

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 6 / 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

Вычислительная техника и управление

- Гу Пэнхао, Рыльков В. Н., Лобатый А. А.
Экспериментальное исследование вибраций
винтомоторной группы агродрона 445

Машиностроение и машиноведение

- Девоино О. Г., Туричин Г. А., Кардаполова М. А.,
Касач Ю. И., Погудо Е. В., Косякова И. М.
Триботехнические характеристики
композиционных покрытий на никелевой основе,
полученных гибридными технологиями 450
- Куцепенко А. В., Антоневиц А. И., Непша Д. В.
Современные средства обеспечения
безопасности во время движения кабины лифта
вверх и при ее остановке в этажной площадке 460

CONTENTS

Computer Engineering and Control

- Penghao Gu, Rilkov V. N., Lobaty A. A.
Experimental Study of Vibrations
of Agrodrome Propeller-Motor Group 445

Mechanical Engineering and Engineering Science

- Devoino O. G., Turichin G. A., Kardapolava M. A.,
Kasach Y. I., Pogudo E. V., Kasyakova I. M.
Tribotechnical Characteristics
of Nickel-Based Composite Coatings Obtained
by Hybrid Technologies 450
- Kutsepolenko A. V., Antonevich A. I., Nepsha D. V.
Modern Means of Ensuring Safety During
the Upward Movement of the Elevator Car
and When it Stops in the Floor Area 460

Пронин А. И., Мыльников В. В., Валько Д. А., Севрюков А. С.	
Исследование динамики параметров обработки на режимах твердого точения	470

Приборостроение

Степаненко Д. А., Еромин Е. С.	
Обеспечение равномерности съема припуска при магнитно-абразивной финишной обработке полупроводниковых пластин за счет управления режимами процесса обработки	477
Тихон О. И., Мадвейко С. И.	
Влияние электрических характеристик импульсного источника питания СВЧ магнетрона на условия формирования плазмы в вакуумной камере плазматрона резонаторного типа	487

Строительство

Босаков С. В.	
Расчет кольцевого свайно-плитного фундамента при условии нахождения части плиты в одной плоскости	495
Ливанский Д. Г.	
Влияние рекламных баннеров и логотипов команд на температурный режим льда крытых ледовых катков, встраиваемых в ледовую пластину	500

Энергетика

Седнин В. А., Игнатович Р. С., Иокова И. Л.	
О целесообразности строительства мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях Республики Беларусь. Часть 2. Роль мини-ТЭЦ в системах теплоснабжения городов и населенных пунктов Беларуси	508
Струцкий Н. В., Романюк В. Н.	
Алгоритм расчета надежности единичного линейного участка стального подземного трубопровода	519

Перечень статей, опубликованных в журнале «Наука и техника» в 2023 г.

Тематический указатель	530
------------------------------	-----

Pronin A. I., Mylnikov V. V., Valko D. A., Sevryukov A. S.	
Investigation of the Dynamics of Processing Parameters in Hard Turning Modes	470

Instrumentation Engineering

Stepanenko D. A., Eromin E. S.	
Ensuring Uniform Material Removal with Magnetic Abrasive Finishing of Semiconductor Wafers by Mode Control of Machining Parameters	477
Tsikhan O. I., Madveika S. I.	
Influence of the Electrical Characteristics of Pulsed Microwave Magnetron Power Supply on the Conditions for Plasma Formation in the Vacuum Chamber of Resonator-Type Plasmatron	487

Civil and Industrial Engineering

Bosakov S. V.	
Calculation of Ring Pile-Slab Foundation Under Condition of Part of the Slab in the Same Plane	495
Livanskiy D. G.	
Influence of Advertising Banners and Team Logos on the Temperature Regime of Ice of Indoor Ice Skating Rinks, Built Into the Ice Plate	500

Power Engineering

Sednin V. A., Ignatovich R. S., Iokova I. L.	
On the Feasibility of Building Mini-Thermal Power Plant Using Local Fuels in the Conditions of the Republic of Belarus. Part 2. Role of Mini-Thermal Power Plant in Heat Supply Systems of Cities and Settlements in Belarus	508
Strutsky N. V., Romaniuk V. N.	
Algorithm for Calculating Reliability of Single Linear Section of Steel Underground Pipeline	519

List of Papers Published in "Science and Technique" Journal in 2023

Thematic Index	530
----------------------	-----

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),
Чижик 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 30.11.2023. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. 10,69. Тираж 100 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 38200000006896 от 03.03.2014.

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

© Белорусский национальный технический университет, 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/10.21122/2227-1031-2023-22-6-445-449>

УДК 629.7

Экспериментальное исследование вибраций винтомоторной группы агродрона

Асп. Гу Пэнхао¹⁾, инж. В. Н. Рыльков²⁾,
докт. техн. наук, проф. А. А. Лобатый¹⁾

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

²⁾Китайско-Белорусское ЗАО «Авиационные технологии и комплексы» (Китайско-Белорусский
индустриальный парк «Великий камень», Республика Беларусь)

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

Реферат. Рассматривается задача экспериментального исследования параметров винтомоторной группы беспилотного летательного аппарата (агродрона). Проведен анализ работ, выполняемых агродронами в сельском хозяйстве, а также популярных серийных образцов агродронов, выпускаемых известными мировыми компаниями, в том числе и в Республике Беларусь. Приведено описание устройства экспериментального стенда, специально разработанного для проведения испытаний работы силовой установки агродрона в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации, в которых приходится функционировать агродрону. Описаны основные конструктивные элементы испытательного стенда и измерительные приборы, которые используются для проведения экспериментальных исследований работы воздушного винта и его электропривода. Приводятся результаты проведенных исследований в виде количественных значений параметров вибраций винтомоторной группы агродрона при заданных значениях входных параметров системы управления электроприводом с учетом влияния внешних факторов. Показано, что величины параметров, характеризующих вибрации винтомоторной группы агродрона, могут быть различными в зависимости от режимов работы двигателей и изменения внешних условий. На основании полученных результатов сделан вывод о том, что при формулировании математической постановки задачи моделирования необходимо учитывать влияние на систему управления агродрона случайных факторов, в том числе и вибраций, обусловленных работой его двигателей.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, агродрон, винтомоторная группа, параметры вибраций

Для цитирования: Пэнхао, Гу. Экспериментальное исследование вибраций винтомоторной группы агродрона / Гу Пэнхао, В. Н. Рыльков, А. А. Лобатый // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 6. С. 445–449. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-445-449>

Experimental Study of Vibrations of Agrodrone Propeller-Motor Group

Gu Penghao¹⁾, V. N. Rilkov²⁾, A. A. Lobaty¹⁾

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

²⁾Chinese-Belarusian CJSC “Aviation Technologies and Complexes” (China-Belarus Great Stone Industrial Park, Republic of Belarus)

Abstract. The problem of experimental research of the parameters of the propeller-motor group of an unmanned aerial vehicle (agrodrone) is considered. An analysis of the work performed by agrodrones in agriculture, as well as popular serial models

Адрес для переписки

Лобатый Александр Александрович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/11,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 346-82-56
lobaty@bntu.by

Address for correspondence

Lobaty Alexander A.
Belarusian National Technical University
65/11, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 346-82-56
lobaty@bntu.by

of agrodrones produced by well-known global companies, including in the Republic of Belarus, has been carried out. A description of the design of the experimental stand, specially designed for testing the operation of the agrodrome power plant under conditions as close as possible to the real operating conditions in which the agrodrome has to operate, is given. The main structural elements of the test bench and measuring instruments that are used to conduct experimental studies of the operation of the propeller and its electric drive are described. The results of the research are presented in the form of quantitative values of the vibration parameters of the propeller-motor group of the agrodrome at given values of the input parameters of the electric drive control system, taking into account the influence of external factors. It is shown that the values of the parameters characterizing the vibrations of the propeller-motor group of the agrodrome can be different depending on the operating modes of the engines and changes in external conditions. Based on the results obtained, it was concluded that when formulating the mathematical formulation of the modeling problem, it is necessary to take into account the influence of random factors on the control system of the agrodrome, including vibrations caused by the operation of the agrodrome engines.

Keywords: unmanned aerial vehicle, agrodrome, propeller-motor group, vibration parameters

For citation: Penghao Gu, Rilkov V. N., Lobaty A. A. (2023) Experimental Study of Vibrations of Agrodrome Propeller-Motor Group. *Science and Technique*. 22 (6). 445–449. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-445-449> (in Russian)

Введение

Научные и технологические достижения в развитии техники привели к появлению принципиально новых направлений в создании технических систем и устройств. Одно из таких перспективных направлений – разработка и производство беспилотных летательных аппаратов (БЛА), применение которых охватывает различные сферы человеческой деятельности. Одной из областей применения БЛА является сельское хозяйство, где БЛА (агродроны) существенно дополняют, а иногда и вытесняют традиционные формы и методы обработки почвы и сельскохозяйственных культур [1].

Высокотехнологичные агродроны с распылителем позволяют оптимизировать вложения и увеличить итоговую урожайность за счет автоматизации процесса внесения удобрений и выполнения ряда других работ, необходимых для успешного ведения сельского хозяйства. Применение современных сельскохозяйственных БЛА (агродронов) дает возможность с минимальными трудовыми затратами повысить продуктивность производственного процесса, из-за чего их все чаще применяют в фермерских хозяйствах в России, Китае, США, Бразилии и странах Европы. Агродроны для сельского хозяйства представляют собой высокотехнологичное оборудование с простой конструкцией и принципом работы. Это мультироторное устройство с четырьмя и более винтами, половина из которых вращается по часовой стрелке, а вторая половина – в противоположную сторону [2].

