simulation of Intrachamber Process in the Power Plant / B. Benderskiy, P. Frankovsky, A. Chernova // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No 11. P. 4990. <https://doi.org/10.3390/app11114990>.
- Convective Heat Transfer In the Channel Entrance with a Square Leading Edge Under Forced Flow Pulsations / I. A. Davletshin [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 129. P. 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.066>.
- Ильин, А. П. Структура, свойства и проблемы аттестации нанопорошков металлов / А. П. Ильин, А. В. Коршунов, Л. О. Толбанова // *Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]*. 2009. Т. 314, № 3: Химия. С. 35–40.
- Сумм, Б. Д. Коллоидно-химические аспекты нанохимии – от Фарадея до Пригожина / Б. Д. Сумм, Н. И. Иванова. Вестник МГУ. Сер. 2, химия, 2001. Т. 42, № 5. С. 300–305.
- Страумал, Б. Б. Фазовые переходы на границах зерен / Б. Б. Страумал; Рос. акад. наук. Ин-т физики твердого тела. М.: Наука, 2003. 327 с.
- Действие излучения большой мощности на металлы / С. И. Анисимов [и др.]; под ред. А. М. Бонч-Бруевича, М. А. Ельяшевича. М.: Наука. 1970. 272 с.
- Скотт, Э. Нелинейная наука. Рождение и развитие когерентных структур / Э. Скотт; пер. с англ. И. А. Макарова; под ред. А. Л. Фрадкова. 2-е изд. М.: Физматлит, 2007. 559 с.
- Гликман, Б. Ф. Математические модели пневмогидравлических систем / Б. Ф. Гликман. М.: Наука, 1986. 368 с.
- Лепешов, С. И. Гибридная наноплатоника / С. И. Лепешов [и др.] // *УФН*. 2018. Т. 188, № 11. С. 1137–1154. <https://doi.org/10.3367/ufne.2017.12.038275>.
- Chaudhery, M. H. Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications / M. H. Chaudhery. Elsevier, 2018. 1109 p.
- Осаждение биметаллических кластеров Au/Ag с использованием метода лазерного осаждения наночастиц из коллоидных систем / А. А. Антипов [и др.] // *Оптика и спектроскопия*. 2014. Т. 116, № 2. С. 349–352.
- Guido, G. A Practical Implementation of the Box Counting Algorithm / G. Guido // *Computers & Geosciences*. 1998. Vol. 24, No 1. P. 95–100. [https://doi.org/10.1016/s0098-3004\(97\)00137-4](https://doi.org/10.1016/s0098-3004(97)00137-4).
- Mrocza, J. Algorithms and Methods for Analysis of the Optical Structure Factor of Fractal Aggregates / J. Mrocza, M. Wozniak, F. R. A. Onofri // *Metrol. Meas. Syst*. 2012. Vol. 19, № 3. P. 459–470. <https://doi.org/10.2478/v10178-012-0039-2>.
- Крайнов, А. Ю. Численные методы решения задач тепло- и массопереноса / А. Ю. Крайнов, Л. Л. Миньков. Томск: STT, 2016. 92 с.
- Slade, G. Self-Avoiding Walk, Spin Systems and Renormalization / G. Slade // *Proceedings of the Royal Society*

- A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2019. Vol. 475, Iss. 2221. <https://doi.org/10.1098/rspa.2018.0549>.
21. Geometric Structure of Percolation Clusters / X. Xu [et al.] // *Phys. Rev. E*. 2014. Vol. 89, No 1. P. 012120. <https://doi.org/10.1103/physreve.89.012120>.
 22. Прусова, И. В. Основы механики разрушения: учебно-методическое пособие / И. В. Прусова, В. М. Романчук, О. В. Титюра. Минск: БНТУ, 2009. 100 с.
 23. Григорьянц, А. Г. Оборудование для лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров; под ред. А. Г. Григорьянц. М.: Изд-во МГТУ, 2022. 285 с.
 24. Gross, M. S. Computer Simulation of the Processing of Engineering Materials with Laser Theory and First Applications / M. S. Gross, I. Black, W. H. Mueller // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2003. Vol. 36, No 7. P. 929–938. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/36/7/324>.
 25. Абляция тонких пленок молибдена с поверхности прозрачных подложек лазерными импульсами фемтосекундной длительности / А. Е. Гулевич [и др.]. Минск: Беларуская навука, 2012. С. 339–340.
- Поступила 19.01.2023
Подписана в печать 24.03.2023
Опубликована онлайн 31.05.2023
- ## REFERENCES
1. Khroustalev B. M., Nesenchuk A. P., Romanyuk V. N. (2004) *Technical Thermodynamics. Part 1*. Minsk, Tekhnoprint Publ, 486 (in Russian).
 2. Krutov V. I., Isaev S. I., Kozhinov I. A., Kozlov N. P., Kofanov V. I., Mironov B. M., Nikitin V. N., Petrazhitskii G. B., Pylaev A. M., Khvostov V. I., Shishov E. V. (1991) *Technical Thermodynamics*. 3rd ed. Moscow, Vysshaya Shkola Publ, 384 (in Russian).
 3. Nesenchuk, A. P. Zhmakin N. P. (1974) *Thermal Calculations of Flame Furnaces for Heating and Heat Treatment of Metal*. Minsk, Vysshaya Shkola Publ, 295 (in Russian).
 4. Panchenko V. Ya. (ed.), [et al.] (2009) *Laser Technologies for Material Processing: Modern Problems of Fundamental Research and Applied Development*. Moscow, Fizmatlit Publ, 664 (in Russian).
 5. Arakelyan S. M., Kucherik A. O., Prokoshev V. G., Rau V. G., Sergeev A. G. (2015) *Introduction to Femtonanophotonics: Fundamental Principles and Laser Methods for the Controlled Production and Diagnostics of Nanostructured Materials*. Moscow, Logos Publ, 744 (in Russian).
 6. Benderskiy B., Frankovsky P., Chernova A. (2021) Numerical simulation of Intrachamber Process in the Power Plant. *Applied Sciences*, 11 (11), 4990. <https://doi.org/10.3390/app11114990>.
 7. Davletshin I. A., Mikheev N. I., Paereliy A. A., Gazizov I. M. (2019) Convective Heat Transfer In the Channel Entrance with a Square Leading Edge Under Forced Flow Pulsations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129, 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.066>.
 8. Ilyin A. P., Korshunov A. V., Tolbanova L. O. (2009) Structure, Properties and Problems of Certification of Metal Nanopowders. *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University], (3 Khimiya [Chemistry]), 35–40 (in Russian).
 9. Summ B. D., Ivanova N. I. (2001) Colloid-Chemical Aspects of Nanochemistry – From Faraday to Prigizhine. *Vestn. Mosk. Un-ta. Ser. 2. Chemistry*, 42 (5), 300–305 (in Russian).
 10. Straumal B. B. (2003) *Phase Transitions at Grain Boundaries*. Moscow, Nauka Publ, 327 (in Russian).
 11. Anisimov S. I., Imas Ya. A., Romanov G. S., Khodyko Yu. V. (1970) *Effect of High Power Radiation on Metals*. Moscow, Nauka Publ, 272 (in Russian).
 12. Scott A. (2003) *Nonlinear Science: Emergence and Dynamics of Coherent Structures*. Oxford University Press, 480.
 13. Glikman B. F. (1986) *Mathematical Models of Pneumohydraulic Systems*. Moscow, Nauka Publ, 368 (in Russian).
 14. Lepeshov S. I., Krasnok A. E., Belov P. A., Miroshnichenko A. E. (2018) Hybrid Nanophotonics. *Physics-Usp ekhi*, 61 (11), 1035–1050. <https://doi.org/10.3367/ufne.2017.12.038275>.
 15. Chaudhery M. H. (2018) *Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications*. Elsevier, 1109 (in Russian).
 16. Antipov A. A., Arakelian S. M., Kutrovskaya S. V., Kucherik A. O., Vartanian T. A. (2014) Deposition of Bimetallic Au/Ag Clusters Using Laser Deposition of Nanoparticles from Colloidal Systems. *Optics and Spectroscopy*, 116 (2), 324–327. <https://doi.org/10.1134/s0030400x14020039>.
 17. Guido G. (1998) A practical Implementation of the Box Counting Algorithm. *Computers & Geosciences*, 24 (1), 95–100. [https://doi.org/10.1016/s0098-3004\(97\)00137-4](https://doi.org/10.1016/s0098-3004(97)00137-4).
 18. Mroczka J., Wozniak M., Onofri F. R. A. (2012) Algorithms and Methods for Analysis of the Optical Structure Factor of Fractal Aggregates. *Metrology and Measurement Systems*, 19 (3), 459–470. <https://doi.org/10.2478/v10178-012-0039-2>.
 19. Kraynov A. Yu., Minkov L. L. (2016) *Numerical Methods for Solving Problems of Heat and Mass Transfer*. Tomsk, STT Publ, 92 (in Russian).
 20. Slade G. (2019) Self-Avoiding Walk, Spin Systems and Renormalization. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 475 (2221), 20180549. <https://doi.org/10.1098/rspa.2018.0549>.
 21. Xu X., Wang J., Zhore Z., Garoni T. M., Deng Y. (2014) Geometric Structure of Percolation Clusters. *Physical Review E*, 89 (1), 012120. <https://doi.org/10.1103/physreve.89.012120>.
 22. Prusova I. V., Romanchuk V. M., Tityura O. V. (2009) *Fundamentals of Fracture Mechanics: Teaching Aid*. Minsk, Belarusian National Technical University. 100 (in Russian).
 23. Grigoryants A. G., Shiganov I. N., Misurov A. I. (2022) *Laser Processing Equipment*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 285 (in Russian).
 24. Gross M.S., Black I., Mueller W. H. (2003) Computer simulation of the Processing of Engineering Materials with Laser Theory and First Applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36 (7), 929–938. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/36/7/324>.
 25. Gulevich A. E., Kisel' V. E., Kuleshov N. V., Rudenkov A. S. (2012) Ablation of thin Films of Molybdenum From the Surface of Transparent Substrates by Femtosecond Laser Pulses. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ, 339–340 (in Russian).

Received: 19.01.2023

Accepted: 24.03.2023

Published online: 31.05.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-243-247>

УДК 664.8.047

Определение энергосберегающих режимов сушки в аппарате виброкипящего слоя

Кандидаты техн. наук, доценты М. М. Кожевников¹⁾, В. И. Никулин¹⁾, магистр С. Н. Адамов¹⁾

¹⁾Могилевский государственный университет продовольствия (Могилев, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Традиционная технология производства пектина – высокочувствительная, энергоемкая и экологически небезопасная. Одним из возможных способов совершенствования технологического процесса производства пектина является сушка непосредственно пектинового гидролизата до его осаждения этиловым спиртом. Наиболее эффективный способ сушки пектинового гидролизата – сушка в виброкипящем слое инертного материала, обеспечивающая высокую производительность по испаренной влаге с единицы объема камеры и качеству получаемого сухого продукта. В данной работе предложена методика оптимизации процесса сушки пектинового гидролизата в аппарате виброкипящего слоя инертного материала, позволяющая определить значения режимных параметров, при которых процесс сушки протекает с минимальными затратами на тепловую и электрическую энергию. Методика основана на полученной экспериментально зависимости между удельной производительностью сушильной установки и следующими режимными параметрами процесса сушки: скоростью движения воздуха в сушильной камере, начальной температурой воздуха, удельной нагрузкой, отнесенной к площади газораспределительной решетки, начальной концентрацией по сухим веществам. На основе этой экспериментальной зависимости формализованы критерии оценки приведенных затрат на тепловую и электрическую энергию. Сформулирован комплексный критерий оптимизации процесса сушки в виброкипящем слое, минимизация которого позволяет повысить эффективность ведения процесса сушки. Сформулированы ограничения на диапазоны изменения режимных параметров процесса сушки. Поставленная задача оптимизации процесса сушки в виброкипящем слое решена численно с использованием метода последовательного квадратичного программирования, сформулированы рекомендации по значениям режимных параметров для ведения процесса в оптимальном режиме.