Устройство систем управления агродронами основано на тех же основных принципах, что и других БЛА, и включает различное наземное и бортовое оборудование, в том числе бесплатформенные инерциальные и спутниковые нави-

гационные системы, позволяющие выполнять полетное задание как при непосредственном управлении человеком – оператором, так и автономно в соответствии с предварительно заданной программой полета [3–5].

Среди известных моделей агродронов можно отметить, в первую очередь, БЛА для сельского хозяйства серии QFTP-32 китайской компании Chufang. Агродрон QFTP-32 имеет универсальную систему управления полетом, 4-ядерный процессор с высокой производительностью, резервирование отдельных подсистем (в случае поломки одного оборудования агродрон все еще может работать), двойную амортизирующую структуру с улучшенной износостойкостью [6]. Его масса 69 кг, а бак объемом 32 л. Опрыскивание осуществляется на высоте 1–3 м с производительностью от 5 до 7 га/ч.

Компания Guardian Agriculture производит для аграриев автономный электрический агродрон Guardian SC1, представляющий собой полностью автономный и электрический агрегат с аккумуляторной батареей, способный нести полезную нагрузку до 180 л рабочего раствора. Беспилотник за день покрывает участок площадью около 18–20 га.

Компания Skymec (ООО «Небесная Механика») выпускает в продажу мультиспектральный БЛА для аграриев и экологов Mavic 3M, который способен выполнять картографические работы с высоким разрешением изображений, мониторить состояние полей, садов и лесов, других объектов. Данный БЛА помогает отслеживать развитие сельскохозяйственных культур на поле или в саду, определяет, в каких зонах следует вносить больше удобрений и где требуется больший полив, а также находит участки с низким количеством саженцев или обилием сорняков [6].

Все более популярными становятся беспилотные летательные аппараты белорусского производства, среди которых необходимо выделить агродрон А60-Х, выпускаемый ЗАО «Авиационные технологии и комплексы» – комплекс внесения средств защиты растений методом ультрамалообъемного опрыскивания (УМО) на базе беспилотного летательного аппарата собственной разработки [7] (рис. 1).



Рис. 1. Агродрон А60-Х
Fig. 1. Agrodrome A60-X

Агродрон А60-Х предназначен для распыления удобрений, опрыскивания урожая, полива насаждений на ограниченных участках, выполнения других задач в интересах сельского хозяйства. Интеллектуальный сельскохозяйственный комплекс А60-Х – это инновационная система, разработанная для использования в «умном земледелии» в помощь классическим методам внедрения средств защиты растений. Ключевое преимущество комплекса – его экономическая эффективность, которая заключается в повышенной скорости обработки полей, высокой точности обработки с использованием технологии УМО при максимальной автономности.

Особенностью комплекса А60-Х является автоматическое построение полетного задания. Сохранение маршрутов, быстрая зарядка батареи (не более 20 мин) и встроенное программное обеспечение позволяют создавать и настраивать полетные задания прямо на экране пульта управления без использования персонального компьютера. Для большей эффективности работы функции ровера (робота-курьера) выполняет пульт управления, что существенно упрощает работу по определению границ поля, обходу препятствий и зон неполива с возможностью загрузки готовых цифровых карт местности в универсальном формате KML [7].

Испытательный стенд для исследования вибраций

В процессе эксплуатации агродрона его конструкция и установленная на нем аппаратура испытывают воздействие вибраций, которые могут оказывать отрицательное влияние на функционирование всего комплекса. Причиной вибраций являются различные факторы, в первую очередь, работа двигателей, установленных на агродроне.

Для проведения экспериментальных исследований на предприятии ЗАО «Авиационные технологии и комплексы» (Китайско-Белорусский индустриальный парк «Великий камень») был разработан и изготовлен испытательный стенд, внешний вид которого представлен на рис. 2.



Рис. 2. Испытательный стенд
Fig. 2. Test bench

Стенд предназначен для проверки характеристик и отладки режимов работы силовой установки БЛА-электролета (агродрона); проведения испытаний, проверок, экспериментов, исследования свойств и характеристик винтомоторных групп из состава силовой установки агродрона в производственно-технологическом процессе. Стенд предоставляет возможность разработчикам, производителям и пользователям агродрона измерять и оценивать параметры силовой установки и отдельных ее элементов, проверять надежность силовой установки на различных режимах работы, а также определять ресурсные и надежность характеристики силовой установки. Кроме того, испытательный стенд позволяет проводить теоретическое и практическое обучение, а также переподготовку авиационного персонала.

За защитным ограждением (рис. 2) на неподвижной станине установлен воздушный винт

Таблица 1

Результаты исследований

Research results

Направление вращения	ШИМ, мкс	Тяга, Н	Потребляемый ток, А	Скорость вращения, об/мин	Виброскорость, мм/с	Виброускорение, м/с ²	Виброперемещение, мм	Температура, °С
CCW	1200	10,9	1,42	1180	0,7	1,5	0,029	22,9
	1500	71,3	14,50	2170	3,1	2,9	0,039	27,5
	1800	193,0	64,50	3540	19,4	15,0	0,157	41,9
CCW	1200	10,8	1,39	1170	0,6	1,7	0,032	22,8
	1500	71,5	14,55	2180	2,9	3,3	0,039	27,7
	1800	191,0	64,50	3570	19,0	15,2	0,150	42,5
CW	1200	10,7	1,42	1170	0,6	2,1	0,052	22,9
	1500	68,6	14,20	2190	3,3	9,4	0,115	27,7
	1800	182,5	62,60	3610	15,6	15,0	0,175	41,7
CW	1200	10,9	1,39	1170	0,6	2,0	0,052	21,9
	1500	68,8	14,30	2180	3,4	9,5	0,120	27,5
	1800	183,0	62,20	3650	15,2	15,3	0,179	41,5

Примечания: CW – направление вращения винта производится по часовой стрелке; CCW – то же против часовой стрелки.

агродрона, приводимый в движение бесколлекторным электродвигателем. Для проведения исследований работы винтомоторной группы установлены измерительные приборы, среди которых следует отметить измеритель вибраций (виброметр) пьезоэлектрического типа. Кроме того, в состав измерительного оборудования входят: весы напольные для измерения силы тяги, регулятор оборотов, тахометр, ваттметр, тепловизор, светодиодный фонарь.

Кроме аппаратуры, перечисленной выше и изображенной на рис. 2, на отдельном рабочем столе размещены источник электропитания, индикаторы выходных сигналов и другое оборудование, необходимое для проведения исследований в соответствии с поставленными задачами. Данная конструкция экспериментальной установки позволяет проводить исследования основных параметров, характеризующих работу винтомоторной группы агродрона.

Испытательный стенд представляет собой объединенный программно-аппаратный комплекс испытательного оборудования. Наличие такого стенда в производственной или эксплуатирующей организации обеспечивает качественное производство и безаварийную эксплуатацию силовых установок БЛА-электролетов.

Результаты экспериментальных исследований

В табл. 1 приведены некоторые результаты проведенных испытаний работы винтомоторной группы агродрона А60-Х.

Испытания проходил воздушный винт марки 36190CF. Для управления скоростью вращения винта использовался широтно-модулированный (ШИМ) импульсный сигнал напряжения электропитания 50 В.

Анализ полученных результатов показал, что при одних и тех же значениях входных параметров системы выходные параметры, характеризующие вибрации винтомоторной группы агродрона, несколько отличаются, хотя экспериментальные исследования проводились в течение одного дня. Это связано с тем, что эксперимент проводился в помещении, в котором функционировало различное оборудование, работали люди. Все это оказывало отрицательное влияние на чистоту проведения эксперимента.

Аналогичные исследования, проведенные через десять дней, показали дополнительные отличия результатов исследований, что свидетельствует о влиянии на работу экспериментальной установки других внешних факторов, таких как температура и влажность окружающей среды и прочего.

ВЫВОДЫ

1. Применение беспилотных летательных аппаратов (агродронов) в сельском хозяйстве является одним из перспективных направлений развития интеллектуального земледелия. Агродрон белорусского производства А60-Х позволяет решать широкий спектр задач обеспечения высокопроизводительного земледелия.

2. Экспериментальное исследование винтомоторной группы агродрона А60-Х показало, что величины параметров, характеризующих вибрации конструктивных элементов агродрона, не выходят за пределы допусков, определяющих границы работоспособности оборудования, установленного на агродроне.

3. Разработка и производство агродронов, как и любых БЛА другого назначения, в значительной степени основаны на математическом моделировании всех процессов, описывающих их функционирование [8–10]. При формулировании математической постановки

задачи моделирования работы агродрона необходимо учитывать влияние на систему управления агродрона случайных факторов, в том числе и вибраций, обусловленных работой двигателей БЛА. При этом, как видно из экспериментально полученных результатов исследований, величины параметров, характеризующих вибрации, могут быть различными в зависимости от режимов работы двигателей и внешних условий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лобатый, А. А. Мультикоптер для защиты растений / А. А. Лобатый, Гу Пэнхао // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2023. С. 44–45.
2. Агродроны // Геомир. 2020. Режим доступа: https://www.geomir.ru/publikatsii/agrodrony/?sphrase_id=38033.
3. Моисеев, В. С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами / В. С. Моисеев. Казань: ГБУ РЦМКО, 2013. 768 с.
4. Лобатый, А. А. Математическое моделирование движения летательных аппаратов мультироторного типа / А. А. Лобатый, Гу Пэнхао // Системный анализ и прикладная информатика. 2023. № 1. С. 10–15. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-1-10-15>.
5. Гу Пэнхао. Форсированное управление квадрокоптером / Гу Пэнхао, Ю. А. Леоновец, А. А. Лобатый // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 2. С. 91–95. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-2-91-95>.
6. Беспилотники в АПК: новые и самые необычные модели дронов. Режим доступа: <https://dzen.ru/a/Y-Uazw17UW3pX-Ye>.
7. Агродрон А60-Х. Режим доступа: <https://agrodrone.by/>.
8. Савелов, П. И. Особенности моделирования операторного управления беспилотным летательным аппаратом и его целевой нагрузкой / П. И. Савелов, Гу Пэнхао, А. А. Лобатый // Системный анализ и прикладная информатика. 2022. № 4. С. 24–28. [10.21122/2309-4923-2022-4-23-28](https://doi.org/10.21122/2309-4923-2022-4-23-28).
9. Лобатый, А. А. Аналитические методы исследования систем управления беспилотных летательных аппаратов / А. А. Лобатый // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2023. С. 92–93.
10. Mathematical Model of Mobile Robot Orientation According to a Set Route / А. А. Lobaty [и др.] // Проблемы и перспективы инновационной техники и технологий в агропродовольственном секторе: сб. науч. тр. III Междунар. науч.-практ. конф., Ташкент, 20–21 апреля 2023 г. Ташкент: ТашГТУ, 2023. С. 187–188.