Ключевые слова: технологический процесс, сушка, модернизация, методика, оптимальный режим, режимные параметры, показатели качества, приведенные затраты, критерий оптимизации, ограничения, энергоэффективность, производительность, сушильная камера, эмпирическая зависимость, управляемые переменные

Для цитирования: Кожевников, М. М. Определение энергосберегающих режимов сушки в аппарате виброкипящего слоя / М. М. Кожевников, В. И. Никулин, С. Н. Адамов // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 3. С. 243–247. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-243-247>

Determination of Energy-Saving Drying Modes in Vibrofluidized Bed Apparatus

М. М. Kozhevnikov¹⁾, V. I. Nikulin¹⁾, S. N. Adamov¹⁾

¹⁾Mogilev State University of Food Technologies (Mogilev, Republic of Belarus)

Abstract. The traditional pectin production technology is highly energy-intensive and environmentally unsafe. One of the possible ways to improve the technological process of pectin production is to dry directly the pectine hydrolyzate before it is precipitated with ethyl alcohol. The most effective method of drying pectin hydrolyzate is drying in a vibrofluidized layer of an inert material, which provides high productivity in terms of evaporated moisture per unit volume of the chamber and the quality of the resulting dry product. This paper proposes a method for optimizing the drying process of pectin hydrolyzate

Адрес для переписки

Кожевников Михаил Михайлович
Могилевский государственный университет продовольствия
просп. Шмидта, 3,
212027, г. Могилев, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 240-75-99
kmmk@mail.ru

Address for correspondence

Kozhevnikov Mikhail Mikhailovich
Mogilev State University of Food Technologies
3, Shmidta Ave.,
212027, Mogilev, Republic of Belarus
Tel. +375 29 240-75-99
kmmk@mail.ru

in the apparatus of a vibrofluidized layer of an inert material, which makes it possible to determine the values of regime parameters at which the drying process proceeds with minimal costs for thermal and electrical energy. The technique is based on the experimentally obtained relationship between the specific productivity of the drying unit and the following operating parameters of the drying process: the air velocity in the drying chamber, the initial air temperature, the specific load related to the area of the gas distribution grid, the initial concentration for dry substances. On the basis of this experimental dependence, the criteria for assessing the reduced costs for heat and electric energy are formalized. A complex criterion for optimizing the drying process in a vibrofluidized bed is formulated, the minimization of which makes it possible to increase the efficiency of the drying process. Restrictions on the ranges of variation of the operating parameters of the drying process are formulated as well. The posed problem of optimization of the drying process in a vibrofluidized bed is solved numerically using the method of sequential quadratic programming and recommendations are formulated on the values of operating parameters for conducting the process in the optimal mode.

Keywords: technological process, drying, modernization, technique, optimal mode, operating parameters, quality indicators, reduced costs, optimization criterion, limitations, energy efficiency, productivity, drying chamber, empirical dependence, controlled variables

For citation: Kozhevnikov M. M., Nikulin V. I., Adamov S. N. (2023) Determination of Energy-Saving Drying Modes in Vibrofluidized Bed Apparatus. *Science and Technique*. 22 (3), 243–247. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-243-247> (in Russian)

Введение

Технологический процесс производства пектина является энергоемким и экологически небезопасным. Такой процесс традиционно включает этапы промывания яблочных выжимок, экстрагирования пектина методом кислотного гидролиза, выделения твердой фракции с последующей обработкой этиловым спиртом и сушки [1]. В промышленных условиях требуются большие объемы этилового спирта, а также существенные энергозатраты на его регенерацию. Одно из перспективных направлений технологического процесса производства пектина – сушка гидролизата непосредственно до осаждения его этиловым спиртом.

Перспективным направлением модернизации технологического процесса производства пектина является использование интенсивного способа сушки пектинового гидролизата в виброкипящем слое из инертных гранул [2]. Проведение процесса сушки в виброкипящем слое инертного материала сопряжено с повышенными затратами на тепловую и электрическую энергию. В связи с этим актуальной задача – поиск оптимальных значений режимных параметров процесса сушки пектинового гидролизата в виброкипящем слое, при которых минимизируются приведенные затраты, включающие стоимость пара и стоимость электроэнергии. При этом в процессе оптимизации необходимо учитывать ряд ограничений на режимные параметры сушки, обусловленные спецификой технологического процесса [3–6].

Цель проведенных в данной работе исследований заключалась в разработке методики оптимизации процесса сушки пектинового гидролизата в виброкипящем слое, исходя из кри-

терия минимизации приведенных затрат на энергоносители. Предложенная методика основана на полученной экспериментально зависимости, определяющей ограничения на изменение режимных параметров процесса сушки. Разработанная методика позволила определить значения режимных параметров процесса сушки, при которых достигаются минимальные затраты на энергоносители.

Методика и результаты исследований

Предельная производительность сушильной установки виброкипящего слоя существенно зависит от параметров пектинового гидролизата, в том числе его начальной концентрации по сухим веществам, и изменяется при варьировании температуры и скорости воздуха в сушильной камере [3, 4]. Также важным фактором, влияющим на производительность установки, является ее удельная нагрузка. С целью выявления зависимости, связывающей перечисленные режимные параметры процесса сушки, разработана экспериментальная сушильная установка, включающая в себя следующие элементы (рис. 1): сушильную камеру 1, вентилятор 2, эксцентриковый вибропривод 3, калорифер 4. Вибропривод обеспечивает вертикальные колебательные движения сушильной камеры. На газораспределительной решетке сушильной камеры размещаются кубические гранулы из фторопласта. Псевдоожижение этих гранул обеспечивается за счет как колебаний газораспределительной решетки, так и подачи в сушильную камеру горячего воздуха. Контроль и регулирование температуры производятся электронным потенциометром в комплекте с малоинерционной термопарой. Перед подачей

продукта в сушильную камеру его предварительно подогревают с использованием теплообменника 6. Из емкости 8 пектиновый гидролизат перекачивается насосом 7 в пневматическую форсунку, распыляющую гидролизат в слое гранул. Расход воздуха на распыл во всех опытах составлял 11 м³/ч. Продукт осаждается на поверхности инертных гранул, образуя тонкую пленку. Для уменьшения вязкости продукта перед подачей в слой инертного материала его предварительно нагревали в теплообменнике 6 горячей водой, поступающей из термостата. После высушивания продукт теряет связь с инертными гранулами и перемещается с воздухом в циклон 5, который обеспечивает отделение высушенного продукта от воздушного потока.

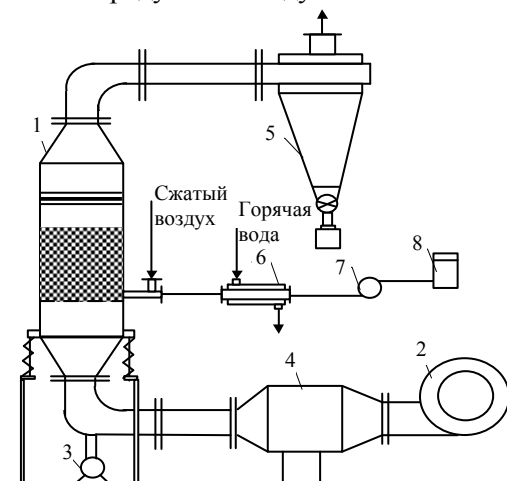


Рис. 1. Схема экспериментальной сушильной установки виброкипящего слоя

Fig. 1. Scheme of experimental vibrofluidized bed drying installation

В ходе предварительного экспериментального исследования показано, что процесс сушки пектинового гидролизата в виброкипящем слое протекает непрерывно. При увеличении расхода продукта растет неоднородность кипения псевдосжиженного слоя и наблюдаются слипшиеся гранулы, при этом поверхность гранул не полностью покрывается продуктом. Поэтому для увеличения производительности использована вибрирующая газораспределительная решетка, позволяющая разбивать агломераты гранул. В проведенных экспериментах частота вертикальной вибрации составила 7,5 Гц, амплитуда 8 мм. Сушку начинали с низкой производительностью с дальнейшим ступенчатым увеличением подачи пектинового гидролизата с интервалом 30 мин.

В ходе проведенных экспериментов в качестве факторов выступали следующие режимные параметры процесса сушки: скорость движения воздуха в сушильной камере v , м/с, начальная температура воздуха t_1 , °C, удельная нагрузка G , кг, отнесенная к площади газораспределительной решетки F_p , м², начальная концентрация по сухим веществам C_1 , %. Соответственно при проведении экспериментов использован ортогональный план из четырех перечисленных факторов, варьируемых на четырех уровнях. План построен на базе двух упорядоченных и двух латинских квадратов размером 4×4 [4, 5]. По результатам этих экспериментов получена эмпирическая зависимость между производительностью установки и управляемыми переменными процесса

$$U_p = 1,47 \cdot 10^{-7} (1,159G_p - 0,23) \times (0,38v - 0,026)(1,99t_1 - 41,63)(-3,12C_1 + 210,8), \quad (1)$$

где $U_p = U/F_p$, U – предельная производительность установки, кг/ч; F_p – площадь газораспределительной решетки, м²; $G_p = G/F_p$, G – удельная нагрузка, кг; v – скорость движения воздуха, м/с; t_1 – начальная температура воздуха, °C; C_1 – начальная концентрация по сухим веществам, %.

Полученная зависимость (1), а также рекомендации, изложенные в работах [6, 7], позволяют формализовать следующие два показателя эффективности процесса сушки пектинового гидролизата в виброкипящем слое.

Первый показатель представляет собой приведенные затраты на тепловую энергию, потребляемую установкой виброкипящего слоя:

$$J_1 = 3600P_s C_a \rho_a \times (100 - W_2 - C_1)(t_1 - t_0) / U_p \eta_k r_s \rightarrow \min, \quad (2)$$

где P_s – стоимость пара, руб./кг; C_a – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·K); ρ_a – плотность воздуха на входе в сушильную камеру, кг/м³; W_2 – влажность сухого продукта, %; t_0 – температура окружающей среды, °C; η_k – коэффициент полезного действия калорифера; r_s – удельная теплота фазового превращения пара, кДж/кг.

Второй показатель представляет собой приведенные затраты на электроэнергию, потребляемую установкой виброкипящего слоя:

$$J_2 = P_e v (100 - W_2 - C_1) (G_p g - \Delta p) / U_p \eta_p r_d \rightarrow \min, \quad (3)$$

где P_e – стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч; g – ускорение свободного падения, м/с²; Δp – сопротивление воздушной трассы сушки, Па; η_v – коэффициент полезного действия вентилятора; η_d – то же электродвигателя.

В соответствии с методом скалярной свертки [8, 9] объединим (2) и (3) в следующий комплексный критерий оптимизации процесса сушки в виброкипящем слое:

$$J = J_1 + J_2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

Таким образом, с учетом (4) задача оптимизации процесса сушки в виброкипящем слое сводится к поиску значений режимных параметров, входящих в формулу (1), обеспечивающих минимум затрат на тепловую и электрическую энергию, при максимальной удельной производительности с единицы площади газораспределительной решетки.

При минимизации критерия оптимизации (4) на диапазоны изменения режимных параметров процесса сушки в виброкипящем слое t_1 , v , G_p и C_1 налагаются следующие ограничения на:

– температуру воздуха на входе в сушильную камеру

$$t_{1\min} \leq t_{1\max} \leq t_{1\max}, \quad (5)$$

где $t_{1\min} = 100$ °С; $t_{1\max} = 120$ °С – минимальная и максимальная температуры воздуха на входе в сушильную камеру, значения которых выбраны по приведенным в работе [2] условиям;

– скорость воздуха в аппарате виброкипящего слоя

$$v_{\min} \leq v \leq v_{\max}, \quad (6)$$

где $v_{\min} = 4,0$ м/с; $v_{\max} = 5,5$ м/с – минимальная и максимальная скорости воздуха в аппарате виброкипящего слоя, значения выбраны по данным работы [2];

– удельную нагрузку гранул инертного материала

$$G_{p\min} \leq G_p \leq G_{p\max}, \quad (7)$$

где $G_{p\min} = 140$ кг/м²; $G_{p\max} = 170$ кг/м² – минимальная и максимальная удельные нагрузки фторопластовых гранул кубической формы с размером ребра 4 мм;

– концентрацию по сухим веществам

$$C_{1\min} \leq C_1 \leq C_{1\max}, \quad (8)$$

где $C_{1\min} = 5$ %; $C_{1\max} = 15$ % – минимальная и максимальная концентрации по сухим веществам по данным работы [7].

Дополнительно вводится ограничение на конечную влажность сухого продукта W_2

$$W_{2\min} \leq W_2 \leq W_{2\max}, \quad (9)$$

где $W_{2\max} = 9$ %; $W_{2\min} = 5$ % – минимально и максимально допустимые по технологическим условиям влажности сухого продукта.

Также по технологическим условиям температура продукта в процессе сушки не должна превышать величину 75. °С учетом того, что температура продукта при сушке в псевдоожиженном слое практически совпадает с температурой отработанного воздуха, имеет место условие $t_2 \leq t_{2d}$, где $t_{2d} = 75$ °С. При этом температура отработанного воздуха t_2 связана с температурой воздуха на входе в сушильную камеру t_1 уравнением теплового баланса. В этом уравнении допустимо пренебречь затратами теплоты на нагрев гидролизата из-за их малости в сравнении с затратами на выпаривание влаги. Уравнение такого теплового баланса имеет вид

$$U_p = 3600 K_p \rho_a C_a v (t_1 - t_2) / r, \quad (10)$$

где K_p – коэффициент тепловых потерь; r – удельная теплота испарения.