Поступила 08.08.2023

Подписана в печать 10.10.2023

Опубликована онлайн 30.11.2023

REFERENCES

1. Lobaty A. A., Gu Penghao (2023) Multicopter for Plant Protection. *Innovatsionnye Tekhnologii, Avtomatizatsiya i Mekhatronika v Mashino- i Priborostroenii: Materialy XI Mezhdunarodnoi Nauch.-Tekhn. Konferentsii* [Innovative Technologies, Automation and Mechatronics in Mechanical and Instrument Engineering. Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference]. Minsk, Belarusian National Technical University, 44–45 (in Russian).
2. Agrodrones (2023). *Geodrony*. Available at: https://www.geomir.ru/publikatsii/agrodrony/?sphrase_id=38033 (in Russian).
3. Moiseev V. S. (2013) *Applied Theory of Control of Unmanned Aerial Vehicles*. Kazan, State Budgetary Institution – Republican Center for Monitoring the Quality of Education, 768 (in Russian).
4. Lobaty A. A., Gu Penghao (2023) Mathematical Modeling of the Movement of Multi-Rotor Aircraft. *Sistemny Analiz i Prikladnaya Informatika = System Analysis and Applied Information Science*, (1), 10–15 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-1-10-15>.
5. Gu Penghao, Leonovets Yu. A., Lobaty A. A. (2023) Forced Quadcopter Control. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 22 (2), 91–95 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-2-91-95>.
6. *Drones in the Agro-Industrial Complex: New and Most Unusual Drone Models*. Available at: <https://dzen.ru/a/Y-Uazw17UW3pX-Ye> (in Russian).
7. *Agrodrone A60-X*. Available at: <https://agrodrone.by/> (in Russian).
8. Savelov P. I., Lobaty A. A., Gu Penghao (2022) Features of Modeling Operator Control of an Unmanned Aerial Vehicle and its Target Load. *Sistemny Analiz i Prikladnaya Informatika = System Analysis and Applied Information Science*, (4), 24–28 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2022-4-23-28>.
9. Lobaty A. A. (2023) Analytical Methods for Studying Control Systems of Unmanned Aerial Vehicles. *Innovatsionnye Tekhnologii, Avtomatizatsiya i Mekhatronika v Mashino- i Priborostroenii: Materialy XI Mezhdunarodnoi Nauch.-Tekhn. Konferentsii* [Innovative Technologies, Automation and Mechatronics in Mechanical and Instrument Engineering. Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference]. Minsk, Belarusian National Technical University, 92–93 (in Russian).
10. Lobaty A. A. [et al.] (2023) Mathematical Model of Mobile Robot Orientation According to a Set Route. *Problemy i Perspektivy Innovatsionnoi Tekhniki i Tekhnologii v Agropredovol'stvennom Sektore: Sbornik Nauchnykh Trudov III Mezhdunarodnoi Konferentsii Nauch.-Prakt. Konferentsii, Tashkent, 20–21 aprelya 2023 g.* [Problems and Prospects of Innovative Technology and Technologies in the Agro-Food Sector: Collection of Scientific Papers of the 3rd International Conference of Scientific and Practical Conference, Tashkent, April 20–21, 2023]. Tashkent, Tashkent State Technical University] Publishing House, 187–188 (in Russian).

Received: 08.08.2023

Accepted: 10.10.2023

Published online: 30.11.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-450-459>

УДК.621.793.74;621.373.826

Триботехнические характеристики композиционных покрытий на никелевой основе, полученных гибридными технологиями

Доктора техн. наук, профессора О. Г. Девойно¹⁾, Г. А. Туричин²⁾,
канд. техн. наук, доц. М. А. Кардаполова¹⁾,
инженеры Ю. И. Касач¹⁾, Е. В. Погудо¹⁾, И. М. Косякова¹⁾

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

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

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

Реферат. Как объект изучения использованы покрытия, состоящие из самофлюсующихся сплавов на основе никеля или содержащие их композиции, сформированные в гибридном технологическом процессе с двумя основными стадиями: напылением плазменным методом и последующим оплавлением – газопламенным методом или за счет лазерного нагрева. Для полученных в данном процессе покрытий проведено экспериментальное определение их стойкости к абразивному износу в условиях граничного трения с вводом смазок. При этом изучено влияние состава покрытия и способа оплавления на величину износа, измеренного методом искусственных баз. Для оценочного определения динамики структурообразования в поверхностном слое, подвергнутом механическим нагрузкам при трении, использованы рентгенофазовый анализ, металлографический метод, а также сканирующая электронная микроскопия в режиме электронной дифракции (электронографии). После стадии лазерного оплавления удастся получить покрытия со стойкостью к износу, двукратно и более превосходящей уровень для напыленных покрытий того же состава, обработанных газопламенным методом. Износ поверхности покрытия, как было установлено, происходит по механизму усталостного разрушения наименее твердого компонента покрытия, т. е. никельсодержащей интерметаллидной фазы, с образованием островковой пленки из слабосвязанных с основой твердых кристаллитов карбидно-боридной фазы, что приводит в итоге к растрескиванию частиц этой фазы и осыпанию их с поверхности. Стойкость слоев, полученных после стадии лазерного оплавления, может быть повышена, по экспериментальным данным, путем уменьшения размеров зерна фаз в покрытии и его текстурирования, а также повышения концентрации легирующих элементов в составе металлсодержащей связующей фазы покрытия. Введение легирующих добавок приводит к дополнительно увеличению износостойкости в 2–4 раза. Это связано, в зависимости от типа добавок, с увеличением количества упрочняющей фазы при сохранении пластичности матрицы (покрытия с добавками карбида хрома), степенью легирования никелевой матрицы (добавки карбида вольфрама и карбида бора), а также наличием мелкодисперсного карбидно-боридного компонента, что уменьшает процессы деформирования и царапания.

Ключевые слова: износостойкость, плазменное напыление, лазерное оплавление, лазерное легирование, трибологические свойства, упрочнение, покрытие, фазовый состав, самофлюсующиеся сплавы, гибридные технологии

Для цитирования: Триботехнические характеристики композиционных покрытий на никелевой основе, полученных гибридными технологиями / О. Г. Девойно [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 6. С. 450–459. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-450-459>

Адрес для переписки

Девойно Олег Георгиевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 331-00-45
plazteh@bntu.by

Address for correspondence

Devoino Oleg G.
Belarusian National Technical University
9, B. Hmelnitzkogo str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 17 331-00-45
plazteh@bntu.by

Tribotechnical Characteristics of Nickel-Based Composite Coatings Obtained by Hybrid Technologies

O. G. Devoino¹⁾, G. A. Turichin²⁾, M. A. Kardapolava¹⁾, Y. I. Kasach¹⁾, E. V. Pogudo¹⁾, I. M. Kasyakova¹⁾

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

²⁾St. Petersburg Marine Technical University (St. Petersburg, Russian Federation)

Abstract. As an object of this study, the coatings were used, which are composed of self-fluxing nickel-based alloys or compositions containing them, formed in a hybrid technological process with two main stages: spraying by the plasma method and subsequent remelting – by the gas-flame method or laser heating. An experimental measurement of their resistance to abrasive wear under conditions of boundary friction with the introduction of lubricants has been carried out for the coatings obtained in this process. At the same time, the influence of the coating composition and the remelting method on the wear value measured by the artificial base method has been investigated. To evaluate the dynamics of structure formation in the surface layer subjected to mechanical loads during the friction, X-ray diffraction analysis, metallographic method, and scanning electron microscopy in the electron diffraction mode have been used. After the laser remelting stage, it is possible to obtain coatings with wear resistance that is twice or more superior to the level for sprayed coatings of the same composition processed by the gas flame method. Wear of the coating surface has been found to occur through the mechanism of fatigue failure of the least hard component of the coating, i. e., the nickel-containing intermetallic phase, with the formation of an island-type film of hard crystallites of the carbide-boron phase weakly bound to the coating base, which ultimately leads to cracking of particles of this phase and their crumbling from the surface. The durability of layers obtained after the laser remelting stage can be increased, according to experimental data, by reducing the grain size of the phases in the coating and its texturing, as well as increasing the concentration of alloying elements in the composition of the metal-containing binder phase of the coating. The use of alloying additives leads to an additional increase in wear resistance by 2–4 times. This is due, depending on the type of additives, with an increase in the amount of the hardening phase while maintaining the plasticity of the matrix (coatings with chromium carbide additives), the degree of alloying of the nickel matrix (by the tungsten carbide and boron carbide additives), as well as the presence of a finely dispersed carbide-boride component, which reduces the processes of deformation and scratching.