Величину удельной теплоты испарения определяем по формуле

$$r = r_0 + C_s t_2 - C_w \theta + \Delta r, \quad (11)$$

где C_w – удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·К); θ – температура продукта, К; C_s – удельная теплоемкость пара, кДж/(кг·К); Δr – удельная теплота преодоления связи влаги с материалом, кДж/кг; $r_0 = 2500$ кДж/кг.

Таким образом, задача оптимизации режима процесса сушки в виброкипящем слое сводится к минимизации критерия качества (4) при ограничениях (5)–(10). Поставленная задача решена численно методом последовательного квадратичного программирования [10] с использованием программного пакета MATLAB.

По результатам решения задачи оптимизации получены значения режимных параметров процесса сушки (табл. 1), при которых комплексный критерий (4) достигает минимума.

Таблица 1

Оптимальные значения режимных параметров процесса сушки

Optimal values of operating parameters of drying process

Режимный параметр	Оптимальное значение режимного параметра
Скорость движения воздуха в сушильной камере v , м/с	5,5
Удельная нагрузка гранул инертного материала G/F_p , кг/м ²	170
Начальная концентрация пектина по сухим веществам C_1 , %	5
Температура отработанного воздуха t_2 , °C	74,76

ВЫВОД

Предложена методика оптимизации процесса сушки пектинового гидролизата в виброкипящем слое инертного материала, позволяющая снизить энергоемкость данного процесса. Получена экспериментальная зависимость, определяющая ограничения на изменение режимных параметров процесса сушки. Проведена оптимизация процесса сушки на основе минимизации комплексного критерия приведенных затрат на энергоносители. На основе предложенной методики определены значения режимных параметров процесса сушки, при которых могут быть минимизированы затраты на тепловую и электрическую энергию.

ЛИТЕРАТУРА

- Донченко, Л. В. Технология пектина и пектинопродуктов / Л. В. Донченко, Г. Г. Фирсов. Краснодар: КГАУ. 2006. 276 с.
- Василенко, З. В. Разработка научно обоснованной технологии производства пектина из выжимок яблок / З. В. Василенко, В. И. Никулин, Л. В. Лазовикова // Вестник МГУП. 2018. № 1 (24). С. 38–42.
- Василенко, З. В. Влияние условий процесса гидролиза – экстрагирования протопектина яблочных выжимок на качество получаемого пектина / З. В. Василенко, В. И. Никулин, В. А. Седакова // Хранение и переработка сельхозсырья. 2006. № 8. С. 25–27.
- Никулин, В. И. Исследование влияния условий процесса гидролиза-экстрагирования протопектина сушеных выжимок яблок на качество получаемого пектина / В. И. Никулин, З. В. Василенко, Л. В. Азарова // Вестник МГУП. № 2 (5). 2008. С. 24–29.
- Василенко, З. В. Влияние промывания выжимок яблок, высушенных в виброкипящем слое, на показатели качества пектина и структуру его молекулы / З. В. Василенко, В. И. Никулин, Л. В. Лазовикова // Вестник МГУП. 2016. № 1 (20). С. 3–8.
- Влияние режимных параметров сушки концентрата пектина на производительность установки виброкипящего слоя инертного материала / З. В. Василенко [и др.] // Вестник МГУП. 2019. № 1. С. 112–119.

- Оптимизация процесса сушки яблочных выжимок в многозональном аппарате виброкипящего слоя / З. В. Василенко [и др.] // Вестник МГУП. 2013. № 1 (14). С. 3–7.
- Кафаров, В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / В. В. Кафаров. М.: Химия, 1985. 448 с.
- Айрапетянц, Г. М. Совершенствование систем автоматического регулирования технологическими процессами / Г. М. Айрапетянц, А. В. Акулич, Н. И. Ульянов. Могилев: МГУП, 2012. 322 с.
- Измайлов, А. Ф. Численные методы оптимизации / А. Ф. Измайлов, М. В. Солодов. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2005. 304 с.

Поступила 18.03.2021

Подписана к печати 20.04.2023

Опубликована онлайн 31.05.2023

REFERENCES

- Donchenko L. V., Firsov G. G. (2006) *Technology of Pectin and Pectin Products*. Krasnodar, Kuban State Agrarian University, 276 (in Russian).
- Vasilenko Z. V., Nikulin V. I., Lazovikova L. V. (2018) Development of Scientifically-Based Technology for the Production of Pectin from Apple Pomace. *Vestnik MGUP = Bulletin of Mogilev State University of Food Technologies*, (1), 38–42 (in Russian).
- Vasilenko Z. V., Nikulin V. I., Sedakova V. A. (2006) Influence of Conditions of Hydrolysis Process – Extraction of Apple Pomace Protopectin on the Quality of the Pectin Obtained. *Khrenenie i Pererabotka Selkhozsyrya = Storage and Processing of Farm Products*, (8), 25–27 (in Russian).
- Nikulin V. I., Vasilenko Z. V., Azarova L. V. (2008) Study of the Influence of the Conditions of the Hydrolysis-Extraction Process of Protopectin of Dried Apple Pomace on the Quality of the Pectin Obtained. *Vestnik MGUP = Bulletin of Mogilev State University of Food Technologies*, (2), 24–29 (in Russian).
- Vasilenko Z. V., Nikulin V. I., Lazovikova L. V. (2016) Influence of Washing Apples Pomace Dried in Vibroboiling Layer on the Quality of Pectin and on the Structure of its Molecules. *Vestnik MGUP = Bulletin of Mogilev State University of Food Technologies*, (1), 3–8 (in Russian).
- Vasilenko Z. V., Nikulin V. I., Lazovikova L. V., Kolyukovich E. A. (2019) Influence of Operating Conditions of Pectin Concentrate Drying on Installation Productivity. *Vestnik MGUP = Bulletin of Mogilev State University of Food Technologies*, (1), 112–120 (in Russian).
- Vasilenko Z. V., Nikulin V. I., Kozhevnikov M. M., Lazovikova L. V., Loboreva L. A. (2013) Optimization of Apple Pomace Drying in Vibroboiling Layer Multispectral Machine. *Vestnik MGUP = Bulletin of Mogilev State University of Food Technologies*, (1), 3–7.
- Kafarov V. V. (1985) *Methods of Cybernetics in Chemistry and Chemical Technology*. Moscow, Khimiya Publ. 448 (in Russian).
- Airapetians G. M., Akulich A. V., Uliyanov N. I. (2012) *Improvement of Automatic Control Systems for Technological Processes*. Mogilev, Mogilev State University of Food, 322 (in Russian).
- Izmailov A. F., Solodov M. V. (2005) *Numerical Optimization Methods*. Moscow, FIZMATLIT Publ, 304 (in Russian).

Received: 18.03.2021

Accepted: 20.04.2023

Published online: 31.05.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-248-255>

УДК 656.131:656.138:656.016:65.011.42:33.338.001.36

Экономико-организационный механизм стимулирования развития экологически чистых технологий на транспорте

Канд. экон. наук, доц. Д. Н. Месник¹⁾, асп. Д. А. Вечёрко¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Спрос на электромобили и подзаряжаемые гибриды с поддержки «зеленых» технологий и IT-сектора вносит существенные изменения в структурные преобразования экономики. Охват рынков энергетических и сырьевых ресурсов сокращением потребления нефтепродуктов не позволяет с уверенностью утверждать о компенсации налоговых потерь поступлениями от роста потребления электрической энергии, в том числе со стороны транспортной инфраструктуры. Отчасти это вызвано разным уровнем налогообложения электроэнергии и нефтепродуктов. Устранение препятствий, сдерживающих развитие электромобилей проведением фискальной политики, – важная prerogative государства. Со стороны государства необходимы своевременные меры, касающиеся пересмотра налогов и налоговых ставок, в поддержку развития механизмов внедрения экологически чистого электрического транспорта, подзаряжаемых гибридов, адаптивного расширения инфраструктуры для категорий транспортных средств М, МG, N, NG, а также позволяющие свести к минимуму потери от налоговых маневров внешнеторговых связей. Инвесторы чаще реагируют на позитивные сигналы рынка, где во многих случаях государственное регулирование имеет весомое влияние на устойчивое и экономически безопасное формирование инвестиционного климата. Развитие электрического транспорта сужает парк автомобилей на двигателях внутреннего сгорания, или на ископаемом источнике энергии. Падение спроса на нефтепродукты сдержит пополнение доходной части бюджета сокращением поступлений налогов на топливо. Во избежание потерь экономической выгоды с обновлением автомобильного парка электромобилями в статье исследован механизм адаптации автотранспортного сервиса к современным вызовам глобальной экономики.

Ключевые слова: электромобиль, транспорт, инфраструктура, механизм, цифровые технологии, «зеленая» экономика

Для цитирования: Месник, Д. Н. Экономико-организационный механизм стимулирования развития экологически чистых технологий на транспорте / Д. Н. Месник, Д. А. Вечёрко // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 3. С. 248–255. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-248-255>

Economic and Organizational Mechanism for Stimulating Development of Environmentally Friendly Technologies in Transport

D. N. Mesnik¹⁾, D. F. Vecherko¹⁾

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

Abstract. The demand for electric vehicles and plug-in hybrids, supported by green technologies and the IT-sector, is making significant changes in the structural transformation of the economy. The coverage of energy and raw materials markets by

Адрес для переписки

Месник Дмитрий Николаевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-75-31
eut_atf@bntu.by

Address for correspondence

Mesnik Dmitriy N.
Belarusian National Technical University
12, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-75-31
eut_atf@bntu.by

the reduction in the consumption of petroleum products does not allow us to assert confidently that tax losses will be compensated by revenues from the increase in electricity consumption, including from the transport infrastructure. This is partly due to different levels of taxation of electricity and oil products. Removing obstacles hindering the development of electric vehicles through fiscal policy is an important prerogative of the state. On the part of the state, timely measures are needed regarding the revision of taxes and tax rates in support of the development of mechanisms for the introduction of environmentally friendly electric transport, plug-in hybrids, adaptive expansion of infrastructure for vehicle categories M, MG, N, NG, as well as minimizing losses from tax maneuvers of foreign trade relations. Investors are more likely to respond to positive market signals, where in many cases government regulation has a significant impact on the sustainable and economically safe formation of the investment climate. The development of electric transport narrows the fleet of cars on internal combustion engines, or on a fossil energy source. The fall in demand for oil products will hold back the replenishment of the budget revenue savings by reducing tax revenues on fuel. In order to avoid loss of economic benefits with the renewal of the car fleet with electric vehicles, the paper examines the mechanism for adapting the motor vehicle service to modern challenges of the global economy.

Keywords: electric vehicle, transport, infrastructure, mechanism, digital technologies, “green” economy

For citation: Mesnik D. N., Vecherko D. F. (2023) Economic and Organizational Mechanism for Stimulating Development of Environmentally Friendly Technologies in Transport. *Science and Technique*. 22 (3), 248–255 <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-248-255> (in Russian)

Введение

Наша страна, выбрав курс в соответствии с Концепцией Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2035 г., реализует модель устойчивого развития экологически чистых «зеленых» технологий. По мнению белорусских ученых, за счет этого Беларусь может дополнительно открыть источники увеличения ВВП на 12–15 %. В мире уделяется особое внимание концепции «зеленой» экономики, которая не подменяет концепцию устойчивого развития, а определяет конкретные пути реализации последней. Одним из направлений «зеленой» экономики является реализация механизма стимулирования экологически чистых технологий на транспорте.

До 2021 г. объем продаж электромобилей и подзаряжаемых гибридов был сконцентрирован на потребительском рынке таких регионов, как Северная Америка, Европа и Китай. Совместная их доля от мирового объема продаж составила примерно 95 %, тогда как суммарная доля объема продаж электромобилей Индонезии, Бразилии и Индии не превысила 0,5 %. С 2021 г. объемы продаж на развивающихся рынках превзошли ожидания экспертов: по региону Восточной Азии они достигли уровня 32 тыс. ед.; по Восточной Европе, Западной и Центральной Азии – около 32 тыс. ед.; по региону Африки хоть очень низкий, однако рост к предыдущему году не ниже 90 %, в том числе на электромобили BEV – 85 %.

В 2021 г. увеличился мировой объем продаж электробусов примерно на 40 % к 2020 г. По сути, на мировом рынке автобусов претерпела изменение структура продаж в пользу электрического транспорта, тогда как объемы продаж по всем видам автобусов существенных изменений не продемонстрировали. По грузовому автомобильному транспорту значительно выросли объемы продаж электрических грузовиков (средней и большой грузоподъемности) примерно 14,2 тыс. ед., что более чем в два раза по сравнению с объемами 2020 г. [1–3]. В 2021 г. доля средней и большой грузоподъемности электрических грузовиков в мировой общей их численности достигла почти 0,3 %, тогда как мировой парк электробусов не превысил 670 тыс. ед., или менее 4,0 % общей численности автобусов, а численность большой грузоподъемности электромобилей (HDV) составила 66 тыс. ед., или около 0,1 % в мировой численности грузовиков. В среде практиков-экспертов сложилось устойчивое мнение, что расширение рыночного сегмента большой грузоподъемности электрического автомобильного транспорта с запасом хода, достаточным на рабочую смену и в условиях, обеспечивших прочную основу экономического роста стран, возможно наращиванием производственных мощностей, расширением цепочек поставок и обменом технологиями по производству компонентов с высокой добавленной стоимостью [4, 5].

Также за этот период отмечено, что из 90 доступных моделей электромобилей (ограничение доходов потребителей и цен на электромобили)

на регион Африки пришлось всего 20 моделей, на развивающийся рынок Азии – до 40, регион Латинской Америки – около 75, на регион Северной Америки – почти столько же, на регионы Европы и Китая – около 90 моделей. По данным аналитического агентства HIS Markit, в 2021 г. сложились следующие цены на новые транспортные средства: автомобиль с двигателем внутреннего сгорания – немного выше 30 тыс. дол. США; подзаряжаемый гибрид – около 33 тыс.; электромобиль – примерно 43 тыс. дол. США. На неравномерность распределения по модельному ряду электромобилей вместе с их ценой не могла не оказать влияние доступность к зарядной инфраструктуре.

Экономико-организационные меры, как правило, направлены на стимулирование организационно-экономического механизма удовлетворения интереса и потребностей людей. Подкрепленный человеческий интерес денежной покупательской способностью направлен на формирование спроса на продукцию, на инновационные новинки. Таким инновационным новшеством сегодня для многих стран предлагается возможность заменить традиционные транспортные средства, оборудованные двигателями внутреннего сгорания, на электромобили.

Основная часть

Рынок электрического транспорта не только богат предложением на электромобили и подзаряжаемые гибриды, но и на средства персональной мобильности, такие как гироскутеры, моноколеса, электросамокаты, велосипеды и другие, имеющие автономную электрическую тягу. В Республике Беларусь классификация транспортных средств прописана ГОСТ 31286–005 «Транспорт дорожный» [6], согласно которому механические транспортные средства классифицируют по следующим характеристикам: количеству колес; количеству мест для сидения; грузоподъемности; рабочему объему двигателя; максимальной эффективной мощности электродвигателя; снаряженной массе; скоростному ограничению; и др. Электромобилями признаны транспортные средства категории М, МG, N, NG, приводимые в движение исключительно электрическим двигателем.

Наличие системы автономного хода за счет аккумуляторных батарей стимулирует переме-

ны в развитии всего транспортного сектора, включая железнодорожный транспорт, транспортную инфраструктуру.

Исследования Международного энергетического агентства (IEA – International Energy Agency) утверждают, что в течение всего жизненного цикла электромобилю свойственно значительное преимущество (около 50 %) по выбросу в атмосферу CO₂ (его эквивалента), включая объемы выбросов от добычи природных ресурсов, производства материалов и самого экологически чистого транспортного средства, до момента окончания его срока полезной эксплуатации и утилизации, по сравнению с автомобилем с двигателем внутреннего сгорания. Проведенные исследования экспертами-практиками по сравнению углеродного следа электрического и бензинового автомобилей подтвердили, что высокоэнергоёмкое производство аккумуляторных батарей электромобилей, охватывая стадии производства стали, батарей, электронного оборудования, эксплуатации и утилизации, позволяет добиться экономического эффекта после значительного пробега. Чем больше пробеги электрического и бензинового автомобилей, тем ощутимее разница их углеродного следа в пользу электромобиля.

Растущим глобальным парком электромобилей за 2021 г. достигнуто сокращение выбросов в окружающую среду около 40 млн т CO₂ (его эквивалента). Этот объем сокращения исследован по полному циклу, начиная от производства ресурсов и замыкая утилизацией отходов. Существенная экономия выбросов пришлось на Китай, которым электрификацией двух- и трехколесных транспортных средств достигнуто примерно 45 % снижения выбросов CO₂ (его эквивалента). Ожидается, что с ростом спроса на электромобили (подзаряжаемые гибриды) и производство/потребление электроэнергии в мире усредненная за период 2021–2030 гг. интенсивность выбросов CO₂ (его эквивалента) сократится почти на 20 %. В то же время использование инновационных технологий по уменьшению выбросов метана в окружающую среду позволит достигнуть по ископаемому топливу (бензину, дизельному топливу) сокращения выбросов CO₂ (его эквивалента) приблизительно на 2 %. В резуль-

тате избегания выбросов обновлением глобального парка экологически чистыми видами транспорта мир к 2030 г. получит чистую выгоду по выбросам парниковых газов около 460 млн т CO₂ (его эквивалента). Эта чистая выгода приблизительно в 1,64 раза выше выбросов в окружающую среду CO₂ (его эквивалента) производством электроэнергии, обеспечивающим глобальный прогнозируемый парк электромобилей к 2030 г. Тогда как к рассматриваемому периоду замененный электромобилями объем транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания способен произвести примерно 740 млн т CO₂ (его эквивалента), что укрепляет позиции электромобиля и делает его крупным потребителем электроэнергии в мире (на уровне промышленности и строительства).

Питание парка транспортных средств электроэнергией подаст сигнал рынку и через спрос на источники энергии повлияет на структуру их генерации согласно требованиям декарбонизации. Если электромобиль использует энергию, произведенную тепловой электрической станцией, то углеродный след существенно сокращается с пробегом от 150 тыс. км, или, пробега в год 16 тыс. км, потребуется около 9 лет эксплуатации транспортного средства. Двойного сокращения выбросов CO₂ в окружающую среду возможно достичь, используя в качестве источника электроэнергии ветровые установки (возобновляемые источники энергии), через 12,5 года эксплуатации электромобиля.

Сдерживающим спрос на электромобили и подзаряжаемые гибриды аргументом стал запас хода. Изменение температуры среды эксплуатации электромобилей влияет на дальность поездок, так как для электрической тяги транспортного средства, в частности при отрицательной температуре по Цельсию (°C), повышен расход энергии литий-ионной аккумуляторной батареи. В этом случае запас хода электрического транспортного средства снижается до 20 % к летнему периоду с температурой +21,5 °C на равный промежуток дальности пути и режима эксплуатации электромобиля. Отмечено, что в период 2015–2019 гг. запас хода ежегодно в среднем рос на 12 %. Очередной его рост пришелся на 2021 г., который по средневзвешенному по продажам ассортименту новых электромобилей составил 3,5 %. В резуль-

тате за исследуемый период средневзвешенный запас хода по электромобилям (PHEV) составил несколько более 60 км, а по электромобилям (BEV) – около 350 км.

Использование экологически чистых технологий – одна из причин, повлиявших на изменение структуры производства электроэнергии не только стран ЕС. С 2020 г. в структуре производства электроэнергии странами Европейского союза отмечен рост доли от возобновляемых источников над другими видами. С другой стороны, на долю стран Европы и США в 2010 г. приходилось около 42,13 % потребления электроэнергии в мире, или по отношению к региону стран Азии превышение составляло 5,24 %. В 2021 г. доля стран Европы и США снизилась до 29,53 %, или на 14,84 % уменьшилась по отношению к доли стран Азии в объеме потребления электроэнергии в мире (табл. 1) [7].

Таблица 1

Структура потребления электроэнергии секторами экономики по регионам, %
(Собственная разработка авторов на основании [8])

Structure of electricity consumption sectors of the economy by regions, %
(Own development of the authors based on the source [8])

Регион	Сектор экономики	Год		
		1992	2010	2019
World	Всего	100,00	100,00	100,00
	Промышленность и строительство	45,91	41,57	42,64
	Транспорт	2,23	1,70	1,90
	Другие секторы экономики	51,86	56,74	55,46
North America	Всего	32,76	25,18	20,63
	Промышленность и строительство	12,01	6,32	4,85
	Транспорт	0,08	0,07	0,10
	Другие секторы экономики	20,67	18,79	15,68
Central & South America	Всего	4,03	4,93	4,58
	Промышленность и строительство	2,02	2,24	1,82
	Транспорт	0,02	0,02	0,02
	Другие секторы экономики	1,99	2,67	2,74
Europe	Всего	23,45	18,13	14,46
	Промышленность и строительство	10,24	6,70	5,44
	Транспорт	0,65	0,36	0,31
	Другие секторы экономики	12,56	11,07	8,70

Окончание табл. 1

Регион	Сектор экономики	Год		
		1992	2010	2019
Eurasia	Всего	11,92	6,01	5,04
	Промышленность и строительство	6,62	2,74	2,19
	Транспорт	1,10	0,57	0,43
	Другие секторы экономики	4,20	2,70	2,42
Middle East	Всего	2,24	4,10	4,29
	Промышленность и строительство	0,50	0,88	0,94
	Транспорт	0	0,001686	0,002268
	Другие секторы экономики	1,74	3,21	3,35
Africa	Всего	2,51	3,00	2,91
	Промышленность и строительство	1,19	1,33	1,17
	Транспорт	0,04	0,03	0,02
	Другие секторы экономики	1,29	1,64	1,71
Asia & Oceania	Всего	23,08	38,66	48,10
	Промышленность и строительство	13,33	21,36	26,23
	Транспорт	0,34	0,65	1,01
	Другие секторы экономики	9,41	16,65	20,85

По регионам, где наблюдается значительное сокращение потребления электроэнергии промышленностью и строительством, отмечено снижение их доли в мировом ВВП. Так, в Евразии, Центральной и Южной Америке потребление электроэнергии в мире сократилось в 3,02 и 1,11 раза, а в мировом ВВП – в 1,46 и 1,26 раза соответственно. Исследованиями установлено, что в тех регионах, где отмечено сокращение потребления электроэнергии в мире промышленностью и строительством, отмечено снижение доли потребления электроэнергии сектором транспорта, и наоборот. Исключение составил регион Северной Америки, по которому доля потребления электроэнергии в мире промышленностью и строительством уменьшилась на 7,16 %, а доля потребления энергии транспортом возросла на 0,02 %.

Восстановление спроса на потребление электроэнергии многим зарубежным экспертам видится в реализации проектов обновления автомобильного парка электромобилями и создания инфраструктуры для электрического транспорта. Изменения энергетического баланса, структуры потребления электроэнергии по видам деятельности, рост душевого потребления ВВП и располагаемого дохода стран ЕС, а также меры государственной поддержки способствовали развитию экологически чистых технологий на транспорте.

За период 1992–2021 гг. душевое потребление ВВП в мире выросло в 2,78 раза. Однако относительное отклонение душевого потребления ВВП от среднемирового показателя по регионам распределилось неравномерно (рис. 1).

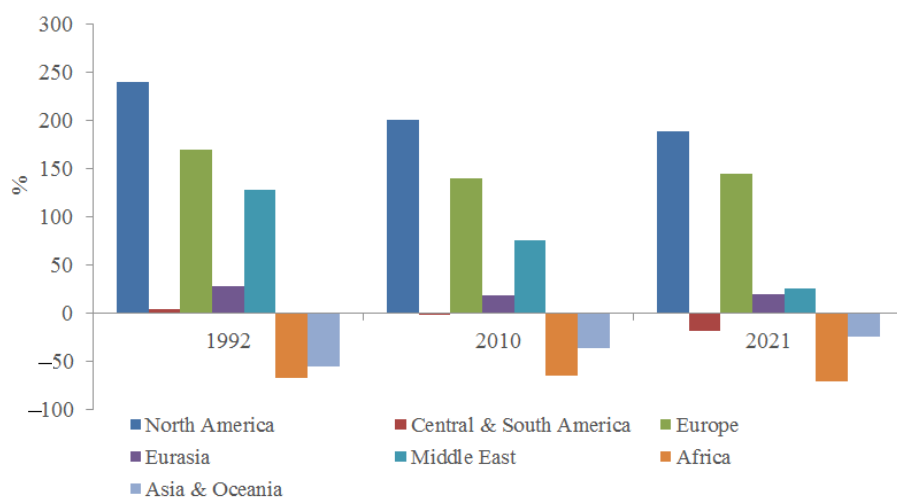


Рис. 1. Отклонение от среднемирового показателя региональной доли душевого потребления ВВП, % (Собственная разработка авторов на основании источника [9])

Fig. 1. Deviation from the world average of the regional share of GDP per capita consumption, % (Own development based on the source [9])

По данным рис. 1, в 2021 г. в Северной Америке душевое потребление ВВП на 189,46 %, а в Европе на 145,25 % выше среднего показателя в мире. Страны Евразии и регион Ближнего Востока превысили этот показатель соответственно на 20,29 и 25,49 %.