Keywords: wear resistance, plasma spraying, laser remelting, laser alloying, tribological properties, hardening, coating, phase composition, self-fluxing alloys, hybrid technologies

For citation: Devoino O. G., Turichin G. A., Kardapolava M. A., Kasach Y. I., Pogudo E. V., Kasyakova I. M. (2023) Tribotechnical Characteristics of Nickel-Based Composite Coatings Obtained by Hybrid Technologies. *Science and Technique*. 22 (6), 450–459. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-450-459> (in Russian)

Введение

В настоящее время существенно повышаются требования к материалам, применяемым для производства деталей. Причиной этого является ужесточение условий эксплуатации многих видов современного оборудования. Особую актуальность данная задача приобретает для поверхностей, работающих в условиях трения. Поэтому для ее решения требуется сформировать на поверхности детали слои, у которых уровень эксплуатационных свойств будет значительно выше свойств основного металла, а главным критерием качества при разработке материалов с высокими триботехническими характеристиками является высокая износостойкость [1]. К наиболее технологичным и экономически приемлемым современным материалам, используемым в технологиях упрочнения и восстановления поверхности узлов и деталей различных машин, в частности предназначенных для эксплуатации в режимах интен-

сивного трения и абразивного износа, относятся никельсодержащие сплавы типа ПГ-12Н-01. В литературе описан ряд методов газотермического нанесения покрытий из подобных самораспространяющихся никельсодержащих сплавов (которые разрабатывались в значительной степени для технологий восстановления пар трения в деталях машиностроительного производства) и процессов их оплавления [2–4]. Установлено, что варьированием режимами оплавления покрытий и составом легирующих компонентов достигается значительное изменение структуры и свойств покрытий [5–11].

В настоящее время интенсивно развиваются гибридные методы модификации поверхностей, позволяющие совместить преимущества отдельных процессов, а также значительно расширить технологические возможности классических методов упрочнения. В работах [12–13] показаны преимущества одновременного применения гибридных технологий локальной термической обработки: лазерно-дуговых, ла-

зерно-плазменных, лазерно-индукционных, лазерно-электроискровых.

Однако получение покрытий с прогнозируемым комплексом эксплуатационных свойств требует уяснения связи особенностей структурных характеристик покрытий с их эксплуатационными свойствами и механизма процесса изнашивания.

Процесс изнашивания деталей машин, как известно, определяется большим количеством факторов. В качестве цели данного исследования нами принято определение возможности регулирования микроструктуры в ходе газотермической технологии восстановления поверхностей, а также их физико-механических параметров за счет ввода дополнительных легирующих добавок и оптимизации условий лазерного (или газопламенного) оплавления. С учетом этого к факторам, способным обеспечить высокую эффективность данной оптимизации для улучшения параметров качества поверхности, можно отнести физико-механические свойства поверхностных слоев и характеристики их микрогеометрии. Влияние этих факторов на износостойкость с достаточной степенью достоверности может быть изучено с помощью лабораторных испытаний.

Методика экспериментального исследования

В качестве опытных образцов были выбраны пластины из конструкционной стали марки Сталь 45. В ходе исследования на них напылялись покрытия толщиной от 0,6 до 0,7 мм из двух видов промышленных порошковых материалов: 1) порошка самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01; 2) трех механически перемешанных смесей (включающих: 80 мас. % сплава ПГ-12Н-01; 20 % легирующего карбидного порошка (в трех вариантах – WC, Cr₃C₂, B₄C)). Напыление проводили с использованием установки плазменного напыления УПУ-3Д с электродуговым плазмотроном ПП-25 мощностью до 35 кВт. Образцы напыленных покрытий из указанных порошков далее оплавливались по двум вариантам: 1) газопламенным методом с использованием резака типа Р1-03П с внутренним смешением топлива и окислителя; 2) лазерным методом

на установке «Комета-2» с максимальной электрической мощностью 1000 Вт. В результате данной дополнительной термообработки достигалось повышение величины адгезии напыленного покрытия к металлической основе и снижение его пористости. При выполнении лазерного оплавления покрытия линейная скорость сканирования пучка излучения составляла 0,5–3,3 мм/с при радиусе сфокусированного луча от 0,5 до 1,5 мм.

В качестве среды при проведении сравнительных лабораторных испытаний использовали масло «Индустриальное 20» с небольшими добавками абразива. Данный выбор среды для исследований обусловлен тем, что большинство деталей работает в условиях граничного трения в присутствии абразива. Для оценки структурных превращений, происходящих в процессе трения в поверхностных слоях, проводили металлографические и рентгено-дифракционные исследования. При этом для рентгенофазового анализа нами применялся стандартный лабораторный дифрактометр марки «Дрон-3,0» с использованием в нем анода, генерирующего пучок CuK α -излучения с длиной волны $\lambda = 0,15418$ нм. Скорость сканирования излучения относительно поверхности анализируемого образца с газотермическим покрытием задавалась как один градус (угла 2θ) в минуту.

Состояние поверхностей трения для изучаемых покрытий определялось электронографическим методом на сканирующем электронном микроскопе Geols. Для проведения исследования микроструктуры поверхности покрытий их предварительно подвергали электрохимическому травлению в растворе, содержащем 5 % HCl и 10 % C₃H₅(OH)₃ + CH₃OH, при плотности постоянного тока 50 мА/мм². Были выполнены также физико-механические испытания полученных образцов газотермических покрытий для определения их износостойкости с помощью лабораторной установки СМТ-1, работавшей в режиме машины трения по схеме «диск – колодка». Интенсивность износа в ходе процесса трения определялась по методу искусственных баз, при этом как база использовалась эталонная канавка глубиной 100 мкм (сделанная на поверхности покрытия механической обработкой). В ходе измерений как образцы применялись специальные диски радиу-

сом 2,5 см (эскиз на рис. 1), имевшие осевое отверстие. Интенсивность износа поверхности покрытия определена путем сравнения значений глубины канавки в нем до и после механического воздействия/трения. При этом использовалось по пять отдельных помеченных точек вдоль канавки в покрытии, регистрацию значений глубины вели с помощью лабораторного профилографа-профилометра модели 252.

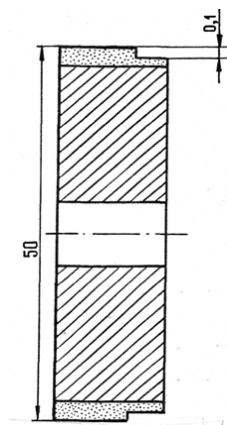


Рис. 1. Образец для исследования износостойкости на машине трения СМТ-I

Fig. 1. Sample for testing wear resistance on a friction machine CMT-I

Результаты исследования

Полученные результаты сравнительной износостойкости покрытий с различными способами оплавления и составами покрытий представлены в табл. 1.

Анализ измеренных значений интенсивности износа позволил выявить тот факт, что дополнительное легирование карбидными добавками в процессе получения газотермических покрытий из порошков никельсодержащего сплава обеспечивает после операции их оплавления (лазерным или газопламенным методом) улучшенные показатели по износостойкости поверхности по сравнению с эталонным образ-

цом напыленного покрытия из такого же самофлюсующегося сплава ПГ-12Н-01, но не легированного карбидами. При этом износостойкость покрытий после лазерного оплавления выше износостойкости покрытий, оплавленных газопламенной горелкой. Существенно, что при реализации первого из этих двух вариантов оплавления большая относительная износостойкость итогового покрытия достигается в режиме с вводом легирующего порошка Cr_3C_2 , в то время как при газопламенном оплавлении более эффективно использование покрытия, легированного другим карбидом – B_4C . Это может быть объяснено тем, что при лазерном нагреве происходит перегрев покрытия, ведущий к разложению некоторых структурных составляющих, обуславливающих повышенную износостойкость.

Сравнение различных способов оплавления показывает, что более высокой износостойкостью обладают покрытия, подвергнутые оплавлению лучом лазера, причем, вероятно, за счет достижения в ходе лазерной обработки высоких скоростей нагрева и охлаждения, приводящих к значительному измельчению кристаллитов в структуре покрытия. В покрытиях, сформированных с использованием стадии нагрева напыленного слоя лазерным лучом, как правило, достигается образование твердого раствора с повышенной концентрацией легирующей добавки, что создает предпосылки для существенного возрастания дефектности кристаллической структуры (в том числе содержания в ней дислокаций) и образования локальных зон с повышенными упругими микронапряжениями кристаллической решетки.

Таблица 1

Результаты испытаний износостойкости упрочненных поверхностей

Results of wear resistance tests of hardened surfaces

Состав покрытия	Способ оплавления	Величина износа, мкм	Относительная износостойкость
ПГ-12Н-01	Оплавление газопламенным методом	25	1
Смесь ПГ-12Н-01 + 20 % B_4C		8,1	3,08
Смесь ПГ-12Н-01 + 20 % Cr_3C_2		9,1	2,76
Смесь ПГ-12Н-01 + 20 % WC		11,6	2,15
ПГ-12Н-01	Оплавление излучением лазера	15,8	1,58
Смесь ПГ-12Н-01 + 20 % B_4C		6,7	3,73
Смесь ПГ-12Н-01 + 20 % Cr_3C_2		4,1	6,09
Смесь ПГ-12Н-01 + 20 % WC		8,3	3,01

Такой эффект часто приводит к определенной деформации решетки, дающей эффект упрочнения материала в поверхностном оплавленном слое. Результаты исследований указывают на то, что процесс износа покрытия включает в себя усталостное разрушение менее твердой составляющей – интерметаллидной фазы на основе нике-

ля – и последующее обнажение зерен более твердых карбидно-боридных фаз с образованием фактически «островковой пленки» на поверхности, с ее дальнейшим выкрашиванием и осыпанием.

Электроннографическое строение поверхностей после проведения испытаний на изнашивание представлено на рис. 2–5.