Для многих стран налоговые убытки, возникающие от более низкого потребления электроэнергии, лежат в основе чистого эффекта, образованного комбинированным воздействием эффекта сопоставимости электромобиля с автомобилем с двигателем внутреннего сгорания и эффекта разноуровневого налогового бремени транспортных средств на источниках ископаемого топлива и электроэнергии, в том числе возобновляемых источников. По оценке зарубежных экспертов, к 2030 г. глобальный парк электромобилей способен вызвать чистые потери по налогам и сборам на ископаемое топливо около 75–90 млрд дол. США (или почти годовой валовой внутренний продукт Республики Беларусь, рассчитанный по номинальному курсу). Очевидно и то, что те страны, которые применили более высокие ставки налога на нефтепродукты и не предложили адаптивного механизма налогообложения, гибко реагирующего к изменениям на рынке, будут иметь более высокие чистые потери.

Адаптивный механизм стабилизации налоговых поступлений включает меры долгосрочного стимулирующего характера, к которым относятся:

- более высокие ставки налогов на ископаемое топливо, дифференцированные на расстояние пробега автомобилем;
- вновь введенные налоги и сборы на транспортные средства высокоуглеродистого топлива по месту и типам транспортных средств;
- более низкие ставки налогов на транспорт с нулевым выбросом парниковых газов, дифференцированные по расстоянию пробега и времени и др.

В Республике Беларусь созданы комфортные условия для развития электромобильных транспортных средств [10–13]. Указом № 447 от 22.11.2021, в новой редакции Указа № 92 от 12.03.2020 «О стимулировании использования электромобилей», своевременно приведены в действие меры экономико-организационного

стимулирования развития электрического транспорта Беларуси:

- электромобили освобождаются от уплаты пошлины за выдачу разрешения на допуск к участию в дорожном движении;
- зарядные станции не будут облагаться НДС, а земельные участки для их строительства будут передаваться в аренду бесплатно;
- предприятия, которые уже имеют на балансе зарядные устройства для электромобилей, освобождены от НДС;
- до 2026 г. парковаться на электромобилях можно будет бесплатно в специально оборудованных местах;
- производители электромобилей и электрозарядных станций, а также эксплуатирующие их организации получили право применять повышенный инвестиционный вычет в порядке, установленном Налоговым кодексом;
- ввозимые юридическими лицами на территорию Республики Беларусь электромобили, с даты выпуска которых прошло не более 5 лет, освобождаются от налога на добавленную стоимость;
- при ввозе электромобилей с территории государств – членов Евразийского экономического союза действует мера при надлежащем основании для применения освобождения от налога на добавленную стоимость;
- применена нулевая процентная ставка налога на добавленную стоимость при ввозе на территорию Республики Беларусь в качестве товаров для личного пользования гражданами Республики Беларусь, а также иностранными гражданами и лицами без гражданства, постоянно проживающими в Республике Беларусь;
- обороты по реализации на территории Республики Беларусь электромобилей освобождены от налога на добавленную стоимость; и др.

ВЫВОДЫ

1. Поддержание экономических выгод и социальных преимуществ, в том числе выраженных в снижении выбросов вредных веществ в окружающую среду, устранении вибраций, шума, помех и других физиологических воздействий, оказывающих отрицательное влия-

ние на здоровье человека, является базой дальнейшего успешного развития транспортно-логистической системы на основе электрического транспорта.

2. Сокращению выбросов вредных веществ в окружающую среду по всем цепочкам замкнутого цикла производства электромобилей могут послужить «зеленые» технологии добычи и утилизации литий-ионных батарей, а также экологически чистые решения по двигателям внутреннего сгорания либо альтернативным им (на водородном топливе и др.).

3. Инновационные подходы к производству новых автотранспортных средств (электромобили, гибридные автомобили и др.), а также обеспечение их нетрадиционными двигателями (водородные и др.) способствуют снижению выбросов вредных веществ в атмосферу, поддержке возобновляемых источников энергии на транспорте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Экономический механизм развития транспортно-логистической деятельности на предприятиях: моногр. / Р. Б. Ивуть [и др.]. Минск: БНТУ, 2022. 240 с.
2. Месник, Д. Н. Развитие челночных перевозок транспортно-логистических услуг Беларуси / Д. Н. Месник, Д. А. Вечерко // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплекса: материалы национальной научно-практической конференции / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Тихоокеанский государственный университет; редкол.: П. И. Егоров (ответственный редактор) [и др.]. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2021. Вып. 21. С. 156–162.
3. Вечерко, Д. А. Развитие электронного документооборота международных автомобильных перевозок грузов Республики Беларусь / Д. А. Вечерко, Д. Н. Месник // X форум вузов инженерно-технологического профиля союзного государства: сб. материалов / Постоянный комитет союзного государства, Министерство образования Республики Беларусь, Министерство образования и науки Российской Федерации, Белорусский национальный технический университет. Минск: Изд-во БНТУ, 2021. С. 21–22.
4. О транспортно-экспедиторской деятельности [Электронный ресурс]: Закон Республики Беларусь от 13.06.2006, № 124-З // Kodeksy-by. Режим доступа: https://kodeksy-by.com/o_transportno-ekspeditsionnoj_deyatelnosti.htm/. Дата доступа: 09.11.2022.

5. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 г. / Национальная комиссия по устойчивому развитию Республики Беларусь; редкол.: Я. М. Александрович [и др.]. Минск: Юнипак, 2014. 132 с.
6. Транспорт дорожный. Основные термины и определения. Классификация: ГОСТ 31286-2005. Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2006. 23 с.
7. Ивуть, Р. Б. Исследование выбросов вредных веществ от мобильных источников и их влияние на развитие «зеленой» экономики в Республике Беларусь / Р. Б. Ивуть, Д. Н. Месник // Новости науки и технологий. 2022. № 2 (61). С. 19–26.
8. [Electronic Resource]. Access mode: <https://mail.google.com/mail/u/0/?tab=rm&ogbl#inbox/FMfcgwxGDDnSZMdrtsXmmRDKVvQDbzm>. Access date: 09.11.2022.
9. Data and statistics [Electronic Resource] // IEA. Mode of access: <https://www.iea.org/data-and-statistics>. Date of access: 09.11.2022.
10. Об изменении Указа Президента Республики Беларусь (корректируется Указ № 92 от 12 марта 2020 г. «О стимулировании использования электромобилей») [Электронный ресурс]: Указ Президента Респ. Беларусь, 22 нояб. 2021 г., № 447. Режим доступа: <https://president.gov.by/ru/documents/ukaz-no-447-ot-22-noyabrya-2021-g>. Дата доступа: 11.10.2022 г.
11. Об утверждении Методики расчета показателей (индикаторов) Государственной программы Российской Федерации «Развитие транспортной системы» [Электронный ресурс]: Приказ Министерства транспорта Российской Федерации, 06 июня 2022, № 213. Режим доступа: <https://mintrans.gov.ru/documents/2/11890>. Дата доступа: 03.11.2022.
12. Месник, Д. Н. Структурные сдвиги отраслей Республики Беларусь в посткризисный период и эффективность трансфертных преобразований / Д. Н. Месник // Аграрная экономика. 2019. № 8 (291). С. 24–33.
13. Анализ развития различных видов городского электрического транспорта в Полоцке и Новополоцке / Д. В. Капский [и др.] // Наука и техника. 2022. Т. 21, № 2. 150–157. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-150-157>

Поступила 08.11.2022

Подписана в печать 10.01.2023

Опубликована онлайн 31.05.2023

REFERENCES

1. Ivut' R. B., Lapkovskaya P. I., Myasnikova O. V., Mesnik D. N. (2022) *Economic Mechanism for the Development of Transport and Logistics Activities at Enterprises: Monograph*. Minsk, Belarusian National Technical University, 240 (in Russian).
2. Mesnik D. N., Vecherko D. A. (2021) Development of Shuttle Transportation of Transport and Logistics Services in Belarus. *Dal'nii Vostok: Problemy Razvitiya Arkhitekturno-Stroitel'nogo i Dorozhno-Transportnogo Kompleksa: Materialy Natsional'noi Nauchno-Prakticheskoi Kon-*

- ferentsii* [Far East: Problems of Development of the Architectural, Construction and Road Transport Complex: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference]. Khabarovsk, Publishing House of the Pacific National University, Iss. 21, 156–162 (in Russian).
3. Vecherko D. A., Mesnik D. N. (2021) Development of Electronic Document Circulation of International Road Transport of Goods of the Republic of Belarus. *X Forum Vuzov Inzhenerno-Tekhnologicheskogo Profilya Soyuznogo Gosudarstva: Sbornik Materialov* [10th Forum of Universities of Engineering and Technological Profile of the Union State: Collection of Materials]. Minsk, Belarusian National Technical University Publishing House, 21–22 (in Russian).
 4. On the Transport-Forwarding Activity: Law of the Republic of Belarus Dated 13.06.2006 No 124-Z. *Kodeksy-by*. Available at: https://kodeksy-by.com/o_transportno-ekspeditsionnoj_deyatelnosti.htm/ (accessed 09 November 2022) (in Russian).
 5. National Commission for Sustainable Development of the Republic of Belarus; Alexandrovich Ya. M. (ed.), [et al.] (2014) *National Strategy for Sustainable Socio-Economic Development of the Republic of Belarus for the Period up to 2030*. Minsk, Unipak Publ, 132 (in Russian).
 6. State Standard 31286-2005 *Road Vehicles. General Terms and Definitions. Classification*. Minsk, Gosstandart of the Republic of Belarus, 2006, 23 (in Russian).
 7. Ivut R. B., Mesnik D. N. (2022) Study of Emissions of Harmful Substances from Mobile Sources and Their Impact on the Development of the “Green” Economy in the Republic of Belarus. *Novosti Nauki i Tekhnologiy* [News of Science and Technology], (2), 19–26 (in Russian).
 8. [Electronic Resource]. Access mode: <https://mail.google.com/mail/u/0/?tab=rm&ogbl#inbox/FMfcgxwGDDnSZMdrtsXmmRDKVvQDbzm>. Access date: 09.11.2022.
 9. Data and Statistics. *IEA*. Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics> (accessed 09 November 2022) (in Russian).
 10. *On Changing the Decree of the President of the Republic of Belarus (the Decree No 92 of March 12, 2020 is Being Corrected) “On Stimulating the Use of Electric Vehicles”*: Decree of the President of the Republic of Belarus, November 22, 2021, No 447. Available at: <https://president.gov.by/ru/documents/ukaz-no-447-ot-22-noyabrya-2021-g> (accessed 11 October 2022) (in Russian).
 11. *On Approval of the Methodology for Calculating Indicators of the State Program of the Russian Federation “Development of the Transport System”*: Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation, June 06, 2022, No 213. Available at: <https://mintrans.gov.ru/documents/2/11890> (accessed 03 November 2022) (in Russian).
 12. Mesnik D. N. (2019) Structural Shifts in the Industries of the Republic of Belarus in the Post-Crisis Period and the Effectiveness of Transfer Reforms. *Agrarnaya Ekonomika = Agrarian Economics*, (8), 24–33 (in Russian).
 13. Kapskiy D. V., Kuzmenko V. N., Krasilnikava A. S., Semchenkov S. S., Kot E. N., Larin O. N. (2022) Analysis of Development of Various Types of Urban Electric Transport in Polotsk and Novopolotsk. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 21 (2), 150–157. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-150-157> (in Russian).

Received: 08.11.2022

Accepted: 10.01.2023

Published online: 31.05.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-256-264>

УДК 338.28

К устойчивому дорожному хозяйству через производство негаресурсов

Магистр Е. М. Жуковский¹⁾, канд. техн. наук, доц. С. Е. Кравченко¹⁾,
докт. экон. наук, проф. Н. В. Шехова²⁾

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

²⁾Санкт-Петербургский государственный экономический университет (Санкт-Петербург,
Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. В статье рассмотрена актуальная проблема достижения устойчивого развития через обеспечение устойчивости отдельных отраслей национальной экономики, в частности дорожного хозяйства. Раскрыто понятие «устойчивое развитие» и оценены шаги по его достижению в Республике Беларусь в настоящее время. Кроме того, предпринята попытка обосновать влияние устойчивости дорожного хозяйства как составной и связующей части субъектов экономики на устойчивое развитие стран и регионов. Рассмотрено влияние дорожного хозяйства на элементы устойчивого развития и оценены его дальнейшие перспективы. Для этого предложено рассматривать влияние дорожного строительства на различных структурных уровнях: мега-, мезо-, макро- и микроуровне, которые затрагивают все аспекты дорожного хозяйства, такие как проектирование, строительство, содержание и ремонт, производство строительных материалов и изделий. Рассмотрена возможность реализации концепции негаресурсов в дорожном хозяйстве. Под негаресурсами понимают потенциальные ресурсы, которые формируются в результате совершенствования процессов обращения с конечной продукцией за счет рационализации ее потребления, а также с исходными ресурсами за счет оптимизации отдельных стадий производственного и логистического циклов. Рынок негаресурсов может быть создан по примеру существующего рынка квот на выбросы в рамках Киотского протокола и Парижского соглашения по климату. В дорожном хозяйстве сегодня имеется множество перспективных технологий, при применении которых образуется большое количество негаресурсов. Так, учет негаресурсов в жизненном цикле транспортных сооружений, а также создание системы материального стимулирования на основе негаресурсов позволят обеспечить устойчивость дорожного строительства, а вместе с тем и устойчивое развитие страны и региона в целом.

Ключевые слова: устойчивое развитие, дорожное строительство, негаресурсы, экологическая безопасность, экономическая безопасность, экономическая эффективность, ресурсосбережение, энергосбережение, ответственное потребление

Для цитирования: Жуковский, Е. М. К устойчивому дорожному хозяйству через производство негаресурсов / Е. М. Жуковский, С. Е. Кравченко, Н. В. Шехова // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 3. С. 256–264. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-256-264>

Toward Sustainable Road Infrastructure Through Production of Nega-Resources

Ya. M. Zhukouski¹⁾, S. E. Kravchenko¹⁾, N. V. Shehova²⁾

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

²⁾Saint Petersburg state university of economics (Saint Petersburg, Russian Federation)

Abstract. The paper deals with the actual problem of achieving sustainable development, through ensuring the sustainability of certain sectors of the national economy, in particular the road sector. The concept of “sustainable development” has been revealed and the steps to achieve it in the Republic of Belarus today have been assessed. In addition, an attempt has

Адрес для переписки

Жуковский Егор Михайлович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 237-38-81
zhukovskye@gmail.com

Address for correspondence

Zhukovski Yavor M.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 237-38-81
zhukovskye@gmail.com

been made to substantiate the impact of the sustainability of the road sector, as an integral and connecting part of economic entities on the sustainable development of countries and regions. The influence of the road sector on the elements of sustainable development is considered and its further prospects are assessed. For this, it is proposed to consider the impact of road construction at various structural levels: mega-, meso-, macro- and micro-level, which affect all aspects of the road economy, such as design, construction, maintenance and repair, production of building materials and products. The possibility of implementing the concept of nega-resources in the road sector is considered. Nega-resources are understood as such potential resources that are formed as a result of improving the processes of handling the final product by rationalizing its consumption, as well as with initial resources by optimizing individual stages of the production and logistics cycles. A market for nega-resources could be created following the example of the existing market for emissions allowances under the Kyoto Protocol and the Paris Climate Agreement. The road sector today has many promising technologies, the use of which generates a larger amount of nega-resources. So taking into account nega-resources in the life cycle of transport facilities, as well as creating a system of material incentives based on nega-resources, will ensure the sustainability of road construction, and at the same time the sustainable development of the country and the region as a whole.

Keywords: sustainable development, highway engineering, nega-resources, environmental safety; economic security; economic efficiency; resource saving; energy saving; responsible consumption

For citation: Zhukouski Ya. M., Kravchenko S. E., Shehova N. V. (2023) Toward Sustainable Road Infrastructure Through Production of Nega-Resources. *Science and Technique*. 22 (3), 256–264. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-256-264> (in Russian)

Введение

Согласно докладу Всемирной комиссии по вопросам окружающей среды и развития, человечество должно придать развитию «устойчивый и долговременный характер, с тем чтобы оно отвечало потребностям нынешнего поколения, не лишая будущие поколения возможности удовлетворять свои потребности» [1, с. 24]. Устойчивое развитие предполагает такие экономические и социальные реформы, при которых эксплуатация природных ресурсов, направление инвестиций, научно-техническое развитие и развитие личности, а также институциональные изменения согласованы друг с другом и укрепляют потенциал для удовлетворения потребностей человека.

Изначально эти идеи вылились в Цели развития тысячелетия, принятые Генеральной ассамблеей Организации Объединенных Наций в 2000 г. [2]. Стоит отметить, что это была первая попытка интегрировать принципы устойчивого развития в социально-экономическую жизнь государств и общества. В 2015 г. подводились итоги данной программы и, согласно итоговому отчету [3], программа в целом признана успешной.

Поскольку данная программа включала в себя только элементы устойчивого развития, в дальнейшем эта идея трансформировалась в принятие Генеральной ассамблеей ООН в 2015 г. Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 г. [4]. Данная Повестка включает в себя Цели устойчивого развития (17 пунк-

тов), выполнение которых поможет внести положительный вклад в решение глобальных проблем.

Достижение данных Целей возможно только совместными усилиями мирового сообщества, и выполняются они государствами в рамках их возможностей. Республика Беларусь одна из первых приняла к реализации Цели устойчивого развития, и для координации усилий учрежден институт Национального координатора по достижению Целей устойчивого развития и создан Совет по устойчивому развитию [5].

Ключевой задачей на сегодняшний момент является создание устойчивых отраслей национальной экономики как составных частей развития государства. Одна из главных отраслей экономики – транспорт и дорожное хозяйство как ее неотъемлемая часть. Профессор В. В. Звонков в середине XX в. писал: «Транспорт – главный нерв экономической жизни страны» [6, с. 651]. И сегодня транспорт играет эту же роль, обеспечивая связи между субъектами национальной и мировой экономики и в целом влияя на экономическое развитие [7, 8]. Таким образом, импульсом для устойчивого развития как отдельных отраслей, так и государств и регионов в целом может стать дорожное хозяйство как связующее звено между субъектами экономики.

Устойчивое дорожное хозяйство сегодня

Под устойчивым можно понимать такое дорожное хозяйство, которое способствует до-

стижению устойчивого развития в экологическом, социальном и экономическом направлениях. Устойчивое дорожное хозяйство рассматривает вопросы экономической и энергетической эффективности, экологической безопасности и взаимодействия дороги и человека не как отдельные проблемы, а как комплексную.

Дорожное хозяйство сегодня затрагивает девять следующих Целей устойчивого развития. Это: 6. Чистая вода и санитария; 7. Недорогостоящая и чистая энергия; 8. Достойная работа и экономический рост; 9. Индустриализация, инновации и инфраструктура; 11. Устойчивые города и населенные пункты; 12. Ответственное потребление и производство; 13. Борьба с изменениями климата; 14. Сохранение морских экосистем; 15. Сохранение экосистем суши.

Для оценки влияния дорожного хозяйства на все сферы жизнедеятельности человека и, как итог, на устойчивое развитие рассмотрим его на мега-, мезо-, макро- и микроуровнях (рис. 1).

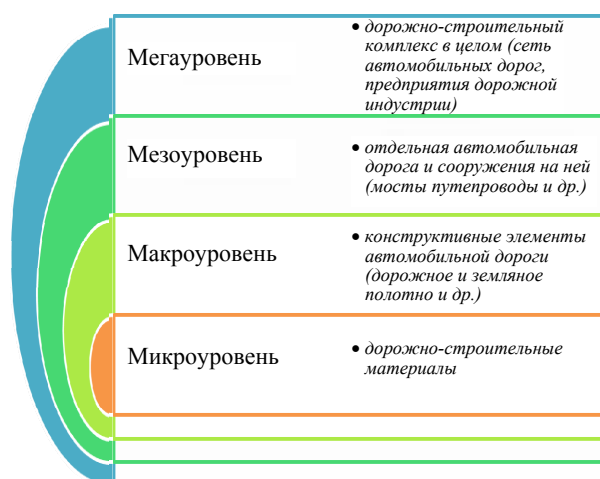


Рис. 1. Структурная схема влияния дорожно-строительного комплекса на составляющие устойчивого развития

Fig. 1. Block diagram of impact of road construction complex on components of sustainable development

Под мегауровнем понимается влияние всего дорожно-строительного комплекса на всех этапах жизненного цикла автомобильной дороги, таких как проектирование, строительство, содержание и ремонт. Сюда входит как сама автомобильная дорога и транспорт на ней, так и предприятия дорожной индустрии. Поскольку автомобильные дороги имеют значительную

протяженность, а предприятия, обслуживающие их, расположены по территории всей страны, устойчивости на мегауровне можно достичь, только обеспечив устойчивость более низких уровней.

К мезоуровню можно отнести саму автомобильную дорогу и сооружения на ней. На мезоуровне рассматривается воздействие отдельной автомобильной дороги как одного целого, без учета ее конструктивных частей.

Сегодня дороги должны быть одновременно дешевыми в строительстве и долговечными, обеспечивать требуемую безопасность движения и высокую скорость перевозки грузов, при этом оказывать минимальное техногенное воздействие на окружающую среду и негативное воздействие на здоровье и психоэмоциональное состояние людей, живущих рядом. Так, эти вопросы, например взаимодействие дороги и человека, взаимодействие дороги с окружающей средой, как правило, решаются при трассировании автомобильных дорог [9] и обычно не требуют радикальных или кардинально новых принципов проектирования, материалов и технологий.

Отдельные конструктивные элементы автомобильной дороги, например такие, как земляное и дорожное полотно, мосты и трубы, находятся на макроуровне влияния. На этом уровне могут возникать следующие проблемы: преждевременное разрушение дорожных конструкций и искусственных сооружений, повышенная шумность и эмиссия загрязняющих веществ от транспортных средств и др. При этом стоит понимать, что данные проблемы возникают не только в системе «дорога – автомобиль», разрушенное покрытие негативно влияет на транспортное средство, вызывая его поломки, что требует большого количества запасных частей и принадлежностей. Для решения данных проблем традиционалистских подходов недостаточно, здесь необходимо прибегать как к новым подходам к конструированию и проектированию, так и к новым дорожно-строительным материалам и технологиям.

К микроуровню относятся элементы, составляющие основу качества и долговечности автомобильных дорог, – дорожно-строительные материалы и технологии их производства.

К сожалению, современные требования, предъявляемые к материалам, не везде позволяют использовать их в исходном виде. Поэтому данные материалы должны быть подвергнуты технологической обработке. Сырье для производства многократно подвергается различным механическим, физическим и химическим воздействиям, которых, в конечном итоге, можно было бы избежать или значительно уменьшить их.

Сами по себе дорожно-строительные материалы при правильном их выборе и надлежащих условиях эксплуатации не могут оказывать какое-либо негативное воздействие. Наибольшую сложность оказывают существующие технологии изготовления строительных материалов. В своем большинстве эти технологии требуют колоссальных затрат материальных и энергетических ресурсов, причем зачастую используемых нерационально и неэффективно, что сказывается, в конечном итоге, не только на себестоимости строительных материалов и строительного производства в целом, но и на состоянии окружающей среды в районах расположения данных предприятий, а также на здоровье их сотрудников.

Основным сырьем для изготовления строительных материалов являются минеральные материалы, получаемые из горных пород в результате разработки их месторождений, как правило открытым способом. Это приводит к выводу из оборота сельскохозяйственных земель, существенному изменению гидрологического режима местности, загрязнению почв и грунтовых вод. При нерациональной разработке это может привести к колоссальному ущербу окружающей среде, без возможностей дальнейшего восстановления. Кроме минеральных материалов в дорожном строительстве широко применяются битумы, которые производятся из ископаемой нефти. Они оказывают негативное влияние на окружающую среду, и поэтому необходимо использовать их рационально.

В настоящий момент одной из основных задач строительства является совершенствование существующих или создание новых эффективных технологий изготовления строительных материалов. Причем эти технологии должны быть менее энергозатратными, чем имеющиеся

сегодня. Это позволит снизить затраты на изготовление строительных материалов, а также улучшить экологическую ситуацию в целом, что, в конечном итоге, сможет помочь достижению устойчивого развития как отрасли, так и страны в целом.

В Республике Беларусь постепенно уходят от строительства новых дорог. Так, первоочередными задачами на 2021–2025 гг., согласно Государственной программе «Дороги Беларуси» [10], являются: «улучшение транспортно-эксплуатационного состояния республиканских автомобильных дорог», «повышение качественных показателей республиканских автомобильных дорог», «улучшение транспортно-эксплуатационного состояния местных автомобильных дорог». Реализация данных задач происходит в основном путем реконструкции и ремонта дорог. Отдельные участки нового строительства возможны только в местах обходов населенных пунктов. Это объясняется тем, что автодорожная сеть страны полностью сформирована. Такая ситуация в целом характерна для развитых стран и стран с относительно небольшой площадью [11].