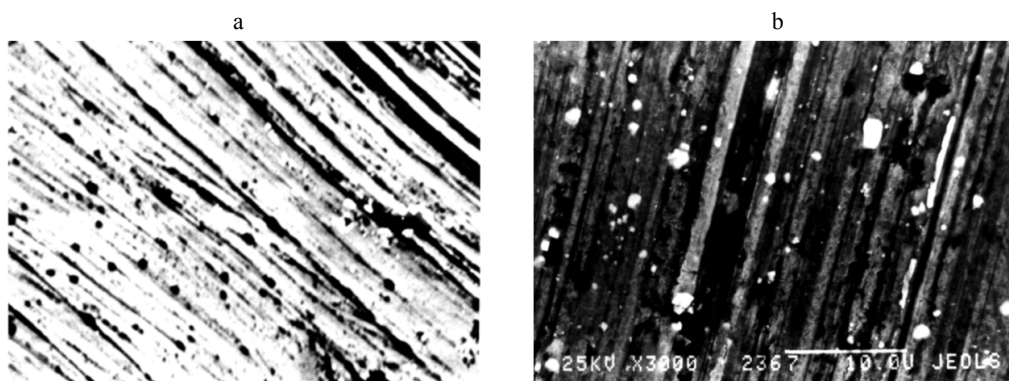


Рис. 2. Поверхность сплава ПГ-12Н-01 после изнашивания, $\times 3000$: а – оплавление горелкой; б – лучом лазера
Fig. 2. Surface of ПГ-12Н-01 [PG-12N-01] alloy after wear, $\times 3000$: а – reflow with a burner; б – reflow with a laser beam

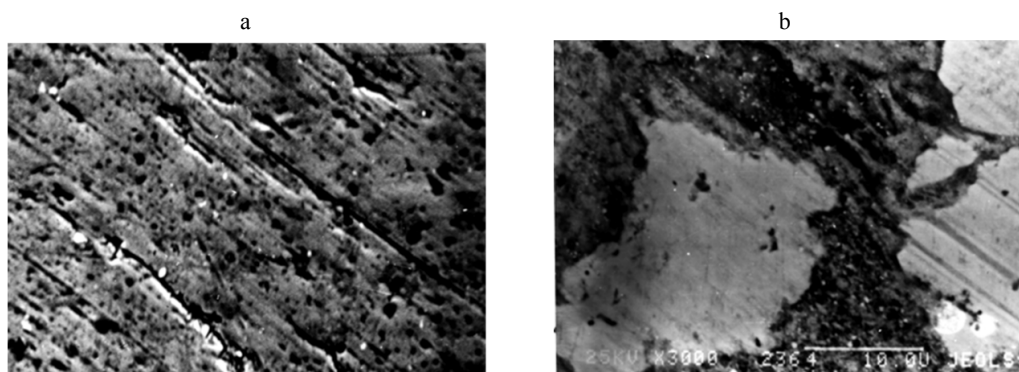


Рис. 3. Поверхность сплава ПГ-12Н-01 + 20 % WC после изнашивания, $\times 3000$: а – оплавление горелкой; б – лучом лазера
Fig. 3. Surface of ПГ-12Н-01 [PG-12N-01] alloy + 20 % WC after wear, $\times 3000$: а – reflow with a burner; б – reflow with a laser beam

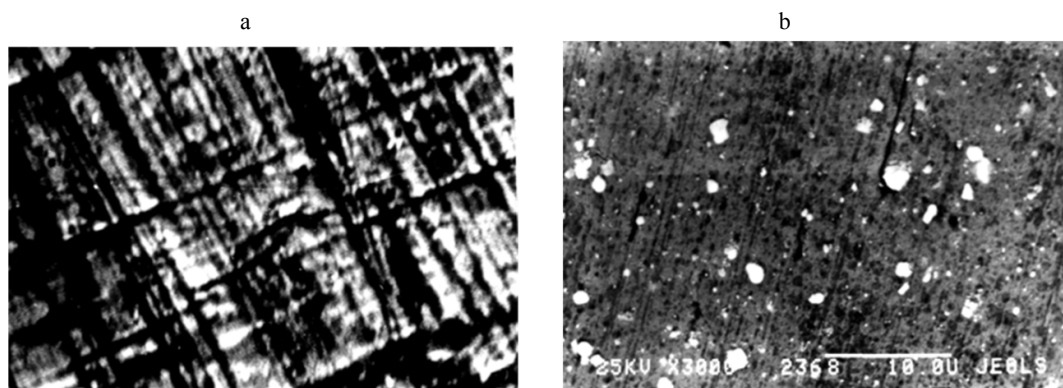


Рис. 4. Поверхность сплава ПГ-12Н-01 + 20 % Cr_3C_2 после изнашивания, $\times 3000$: а – оплавление горелкой; б – лучом лазера
Fig. 4. Surface of ПГ-12Н-01 [PG-12N-01] alloy + 20 % Cr_3C_2 after wear, $\times 3000$: а – reflow with a burner; б – reflow with a laser beam

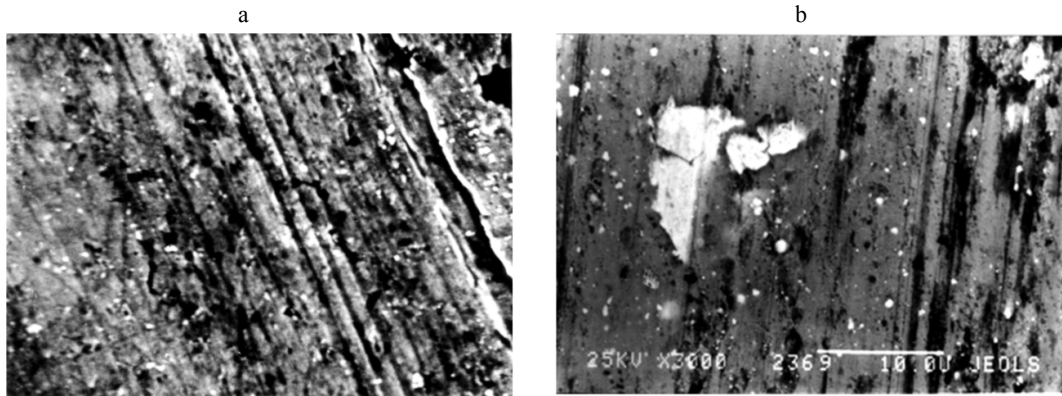


Рис. 5. Поверхность сплава ПГ-12Н-01 + 20 % B_4C после изнашивания, $\times 3000$:
а – оплавление горелкой; б – лучом лазера

Fig. 5. Surface of ПГ-12Н-01 [PG-12N-01] + 20 % B_4C -addition after wear period, $\times 3000$:
а – reflow with a burner; б – reflow with a laser beam

Представленные на рисунках экспериментальные данные демонстрируют эффект получения наименьшей стойкости поверхности к трению при использовании оплавленных покрытий, напыленных из нелегированных карбидами порошков самофлюсующегося сплава. При этом достигается достаточно быстрый износ поверхности, регистрируемый по наличию характерной пластической деформации покрытия и образованию большого числа царапин, а также возникает выработка Ni -содержащей матричной фазы. В результате наблюдаются селективное разрушение и осыпание с поверхности зерен высокотвердой карбидо-боридной фазы.

Для случая образцов покрытий, полученных в режиме лазерного оплавления, наблюдается интенсификация упругого отсечения материала в ходе абразивного износа покрытия, по-видимому, обусловленная двумя причинами: а) тем, что Ni -содержащая матричная фаза имеет повышенную степень пересыщения, так как она сформировалась в покрытии после оплавления в достаточно кинетически неравновесных условиях (в отличие от менее скоростных по температуре режимов газопламенного оплавления); б) тем, что фаза, содержащая твердую карбидную добавку, характеризуется меньшей дисперсностью по сравнению с дисперсностью аналогичной фазы в образцах того же интегрального химического состава, полученных по технологии со стадией оплавления газовой горелкой.

Результаты определения фазового состава и составов фаз покрытий при плазменном на-

пылении на Сталь 45 с последующим оплавлением лазерным излучением приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты рентгеновских исследований
сплава ПГ-12Н-01 с композиционными добавками
Results of X-ray studies of ПГ-12Н-01 [PG-12N-01] alloy
with composite additives

	Фаза в покрытии	Содержание, %	Вероятная примесь	Концентрация примеси или состав фазы
Сплав ПГ-12Н-01	Ni	56	Fe	7,5 % ат. Fe
	Ni_2B	8	Дефицит B	$Ni_2B_{0,9995}$
	Ni_3B	25	Cr	$(Ni_{85}Cr_{15})_3B$
	Cr_2B	11	Si	$Cr_2(B_{97}Si_3)$
Смесь ПГ-12Н-01 + 20 % B_4C	Ni	51	B	0,4 % ат. B
	Ni_3B	10	Cr	$(Ni_{97}Cr_3)_3B$
	Cr_2B	9	Si	$Cr_2(B_{99}Si_1)$
	B	14	Нет	Бор
	B_4C	16	Дефицит B	$B_4C_{0,9996}$
Смесь ПГ-12Н-01 + 20 % Cr_3C_2	Ni	46	Cr	5% ат. Cr
	Ni_3B	30	Cr	$(Ni_{97}Cr_3)_3B$
	Ni_4B_3	7	Fe	$Ni_4B_{2,9958}$
	Cr_2B	16	C	$(Cr_{86}Fe_{14})_2B$
	B	1	C	0,5% ат. C
Смесь ПГ-12Н-01 + 20 % WC	Ni	16	W	3% ат. W
	Ni_3B	37	Дефицит B	$Ni_3B_{0,97}$
	Ni_2B	8	Нет	Ni_2B
	NiB	6	Нет	NiB
	Ni_4B_3	13.5	Дефицит B	$Ni_4B_{2,97}$
	W_2C	16	B	$W_2(C_{91}B_6)$
	Cr_3C_2	3.5	Дефицит C	$Cr_3C_{1,96}$