Таким образом, на сегодняшний день обеспечить устойчивость на мега- и мезоуровнях дорожного строительства практически невозможно, при этом обеспечение устойчивого развития через макро- и микроуровень не должно вызывать особых затруднений. Однако стоит понимать, что переход на принципы устойчивого развития дорожных организаций – весьма сложный и длительный процесс. С одной стороны, его можно объяснить инертностью и традиционализмом данной отрасли, а с другой – отсутствием стимулирования перехода на данные принципы.

Для стимулирования дорожного хозяйства, в целях обеспечения его устойчивости, может использоваться концепция негаресурсов.

Общие понятия о концепции и рынке негаресурсов

Концепция негаресурсов предложена Н. В. Овчинниковой как «один из инструментов интернационализации внешних эффектов в природопользовании» [12].

Негаресурсы – это «такие потенциальные ресурсы, которые формируются в результате

совершенствования процессов обращения с конечной продукцией за счет рационализации ее потребления, а также с исходными ресурсами за счет оптимизации отдельных стадий производственного и логистического циклов» [12]. Как правило, они формируются в сфере обращения и связаны с улучшением процессов обращения с конечной продукцией, вызванных рационализацией потребления. Кроме того, они могут образовываться на стадиях оптимизации производственных и логистических циклов. Формирование негаресурсов связано с совершенствованием общественных институтов (организации экономической деятельности) и носит организационный (институциональный) характер. При применении традиционных технологических решений у конечных потребителей возникают дополнительные расходы, что является существенным недостатком и ограничением.

Процесс формирования негаресурсов может быть описан примером: «Для сокращения выбросов углекислого газа в атмосферу при производстве электроэнергии возможно прибегнуть к традиционному технологическому подходу – установить фильтрующие элементы или перейти на альтернативные источники энергии. Организационным подходом будет являться сбережение электроэнергии за счет изменения условий ее использования, например изменения технологий и режима производственных процессов, тепловая модернизация зданий. При этом сэкономленная энергия образует негаватт-часы, то есть потенциальные ватт-часы, которые могли бы быть произведены. Таким образом сэкономленная энергия и является негаресурсом» [14].

Негаресурсы потенциально являются отдельным товаром, равноценным исходным ресурсам, что создает экономические выгоды участникам. Они также могут быть элементом материального стимулирования для снижения экологического воздействия на окружающую среду, что реализуется системой поощрений и штрафов, например оплата за произведенные негакилометры поездок, негалитры топлива и т.д. или штрафы за использование ресурсов сверх норм. Сегодня основная задача заключается в разработке и внедрении методов материального стимулирования на основе не-

ресурсов в отраслях экономики. Так, рыночные элементы решения экологических проблем могут быть более эффективными, чем командно-контрольные, то есть установление норм и требований для каждого производственного объекта [15, 16].

Прообраз создания рынка негаресурсов в настоящее время существует в таких странах, как США, Германия, Япония и другие, однако на постсоветском пространстве он не получил должного развития [17]. Например, в качестве прообраза рынка негаресурсов можно рассматривать рынок эмиссионных квот. Он появился в результате подписания Рамочной конвенции ООН об изменении климата [18] в 1992 г., основной целью которой являлась защита климатической системы путем стабилизации концентрации парниковых газов.

Одним из инструментов реализации положений Рамочной конвенции [18] являлось принятие в 1998 г. Киотского протокола [19], где были установлены квоты на выброс диоксида углерода странами-участниками соглашения. Одна из возможностей данного Протокола – торговля квотами на выбросы между странами-участниками: если одна страна не укладывается в установленные квоты, то она может приобрести права на дополнительные выбросы у других стран, если их эмиссия загрязняющих веществ меньше установленных квот. Как правило, квоты реализовывались из развитых стран в развивающиеся. В Парижском соглашении [20], принятом в 2015 г. взамен Киотского протокола [19], система торговли выбросами сохранена. В будущем рекомендуется постепенный отказ от этого, поскольку Парижское соглашение подразумевает, что все страны должны иметь цели в области смягчения последствий изменения климата, в отличие от Киотского протокола, где страны были разделены на имеющие экологические обязательства (развитые) и без экологических обязательств (развивающиеся) [21].

Однако рынок эмиссионных квот создает ряд проблем, поскольку основным здесь является не потенциально сэкономленный ресурс, а загрязняющие вещества. Так, возможность купли-продажи квот на выбросы парниковых газов вызывает снижение их эмиссии в одних регионах и рост в других, что не приводит к решению экологических проблем. Отдельным

участникам рынка выгодно проводить модернизацию производства с целью высвобождения квот для их последующей продажи, а другим – выгодно сохранить status quo и продолжать производственную деятельность, опасную для окружающей среды.

Таким образом, хотя рынок эмиссионных квот довольно спорный, его механизм взаимодействия между участниками может использоваться при создании рынка негаресурсов, которые являются важным элементом устойчивого развития и могут стать основой устойчивости дорожного хозяйства.

Возможности производства и использования негаресурсов в дорожном строительстве

Сегодня в дорожном хозяйстве существует реальная возможность реализации концепции негаресурсов, так как имеются технологии, внедрение которых позволит производить последние в значительных объемах. Причем образуются негаресурсы как материальные, так и энергетические.

В качестве примера рассмотрим различные технологии и методы, когда при их применении происходит образование негаресурсов, известные сегодня, но широко не используемые.

Теплые асфальтобетонные смеси готовятся с использованием менее вязкого битума. Температура укладки таких смесей составляет 80 °С, что значительно меньше, чем при укладке традиционных горячих смесей [22]. Поэтому для их приготовления требуется затратить меньшее количество энергии. Таким образом, можно говорить о производстве энергетических негаресурсов. Кроме того, необходимо учитывать, что смеси подвергаются минимальной тепловой обработке. Поэтому снижается скорость процессов старения битума, что существенно влияет на долговечность дорожных покрытий. Это позволяет говорить о том, что происходит формирование материальных и трудовых негаресурсов (негатонны ремонтных материалов, негачеловеко-часы).

Вспенивающий эффект битума. Для качественного асфальтобетона необходимо, чтобы битум полностью покрывал зерна минерально-

го материала, и поэтому битум нагревают для снижения его вязкости. Один из возможных способов снижения вязкости битума и повышения его активности – его вспенивание [23], которое может осуществляться непосредственно в смесителе (организационное решение) [24, 25]. Основным материальным негаресурсом являются негатонны битума, поскольку вспенивание битума позволяет сократить его расход без нанесения ущерба качеству асфальтобетонных смесей. Также снижение температуры нагрева битума позволяет сокращать расход энергоресурсов на подготовку материалов, тем самым создавая энергетические негаресурсы. Кроме того, это также позволяет создавать негаресурсы на стадии эксплуатации и ремонта дорог.

Разнопрочные дорожные одежды отличаются от традиционных тем, что их прочностные характеристики распределены неравномерно по ширине проезжей части, что позволяет учитывать реальное разрушающее воздействие от комплекса факторов [26, 27]. Распределение прочностных параметров, в первую очередь, вызывается перераспределением материалов в поперечном профиле автомобильной дороги [28, 29] и не требует принципиально иного подхода к процессу организации строительных работ, необходимо только их совершенствование. Устройство разнопрочных дорожных одежд позволяет увеличить их срок службы, что приводит к снижению объемов текущего ремонта. Это создает негаресурсы на стадии ремонта и эксплуатации дорог.

Виды негаресурсов, образующихся на этапах жизненного цикла автомобильной дороги, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Виды негаресурсов, образующихся в дорожном хозяйстве

Types of nega-resources generated in road sector

Этап жизненного цикла	Производство исходного сырья	Производство строительных материалов	Строительство и эксплуатация
Негаресурсы	Материальные, трудовые	Материальные, энергетические	Материальные, трудовые

Процесс образования негаресурсов в дорожном хозяйстве связан, в первую очередь, со стадией производства дорожно-строительных материалов, то есть происходит на микро-

уровне влияния. Однако это оказывает существенное влияние на все этапы жизненного цикла автомобильной дороги или иного транспортного сооружения: совершенствование этапа производства строительных материалов приводит к улучшению качества конечной продукции, тем самым снижая потребность в новых строительных материалах (образуются материальные негаресурсы). Снижение потребности в строительных материалах вызывает снижение потребности в исходном сырье для их производства, т. е. производство материальных негаресурсов тем самым снижает воздействие на окружающую среду.

Основным способом реализации концепции негаресурсов может стать система материальных поощрений и штрафов. Предлагается при создании дорожными организациями негаресурсов оплачивать им не только фактические затраты ресурсов, но также и произведенные негаресурсы.

Что касается негаресурсов, образующихся в отдаленной перспективе, например при производстве ремонтных работ, предлагается следующая система стимулирования: на основании данных о текущем состоянии дорог, объемах и стоимости ремонтов установить норму денежных средств, которые могут быть затрачены на проведение ремонтов в течение срока службы. Если в результате применения тех или иных решений объем затрат на производство ремонтных мероприятия оказывается меньше установленной нормы, то есть имеется факт производства негаресурсов, то данная разница выплачивается организации. Если имеется превышение объемов данных средств, то таких выплат не происходит. Наоборот, на организацию накладывается штраф в размере части суммы потенциально произведенных негаресурсов.

Метод поощрений и штрафов позволит не только повысить качество производства работ по строительству дорог (организациям будет выгодно проводить работы качественно и получать дополнительный доход с этого вместо оплаты штрафов), но и перенаправить полученные средства на совершенствование производства, поощрение сотрудников и другие цели, связанные с деятельностью предприятия. Все это позволит перейти к устойчивому дорожному хозяйству и помочь в достижении устойчивого развития.

ВЫВОДЫ

1. Эффективным способом достижения устойчивого развития может стать применение концепции негаресурсов, то есть потенциальных ресурсов, образующихся при оптимизации экономической деятельности.

2. В настоящий момент в дорожной отрасли существует вопрос практической реализации концепции негаресурсов. Одно из возможных решений – их систематизация и последующий учет в сметно-финансовых расчетах проектов строительства, реконструкции, ремонта и содержания дорожных сооружений, а также создание и использование системы материального стимулирования (системы поощрений – штрафов).

ЛИТЕРАТУРА

1. Развитие и международное экономическое сотрудничество: проблемы окружающей среды [Электронный ресурс]: доклад Всемирной комиссии по вопросам окружающей среды и развития от 4 августа 1987 г., A/42/427 / Организация Объединенных Наций. Генеральная ассамблея. 1987. Режим доступа: <https://undocs.org/ru/a/42/427> (дата доступа: 23.10.2019).
2. Декларация тысячелетия Организации Объединенных Наций [Электронный ресурс]: резолюция, принятая Генеральной Ассамблеей 8 сентября 2000 г., A/RES/55/2 / Организация Объединенных Наций. Генеральная ассамблея. Режим доступа: <https://undocs.org/ru/a/res/55/2> (дата доступа: 04.08.2022).
3. Цели развития тысячелетия: доклад за 2015 год. Нью-Йорк: ООН, 2015. 72 с.
4. Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года [Электронный ресурс]: резолюция, принятая Генеральной Ассамблеей 25 сентября 2015 г., A/RES/70/1 / Организация Объединенных Наций. Генеральная ассамблея. Режим доступа: <https://undocs.org/ru/a/res/70/1> (дата доступа: 23.10.2019).
5. О Национальном координаторе по достижению Целей устойчивого развития [Электронный ресурс]: Указ Президента Республики Беларусь, 25 мая 2017 г., № 181 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Национальный центр правовой информации Республики Беларусь. Минск, 2022.
6. Иосифу Виссарионовичу Сталину Академия наук СССР: [в ознаменование семидесятилетия Иосифа Виссарионовича Сталина] / [ред. коллегия: акад. С. И. Вавилов (гл. ред.) и др.]. М.: Изд-во АН СССР, 1949. 773 с.
7. Финансовая диета: реформы государственных финансов Беларуси / К. В. Рудый [и др.]; под науч. ред. К. В. Рудого. Минск: Звезда, 2016. 464 с.
8. Лазарев, Ю. Г. Транспортная инфраструктура (автомобильные дороги) / Ю. Г. Лазарев. Германия: LAP LAMBERT, 2015. 173 с.
9. Бабков, В. Ф. Ландшафтное проектирование автомобильных дорог: учеб. пособие для студ. автомобильно-