Как было отмечено выше, введение апробированных нами карбидных легирующих добавок в напыляемые покрытия обеспечивает получение после их оплавления эффекта упрочнения никельсодержащей интерметаллидной матрицы и повышенного содержания упрочняющей карбидной фазы. Такой эффект проявляется в параметрах структуры поверхности, подвергнутой испытаниям на износостойкость, в частности для случая испытания покрытия, полученного с добавками WC и B_4C , царапины на поверхности (после испытаний покрытия на трение) почти отсутствуют. Анализируемые поверхности трения образцов характеризуются наличием упругого оттеснения материала покрытия, за исключением случая образца покрытия, сформированного при напылении порошковой смеси, легированной карбидом хрома. Это может быть причиной того, что такие добавки не приводят к упрочнению твердого раствора за счет его легирования, так как хром является сильно карбидообразующим элементом и нахождение его в твердом растворе имеет низкую термодинамическую вероятность. Матрица в этом случае остается более пластичной, и внедрение неровностей контртела при трении приводит к образованию царапин. Однако немалую роль играют и окислительные процессы. Вторичные окисные пленки, возникающие в результате мгновенных температурных вспышек при контактировании микронеровностей и воздействии с окружающей средой, образуют пассивную пленку на поверхностях трения. Прочность и фрикционные свойства таких пленок во многом определяют характер протекания износа. Различные добавки оказывают значительное влияние на этот процесс. Отсутствие узлов схватывания на поверхности трения покрытия с добавками карбида бора свидетельствует о высоких фрикционных свойствах такой поверхности, что в немалой степени связано и с высокой смазывающей способностью пленок, обогащенных бором.

Следует также отметить, что, согласно экспериментальным данным, у покрытий, полученных как с лазерным, так и с газопламенным оплавлением, в определенной степени меняется структура изношенной поверхности. Так, для образцов, полученных с лазерной обработкой, после испытаний почти не наблюдается цара-

пин, тогда как поверхности, оплавленные горелкой, имеют отчетливые следы царапания. Вероятными причинами этого являются повышенная гомогенность распределения частиц упрочняющей карбидной фазы в интерметаллидной Ni-содержащей матрице (при этом она имеет повышенную прочность за счет легирования твердого раствора) и пониженная дисперсность кристаллитов в структуре покрытия за счет большой интенсивности кристаллизации при остывании его после лазерного оплавления.

В ходе исследования образцов, полученных в режиме лазерного оплавления покрытия, легированного карбидными добавками, выявлено, что на поверхностях, подвергнутых трению, имеются отдельные крупнодисперсные карбидные включения. По составу они идентифицированы как первичные карбиды, не успевшие из-за диффузионных ограничений раствориться и войти в состав матричной фазы покрытия при его высокоскоростном остывании после окончания оплавления. Они отличаются от вторичных карбидных фаз, имеющих в остальном сплаве и образовавшихся после кристаллизации из расплава в пятне лазерного нагрева покрытия. Также зафиксировано на части поверхности покрытия выкрашивание крупных частиц, что обусловлено, вероятно, охрупчиванием зон, окружающих зерна карбидных фаз в покрытии. Однако в целом анализ поверхностей износа свидетельствует о том, что оплавление лазерным лучом обеспечивает более нормальное протекание износа, чем в случае оплавления газовой горелкой.

Рентгенофазовый анализ показал, что в изучаемых покрытиях, полученных из порошка базового самофлюсующегося сплава без его легирования, после их испытаний на трение не наблюдается явных фазовых повреждений в приповерхностных слоях. Для образцов покрытий, сформированных с использованием как одного, так и другого использованных нами способов оплавления, установлено, что после испытаний на трение практически не меняются как параметры элементарной кристаллической ячейки фазы на основе никеля, так и дисперсность зерен данной фазы. Таким образом, с высокой вероятностью для данных образцов можно предположить механизм выцарапывания

продуктами износа мягкой матричной фазы (содержащей γ -твердый раствор на основе никеля и легирующих элементов). Характерная для данного процесса на микроуровне степень пластического передеформирования достаточно мала. В композиционном материале с добавками карбида бора исходная структура после лазерного и газопламенного оплавления различна. Дифрактограммы, измеренные для образцов покрытий такого состава, полученных с лазерным оплавлением, демонстрируют уменьшение интенсивности линий боридной фазы Ni_3B , а также линий дополнительной фазы карбида B_4C . На основании этого можно заключить, что фаза карбида соответствует частицам остаточного (первичного) порошка B_4C , который вводился как легирование при формировании покрытия и не полностью растворился в расплаве в условиях лазерного оплавления покрытия. В ходе данного оплавления, по-видимому, происходит достаточно сильное искажение параметров элементарной кристаллической ячейки Ni-содержащей фазы за счет легирования твердого раствора примесью бора (в концентрации до 0,4 ат. %), образующего раствор внедрения в кристаллической решетке. При газопламенном оплавлении фаза B_4C отсутствует полностью, что связано с длительным нахождением карбида в расплаве. В процессе перекристаллизации дополнительное количество бора и углерода расходуется на образование более устойчивых соединений, таких как Ni_3B , Cr_2B и, предположительно, Cr_7O_3 . Параметры решетки никеля у оплавленного газовой горелкой покрытия практически не изменяются и примерно соответствуют параметрам решетки чистого никеля. В процессе изнашивания происходит уменьшение размеров кристаллитов от 13,8 до 10,0 нм у оплавленного лазерным излучением слоя и от 51,1 до 27,6 нм в случае газопламенного оплавления. У оплавленных лазерным излучением образцов наблюдается некоторое снижение степени искажения решетки.

Полученные данные свидетельствуют о том, что износ покрытий с добавками карбида бора сопровождается пластическим передеформированием с выцарапыванием никелевой матрицы в случае газопламенного оплавления. Экспериментальные же результаты для случая покры-

тий, полученных с лазерным оплавлением, указывают на достижение эффекта упрочнения Ni-содержащей интерметаллидной фазы, снижающего как износ за счет царапания, так и степень пластического передеформирования структуры. На уменьшение интенсивности износа данных покрытий влияет также явление возникновения (благодаря повышенной концентрации бора в никельсодержащей матрице и других соединениях) вторичных кристаллических структур, содержащих B_2O_3 , с твердосмазочными свойствами. Структурные исследования покрытий с добавками карбида хрома показали наличие линий этой фазы высокой интенсивности в образцах, оплавленных газопламенной горелкой. В слоях, оплавленных лазерным излучением, наблюдается значительное снижение интенсивности этих линий вплоть до полного их вырождения. Интересным является тот факт, что растворение карбида хрома не приводит к значительному увеличению легированности никелевой матрицы. Согласно проведенным расчетам, в никелевой матрице растворяется при лазерном оплавлении только 5 % ат. хрома. Вследствие этого никелевая матрица сохраняет высокую пластичность. Растворившийся карбид хрома легирует борид никеля, образуя соединение следующего стехиометрического состава $(\text{Ni}_{97}\text{Cr}_3)_3$ и дополнительное количество боридов хрома Cr_2B , легированных железом. То есть в этом случае происходит рост количества упрочняющей фазы, а также ее упрочнение за счет образования легированных боридов Ni_3B , входящих в состав легкоплавкой эвтектики. Такое строение сплава обуславливает и специфический для данного состава характер износа. Мягкая матрица подвергается многократному пластическому передеформированию с образованием царапин продуктами износа. О сильном передеформировании мягкой матрицы свидетельствует значительное измельчение размеров кристаллитов: с 55,5 до 22,3 нм – в случае газопламенного оплавления, с 35,2 до 22,1 нм – при лазерном оплавлении. Значительное повышение износостойкости обусловлено увеличением количества упрочняющей фазы, частицы которой тормозят развитие усталостных процессов в никелевой матрице. Кроме того, все твердые составляющие такого композиционного покры-

тия имеют полную смачиваемость расплавом никеля, что обуславливает максимальное их сцепление с никелевой матрицей и стойкость к выкрашиванию.

При введении легирующих добавок карбида вольфрама в структуре происходит сильное упрочнение матрицы за счет частичного растворения в никеле вольфрама (до 7 % ат.). В процессе изнашивания покрытия такого состава на поверхности не наблюдалось задиров и царапин. При этом не было зафиксировано измельчения кристаллитов, а также сколь угодно значительного изменения параметров решетки, что свидетельствует о локализации процессов пластического поверхностного деформирования в тончайших, рентгеновски нечувствительных слоях. По-видимому, основным механизмом изнашивания в этом случае является усталостное выкрашивание твердой фазы.

ВЫВОДЫ

1. В ходе экспериментального определения влияния оптимизации параметров гибридного процесса формирования газотермических самофлюсующихся покрытий на основе Ni-содержащих сплавов были установлены новые закономерности структурообразования в формируемом поверхностном слое и его поведения при последующих испытаниях на абразивный износ.

2. Результаты этих испытаний указывают на зависимость механизма износа от микроструктуры образованной упрочненной поверхности, определяемой типом и режимом технологической стадии оплавления (лазерного или газопламенного), а также составом вводимой в покрытие легирующей карбидной добавки.

3. Измерение свойств покрытий, легированных карбидной примесью Cr_3C_2 , показало рост концентрации упрочняющей фазы в покрытии при обеспечении достаточной пластичности Ni-содержащей матричной фазы, за счет чего достигается повышение механической прочности покрытия в условиях его испытаний на трение. Это приводит также к особому механизму изнашивания покрытия. Введение же в покрытие иных легирующих добавок – из карбидных порошков WC и B_4C – позволяет

получить значительный эффект, регистрируемый по повышению прочностных характеристик Ni-содержащей матричной фазы покрытия (без изменения объемного содержания данной фазы), за счет этого защищающий ее от механической деформации и образования трещин и царапин.

4. Установлено, что покрытия, оплавленные лазерным излучением, обладают в 2–3 раза более высокой износостойкостью по сравнению с покрытиями того же состава, оплавленными газовой горелкой. При этом за счет оплавления с помощью лазерного метода в полученных покрытиях зафиксирован эффект улучшения их стойкости в условиях износа при испытаниях на трение, обусловленный механизмом снижения размеров кристаллитов фаз в поверхностном слое и изменения его текстуры, а также дополнительного внедрения легирующих компонентов в матричной фазе покрытия.

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы «Передовые цифровые технологии» (Соглашение о гранте № 075-15-2022-312 от 20.04.2022).

ЛИТЕРАТУРА

1. Пантелеенко, Ф. И. Восстановление деталей машин / Ф. И. Пантелеенко, В. П. Лялякин, В. П. Иванов. М.: Машиностроение, 2003. 672 с.
2. Кудинов, В. В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В. В. Кудинов, Г. В. Бобров. М.: Металлургия, 1992. 432 с.
3. Балдаев, Л. Х. Газотермическое напыление: учеб. пособие / Л. Х. Балдаев, В. А. Вахалин, Г. И. Ганноченко. М.: Маркет ДС, 2007. 344 с.
4. Спиридонов, Н. В. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Н. В. Спиридонов, О. С. Кобяков, И. Л. Куприянов. Минск: Выш. шк., 1988. 155 с.
5. Wear Behaviour of Laser Clad NiCrBSi Coating / E. Fernández [et al.] // Wear. 2005. Vol. 259, iss. 7–12. P. 870–875. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.02.063>.
6. Comparison of laser-Clad and Furnace-Melted Ni-Based Alloy Microstructures / Q. Li [et al.] // Surface and Coatings Technology. 2001. Vol. 137, iss. 2–3. P. 122–135. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00732-5](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00732-5).
7. Simunovic, K. Different Approaches to the Investigation and Testing of the Ni-Based Self-Fluxing Alloy Coatings – A Review. Part 2: Microstructure, Adhesive Strength, Cracking Behavior, and Residual Stresses Investigations / K. Simunovic, T. Saric, G. Simunovic // Tribology

- logy Transactions. 2014. Vol. 57, iss. 6. P. 980–1000. <https://doi.org/10.1080/10402004.2014.927548>.
8. Simunovic, K. Different Approaches to the Investigation and Testing of the Ni-Based Self-Fluxing Alloy Coatings – A Review. Part 1: General Facts, Wear and Corrosion Investigations / K. Simunovic, T. Saric, G. Simunovic // Tribology Transactions. 2014. Vol. 57, iss. 6. P. 955–979. <https://doi.org/10.1080/10402004.2014.927547>.
 9. Hemmati, I. Compositional Modification of Ni-Base Alloys for Laser-Deposition Technologies / I. Hemmati, V. Ocelik, J. Th. M. De Hosson // Laser Surface Engineering. Processes and Applications. 2014. P. 137–162. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-074-3.00006-4>.
 10. Соболева, Н. Н. Повышение износостойкости NiCrBSi покрытий, формируемых газопорошковой лазерной наплавкой: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.09 / Н. Н. Соболева. Екатеринбург. 2016. 190 с.
 11. Investigation of Ni-Cr-Si-Fe-B Coatings Produced by the Electron Beam Cladding Technique / T. A. Zimogliadova [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 156, No 1. P. 012017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/156/1/012017>.
 12. Григорьянц, А. Г. Гибридные технологии лазерной сварки: учеб. пособие / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. М. Чирков. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 52 с.
 13. Литвинов, А. П. Направления развития комбинированных и гибридных технологий сварки и наплавки / А. П. Литвинов // Автоматическая сварка. 2009. № 1. С. 48–52.
- Поступила 10.01.2023
Подписана в печать 19.09.2023
Опубликована онлайн 30.11.2023
- ЛИТЕРАТУРА
1. Panteleenko F. I., Lyalyakin V. P., Ivanov V. P. (2003) *Restoration of Machine Parts*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 672 (in Russian).
 2. Kudinov V. V., Bobrov G. V. (1992) *Spray Coating. Theory, Technology and Equipment*. Moscow, Metallurgiya Publ. 432 (in Russian).
 3. Baldaev L. Kh., Vakhlin V. A., Gannochenko G. I. (2007) *Gas Thermal Spraying*. Moscow, Market DS Publ. 344 (in Russian).
 4. Spiridonov N. V., Kobayakov O. S., Kupriyanov I. L. (1988) *Plasma and Laser Methods for Hardening Machine Parts*. Minsk, Vysshaya Shkola Publ. 155 (in Russian).
 5. Fernández E., Cadenas M., González R., Navas C., Fernández R., De Damborenea J. (2005) Wear Behaviour of Laser Clad NiCrBSi Coating. *Wear*, 259 (7–12), 870–875. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.02.063>.
 6. Li Q., Zhang D., Lei T., Chen C., Chen W. (2001) Comparison of Laser-Clad and Furnace-Melted Ni-Based Alloy Microstructures. *Surface and Coatings Technology*, 137 (2–3), 122–135. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00732-5](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00732-5).
 7. Simunovic K., Saric T., Simunovic G. (2014) Different Approaches to the Investigation and Testing of the Ni-Based Self-Fluxing Alloy Coatings – A Review. Part 2: Microstructure, Adhesive Strength, Cracking Behavior, and Residual Stresses Investigations. *Tribology Transactions*, 57 (6), 980–1000. <https://doi.org/10.1080/10402004.2014.927548>.
 8. Simunovic K., Saric T., Simunovic G. (2014) Different Approaches to the Investigation and Testing of the Ni-Based Self-Fluxing Alloy Coatings – A Review. Part 1: General Facts, Wear and Corrosion Investigations. *Tribology Transactions*, 57 (6), 955–979. <https://doi.org/10.1080/10402004.2014.927547>.
 9. Hemmati I., Ocelik V., De Hosson J. Th. M. (2014) Compositional modification of Ni-Base Alloys For Laser-Deposition Technologies. *Laser Surface Engineering Processes and Applications*, 137–162. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-074-3.00006-4>.
 10. Soboleva N. N. (2016) *Increasing the Wear Resistance of NiCrBSi Coatings Formed by Gas-Powder Laser Cladding*: Dissertation of the Candidate of Technical Sciences. Ekaterinburg. 190 (in Russian).
 11. Zimogliadova T. A., Drobyaz E. A., Golkovskii M. G., Bataev V. A., Durakov V. G., Cherkasova N. Y. (2016) Investigation of Ni-Cr-Si-Fe-B Coatings Produced by the Electron Beam Cladding Technique. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 156 (1), 012017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/156/1/012017>.
 12. Grigoryants, A. G., Shiganov I. N., Chirkov A. M. (2004) *Hybrid Laser Welding Technologies*. Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. 52 (in Russian).
 13. Litvinov A. P. (2009) Directions for the Development of Combined and Hybrid Welding and Surfacing Technologies. *Avtomaticheskaya Svarka = Automatic Welding*, (1), 48–52 (in Russian).
- Received: 10.01.2023
Accepted: 19.09.2023
Published online: 30.11.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-460-469>

УДК 621.876.11, 629.114.2

Современные средства обеспечения безопасности во время движения кабины лифта вверх и при ее остановке в этажной площадке

Магистр техн. наук А. В. Куцепенко¹⁾, канд. техн. наук, доц. А. И. Антонец²⁾,
инж. Д. В. Непша¹⁾

¹⁾ОАО «Могилевлифтмаш» (Могилев, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

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

Реферат. Лифты относятся к потенциально опасным объектам и, несмотря на достаточно высокую безопасность современных лифтов, которая регламентируется правилами по промышленной безопасности, ГОСТами и инструкциями завода-изготовителя, требования к лифтам постоянно ужесточаются. Согласно п. 5.6.1.1 (б) и п. 5.6.6 ГОСТ 33984.1–2016, необходимо предотвращать превышение скорости при перемещении кабины в обоих направлениях (и вверх и вниз). Для выполнения этого требования лифты могут оснащаться двумя ограничителями скорости одностороннего действия, один из которых приводит в действие ловители одностороннего действия, размещенные на кабине, а второй – на противовесе лифта. Однако такое решение ведет к дублированию системы безопасности (помимо двух ограничителей скорости и ловителей, дополнительно требуются два натяжных устройства, два каната ограничителя скорости и двойное количество концевых выключателей). Это может быть оправдано только в случаях, когда под приямком лифтовой шахты находятся используемые помещения, например подземная парковка. В данной статье рассмотрены устройства безопасности лифта, соответствующие новым требованиям современных отечественных и зарубежных стандартов (EN 81–20:2014): ловители и ограничители скорости двухстороннего действия, система предотвращения непреднамеренного движения кабины (противовеса). Ловители и ограничитель скорости представляют собой взаимосвязанные устройства, которые предотвращают падение кабины (противовеса) в случае обрыва или при ослаблении несущих канатов, а также останавливают кабину (противовес) при недопустимом превышении скорости. Однако, как показала практика, возможны случаи неконтролируемых движений лифта вверх и во время стоянки лифта с открытыми дверями. Это приводит к авариям и травматизму пассажиров. Предложенные конструкции ограничителя и ловителя позволяют этого избежать. Даны рекомендации по модернизации старых лифтов и, как следствие, повышению их уровня безопасности.