- дорожных специальностей высших учебных заведений / В. Ф. Бабков. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Транспорт, 1980. 187 с.
10. О Государственной программе «Дороги Беларуси» на 2021–2025 годы [Электронный ресурс]: Постановление Совета Министров Республики Беларусь, 9 апреля 2021, № 212 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Национальный центр правовой информации Республики Беларусь. Минск, 2022.
 11. Лапин, Р. П. Оценка густоты дорожной сети / Р. П. Лапин // Молодой ученый. 2016. № 12 (116). С. 311–314.
 12. Овчинникова, Н. В. Экономические основы интернализации внешних эффектов в природопользовании: автореф. дисс. ... д-ра экон. наук. СПб.: Санкт-Петербургский гос. экон. ун-т, 2007. 32 с.
 13. Yujie Lu, Effectiveness and Equity Implications of Carbon Policies in the United States Construction Industry / Yujie Lu, Xinyuan Zhu, Qingbin Cui // Building and Environment. 2012. Vol. 49. P. 259–269. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.10.002>.
 14. Шехова, Н. В. Оптимизация строительства энергетических объектов посредством производства негаресурсов [Электронный ресурс] / Н. В. Шехова // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Социально-гуманитарные и экономические науки: сб. статей / Самарский государственный технический университет. Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, 2017. С. 202–205. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29918425&pff=1>.
 15. Stavins, R. N. What Can We Learn from the Grand Policy Experiment? Lessons from SO₂ Allowance Trading / R. N. Stavins // Journal of Economic Perspectives. 1998. Vol. 12, Iss. 3. P. 69–88. <https://doi.org/10.1257/jep.12.3.69>.
 16. Kraft, M. E. Blue Skies, Green Politics: The Clean Air Act of 1990. Gary C. Bryner / M. E. Kraft // The Journal of Politics. 1994. Vol. 56, Iss. 3. P. 826–828. <https://doi.org/10.2307/2132198>.
 17. Щеголева, Е. П. Негаресурсы как основа устойчивого развития [Электронный ресурс] / Е. П. Щеголева // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре: материалы 71-й Всероссийской науч.-техн. конф. по итогам НИР 2013 года, Самара, 7–11 апреля 2014 года / под ред. М. И. Бальзанникова, Н. Г. Чумаченко. Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, 2014. С. 243–247. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22279991>.
 18. Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата [Электронный ресурс] / Организация Объединенных Наций. 1992. Режим доступа: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convru.pdf> (дата доступа: 11.08.2022).
 19. Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата [Электронный ресурс] / Организация Объединенных Наций. 1998. Режим доступа: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kprus.pdf> (дата доступа: 11.08.2022).
 20. Парижское соглашение [Электронный ресурс] / Организация Объединенных Наций. 2015. Режим доступа: https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf (дата доступа: 11.08.2022).
 21. Good-bye Kyoto: Transitioning Away from Offsetting After 2020 [Electronic Resource]: Carbon Market Watch Policy Brief April 2017. Mode of access: https://carbonmarketwatch.org/wp-content/uploads/2017/04/Good-bye-Kyoto_Transitioning-away-from-offsetting-after-2020_WEB_1final.pdf (Date of access: 11.08.2022).
 22. Ковалев, Я. Н. Дорожно-строительные материалы и изделия: учеб.-метод. пособие для студ. специальности 1-70 03 01 «Автомобильные дороги» / Я. Н. Ковалев, С. Е. Кравченко, В. К. Шумчик. Минск: Новое знание; М.: Инфра-М, 2018. 628 с.
 23. Першин, М. Н. Вспененные битумы в дорожном строительстве / М. Н. Першин, Е. Н. Баринов, Г. В. Корневский. М.: Транспорт, 1989. 80 с.
 24. Жуковский, Е. М. Технологическая реализация применения вспенивающего эффекта битума при производстве асфальтобетонной смеси / Е. М. Жуковский, Д. Г. Игошкин, С. Е. Кравченко // Автомобильные дороги и мосты. 2019. № 1. С. 19–24.
 25. Chomicz-Kowalska, A. Study of the Simultaneous Utilization of Mechanical Water Foaming and Zeolites and Their Effects on the Properties of Warm Mix Asphalt Concrete / A. Chomicz-Kowalska, K. Maciejewski, M. M. Iwański // Materials. 2020. Vol. 13, No 2. P. 357. <https://doi.org/10.3390/ma13020357>.
 26. Факторы, определяющие характер напряженно-деформированного состояния дорожной конструкции на различных полосах движения транспорта / Е. М. Жуковский [и др.] // Автомобильные дороги и мосты. 2021. № 2 (28). С. 14–23.
 27. Влияние укрепленных элементов обочин на изменение дефектности по ширине дорожных покрытий / Е. М. Жуковский [и др.] // Автомобильные дороги и мосты. 2022. № 1 (29). С. 19–27.
 28. Жуковский, Е. М. Особенности воздействия транспорта на конструкции нежестких дорожных одежд и их учет при проектировании конструкций / Е. М. Жуковский, А. В. Корончик, С. Е. Кравченко // Каспий и глобальные вызовы: Материалы Междунар. науч.-практ. конф., Астрахань, 23–24 мая 2022 года / сост.: О. В. Новиченко [и др.]. Астрахань: Астраханский государственный университет, 2022. С. 888–893.
 29. Тришин, Г. Г. Прочность многополосных дорог / Г. Г. Тришин, Р. З. Порицкий, В. П. Корюков // Автомобильные дороги. 1978. № 9. С. 22–23.

Поступила 06.10.2022

Подписана в печать 27.02.2023

Опубликована онлайн 31.05.2023

REFERENCES

1. United Nations. General Assembly (1987) *Development and International Economic Cooperation: Environmental Issues: Report of the World Commission on Environment and Development Dated August 4, 1987, A/42/427*. Available at: <https://undocs.org/ru/a/42/427> (accessed 23 October 2019) (in Russian).
2. United Nations. General Assembly (2000) *United Nations Millennium Declaration: Resolution Adopted by the General Assembly on September 8, 2000. A/RES/55/2*. Available at: <https://undocs.org/ru/a/res/55/2> (accessed 04 August 2022) (in Russian).
3. United Nations (2015) *Millennium Development Goals: Report for 2015*. New York, United Nations. 72.
4. United Nations. General Assembly (2015) *Transformation of our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development: Resolution adopted by the General Assembly on*

- September 25, 2015, A/RES/70/1. Available at: <https://undocs.org/ru/a/res/70/1> (accessed 23 October 2019) (in Russian).
5. About the National Coordinator for the Achievement of the Sustainable Development Goals: Decree of the President of the Republic of Belarus, May 25, 2017. No 181. National Center of Legal Information of the Republic of Belarus. *Information Search System "ETALON". Legislation of the Republic of Belarus*. Minsk, 2022 (in Russian).
 6. Vavilov S. I. (ed.) (1949) *USSR Academy of Sciences to Joseph Vissarionovich Stalin: [in Commemoration of the 70th Birthday of Joseph Vissarionovich Stalin]*. Moscow, Publishing House of USSR Academy of Sciences. 773 (in Russian).
 7. Rudyi K. V., Shuleiko O. L., Prokhorik M. V., Sorokina T. V., Sakovich V. V., Osmolovskaya L. N., [et al.] (2016) *Financial Diet: Public Finance Reforms in Belarus*. Minsk, Zvyazda Publ, 464 (in Russian).
 8. Lazarev Yu. G. (2015) *Transport Infrastructure (Car Roads)*. Germany, LAP LAMBERT. 173 (in Russian).
 9. Babkov V. F. (1980) *Landscaping of Highways*. 2nd ed. Moscow, Transport Publ, 187 (in Russian).
 10. About the State Program "Roads of Belarus" for 2021–2025: Decree of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, April 9, 2021, No 212. National Center of Legal Information of the Republic of Belarus. *Information Search System "ETALON". Legislation of the Republic of Belarus*. Minsk, 2022 (in Russian).
 11. Lapin R. P. (2016) Assessment of Road Network Density in Belarus. *Molodoy Uchyony [Young Scientist]*, (12), 311–314 (in Russian).
 12. Ovchinnikova N. V. (2007) *Economic Bases of Internalization of External Effects in Nature Management*. Saint-Petersburg, Saint Petersburg State University of Economics, 32 (in Russian).
 13. Yujie Lu, Xinyuan Zhu, Qingbin Cui (2012) Effectiveness and Equity Implications of Carbon Policies in the United States Construction Industry. *Building and Environment*, 2012, 49, 259–269. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.10.002>.
 14. Shekhova N. V. (2017) Optimization of the Construction of Energy Facilities Through the Production of Nega-Resources. *Traditsii i Innovatsii v Stroitel'stve i Arkhitekture. Sotsial'no-Gumanitarnye i Ekonomicheskie Nauki: Sbornik Statei [Traditions and Innovations in Construction and Architecture. Social-Humanitarian and Economic Sciences: Collected Papers]*. Samara, Samara State University of Architecture and Civil Engineering, 202–205. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29918425&pff=1> (in Russian).
 15. Stavins R. N. (1998) What Can We Learn from the Grand Policy Experiment? Lessons from SO₂ Allowance Trading. *Journal of Economic Perspectives*, 12 (3), 69–88. <https://doi.org/10.1257/jep.12.3.69>.
 16. Kraft M. E. (1994) Blue Skies, Green Politics: The Clean Air Act of 1990. Gary C. Bryner. *The Journal of Politics*, 56 (3), 826–828. <https://doi.org/10.2307/2132198>.
 17. Shchegoleva E. P. (2014) Nega-Resources as a Basis for Sustainable Development. Balzannikov M. I., Chumachenko N. G. *Traditsii i Innovatsii v Stroitel'stve i Arkhitekture: Materialy 71-i Vserossiiskoi Nauch.-Tekhn. Konf. po Itogam NIR 2013 goda, Samara, 07–11 Aprelya 2014 goda [Traditions and Innovations in Construction and Architecture: Proceedings of the 71st All-Russian Scientific and Technical Conference on the Results of Research in 2013, Samara, April 07–11, 2014]*. Samara, Samara State University of Architecture and Civil Engineering, 243–247. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22279991> (in Russian).
 18. United Nations (1992) *United Nations Framework Convention on Climate Change*. Available at: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convru.pdf> (accessed 11 August 2022) (in Russian).
 19. United Nations (1998) *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Available at: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kprus.pdf> (accessed 11 August 2022) (in Russian).
 20. United Nations (2015) *Paris Agreement*. Available at: https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf (accessed 11 August 2022) (in Russian).
 21. *Good-bye Kyoto: Transitioning Away from Offsetting After 2020: Carbon Market Watch Policy Brief April 2017*. Available at: https://carbonmarketwatch.org/wp-content/uploads/2017/04/Good-bye-Kyoto_Transitioning-away-from-offsetting-after-2020_WEB_1final.pdf (accessed 11 August 2022) (in Russian).
 22. Kovalev Ya. N., Kravchenko S. E., Shumchik V. K. (2018) *Road Building Materials and Products*. Minsk, Novoye Znanie Publ.; Moscow, Infra-M Publ, 628 (in Russian).
 23. Pershin M. N., Barinov E. N., Korenevsky G. V. (1989) *Foamed Bitumen in Road Construction*. Moscow, Transport Publ, 80 (in Russian).
 24. Zhukovsky E. M., Igoshkin D. G., Kravchenko S. E. (2019) Technological Implementation use of the Foaming Effect of Bitumen in the Production of Asphalt Concrete Mix. *Avtomobilnye Dorogi i Mosty [Highways and Bridges]*, (1), 19–24 (in Russian).
 25. Chomicz-Kowalska A., Maciejewski K., Iwański M. M. (2020) Study of the Simultaneous Utilization of Mechanical Water Foaming and Zeolites and Their Effects on the Properties of Warm Mix Asphalt Concrete. *Materials*, 13 (2), 357. <https://doi.org/10.3390/ma13020357>.
 26. Zhukovsky E. M., Ladyshev A. V., Koronchik A. V., Kravchenko S. E. (2021) Factors that Determine the Nature of the Stress-Strain State of the Road Structure in Different Traffic Lanes. *Avtomobilnye Dorogi i Mosty [Highways and Bridges]*, (2), 14–23 (in Russian).
 27. Zhukovsky E. M., Ladyshev A. V., Koronchik A. V., Kravchenko S. E. (2022) The Influence of Reinforced Roadside Elements on the Change in Defectiveness Along the Width of Road Surfaces. *Avtomobilnye Dorogi i Mosty [Highways and Bridges]*, (1), 19–27 (in Russian).
 28. Zhukovsky E. M., Koronchik A. V., Kravchenko S. E. (2022) Features of the Impact of Transport on the Structures of Non-Rigid Pavement and their Consideration in the Design of Structures. *Kaspii i Global'nye Vyzovy: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., Astrakhan', 23–24 Maya 2022 goda [The Caspian and Global Challenges: Proceedings of International Scientific and Practical Conference, Astrakhan, May 23–24, 2022]*. Astrakhan, Astrakhan State University, 888–893 (in Russian).
 29. Trishin G. G., Poritsky R. Z., Koryukov V. P. (1978) Strength of Multi-Lane Roads. *Avtomobilnye Dorogi i Mosty [Highways and Bridges]*, (9), 22–23 (in Russian).

Received: 06.10.2022

Accepted: 27.02.2023

Published online: 31.05.2023