Ключевые слова: узел безопасности, ловитель плавного торможения двухстороннего действия, ограничитель скорости двухстороннего действия, система предотвращения непреднамеренного движения кабины (противовеса), устройство стопорное, повторное выравнивание кабины

Для цитирования: Куцепенко, А. В. Современные средства обеспечения безопасности во время движения кабины лифта вверх и при ее остановке в этажной площадке / А. В. Куцепенко, А. И. Антонец, Д. В. Непша // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 6. С. 460–469. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-460-469>

Modern Means of Ensuring Safety During the Upward Movement of the Elevator Car and When it Stops in the Floor Area

A. V. Kutsepolenko¹⁾, A. I. Antonevich²⁾, D. V. Nepsha¹⁾

¹⁾OJSC “Mogilevliftmash” (Mogilev, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Elevators are potentially dangerous objects and, despite the fairly high safety of modern elevators, which is regulated by industrial safety rules, State Standards and manufacturer’s instructions, the requirements for elevators are constantly

Адрес для переписки

Куцепенко Александр Владимирович
ОАО «Могилевлифтмаш»
пр. Мира, 42,
212798, г. Могилев, Республика Беларусь
Тел.: +375 22 263-35-08
bn_ntc@liftmach.by

Address for correspondence

Kutsepolenko Alexander V.
OJSC “Mogilevliftmash”
42, Mira Ave.,
212798, Mogilev, Republic of Belarus
Тел.: +375 22 263-35-08
bn_ntc@liftmach.by

becoming more stringent. According to clause 5.6.1.1 (b) and clause 5.6.6 of GOST [All-Union State Standard] 33984.1–2016, it is required to prevent overspeeding when moving the cabin in both directions (up and down). To meet this requirement, elevators can be equipped with two single-acting speed limiters, one of which activates single-acting safety devices located on the car, and the second on the elevator counterweight. However, this solution leads to duplication of the safety system (in addition to two speed limiters and safety catches, two tensioners, two speed limiter ropes and a double number of limit switches are additionally required). This can only be justified in cases where there are used premises under the pit of the elevator shaft, for example an underground parking lot. This paper discusses elevator safety devices that meet the new requirements of modern domestic and foreign standards (EN 81–20:2014): double-acting safety devices and speed limiters, a system for preventing unintentional movement of the car (counterweight). Catchers and a speed limiter are interconnected devices that prevent the cabin (counterweight) from falling in the event of a break or when the supporting ropes are weakened, and also stop the cabin (counterweight) if the speed is unacceptable. However, as practice has shown, cases of uncontrolled upward movements of the elevator and while the elevator is parked with open doors are possible. This leads to accidents and injuries to passengers. The proposed designs of the limiter and catcher allow this to be avoided. Recommendations are proposed for modernizing old elevators, and, as a result, increasing their level of safety.

Keywords: safety node, double-acting soft-brake catcher, double-acting speed limiter, system to prevent unintentional movement of the car (counterweight), locking device, re-leveling the car

For citation: Kutsepolenko A. V., Antonevich A. I., Nepsha D. V. (2023) Modern Means of Ensuring Safety During the Upward Movement of the Elevator Car and When it Stops in the Floor Area. *Science and Technique*. 22 (6), 460–469. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-460-469> (in Russian)

Введение

Лифты – важная часть инфраструктуры городов и зданий, они играют важную роль в повседневной жизни тысяч людей, и их значение в будущей урбанизации будет только возрастать. При этом главным вопросом является обеспечение надежной работы лифтов и максимальной безопасности пассажиров. Причем требования, предъявляемые к уровню безопасности лифтов, постоянно повышаются, что находит отражение в новых стандартах.

Основная часть

Требования к лифтовому оборудованию, касающиеся безопасности пассажиров, формировались на основе опасностей – либо с высокой вероятностью возникновения, либо с высокой категорией тяжести возникающих последствий [1–2]. По мере обеспечения защиты от указанных опасностей, а также на основе анализа статистики несчастных случаев проводится оценка рисков, на основе которой принимаются решения о необходимости обеспечивать безопасность пассажиров и от менее вероятных отказов лифтового оборудования и от отказов, не приводящих к тяжелым последствиям. В результате, требования к лифтовому оборудованию и к узлам безопасности лифта постоянно возрастают.

Примером все возрастающих требований к лифтовому оборудованию в области безопасности могут служить новые пункты, касающиеся ограничителя скорости лифта, которые появились при замене ГОСТ Р 53780–2010

на ГОСТ 33984.1–2016. При этом, несмотря на то что лифты, сертифицированные ранее на соответствие ГОСТ Р 53780–2010, могут и сегодня производиться и эксплуатироваться, однако вновь разрабатываемые лифты должны быть сертифицированы на соответствие ГОСТ 33984.1–2016.

Так, согласно п. 5.4.7.1 ГОСТ Р 53780–2010, улавливание и удержание кабины лифта при аварийном превышении ею скорости перемещения требовались только при движении вниз. Поэтому было достаточно использовать ограничители скорости и ловители только одностороннего действия.

Согласно п. 5.6.1.1 (б) и 5.6.6 ГОСТ 33984.1–2016, необходимо предотвращать превышение скорости при перемещении кабины в обоих направлениях (и вверх и вниз). Аналогичные требования появились и в современных зарубежных стандартах (EN 81–20:2014). Для выполнения этого требования лифты могут оснащаться двумя ограничителями скорости одностороннего действия, один из которых приводит в действие ловители одностороннего действия, размещенные на кабине, а второй – на противовесе лифта. Однако такое решение ведет к дублированию системы безопасности (помимо двух ограничителей скорости и ловителей, дополнительно требуются два натяжных устройства, два каната ограничителя скорости и двойное количество концевых выключателей). Это может быть оправдано только в случаях, когда под приямком лифтовой шахты находятся используемые помещения, например подземная парковка. В остальных

случаях экономически целесообразнее оснащать лифт ограничителем скорости двухстороннего действия и соответственно ловителем двухстороннего действия. При этом так как в большинстве случаев они используются комплектно, т. е. на каждую направляющую по ловителю, в соответствии с требованиями ГОСТ 33984.1–2016 ловители должны быть плавного торможения.

Для выполнения вышеуказанных требований новых стандартов на ОАО «Могилевлифтмаш» разработаны двухсторонние маятниковый ограничитель скорости [3] и роликовый ловитель [4–5] плавного торможения.

Маятниковый ограничитель скорости двухстороннего действия производства ОАО «Могилевлифтмаш» [6] имеет классическую конструкцию с верхним расположением коромысла, которая подробно описана в справочниках и учебнике [7].

Ограничитель работает следующим образом (рис. 1). При перемещении кабины лифта канат ограничителя скорости вращает охватываемый им шкив и связанные с ним кулачок с криволинейной фасонной поверхностью, ступицу с зубьями и перфорированный диск. При этом направление вращения шкива зависит от направления перемещения кабины лифта.

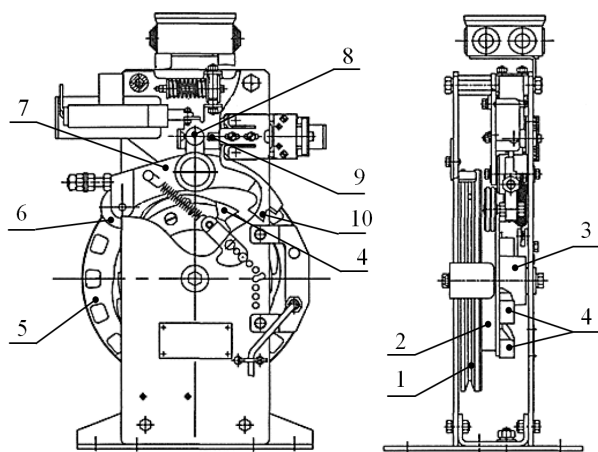


Рис. 1. Двухсторонний ограничитель скорости маятникового типа производства ОАО «Могилевлифтмаш»:

- 1 – шкив; 2 – кулачок с криволинейной фасонной поверхностью; 3 – ступица; 4 – зубья на ступице; 5 – диск перфорированный; 6 – ролик; 7 – коромысло; 8 – выступ, 9 – выключатель, 10 – зацеп коромысла

Fig. 1. Double-sided pendulum-type speed limiter manufactured by OJSC “Mogilevliftmash”:

- 1 – pulley; 2 – cam with curved shaped surface; 3 – hub; 4 – teeth on the hub; 5 – perforated disk; 6 – roller; 7 – rocker; 8 – clutch, 9 – switch, 10 – rocker hook

В нормальном режиме работы ограничителя скорости, когда скорость перемещения кабины не превышает допустимую, ролик коромысла обкатывается по криволинейной фасонной поверхности кулачка, сохраняя с ней контакт. Коромысло совершает колебания, однако его выступ не контактирует с выключателем, а зацеп коромысла не контактирует с зубьями ступицы.

При достижении скорости срабатывания ограничителя скорости ролик отрывается от поверхности кулачка и выступ коромысла воздействует на выключатель, а зацеп коромысла сцепляется с одним из зубьев ступицы. Таким образом блокируется вращение шкива. Так как кабина продолжает перемещаться и тянет канат ограничителя скорости, между ним и охватываемым им шкивом ограничителя скорости возникает сила трения, а в канате возникает растягивающее усилие, с которым канат воздействует на механизм включения ловителей. Усилие натяжения каната растет до тех пор, пока канат не начнет проскальзывать относительно шкива. Усилие натяжения каната, при котором он начал проскальзывать относительно невращающегося шкива ограничителя скорости, называют усилием протягивания. Величина усилия протягивания должна быть достаточной для включения ловителей (п. 5.6.2.2 (а) ГОСТ 33984.1–2016).

Общий вид двухстороннего роликового ловителя [4–5] плавного торможения производства ОАО «Могилевлифтмаш» представлен на рис. 2.

При срабатывании ограничителя скорости происходит включение ловителя. Ловитель работает следующим образом.

В зависимости от направления перемещения кабины механизм включения ловителя будет перемещать в рабочее положение один из роликов, воздействуя на установленную на него ось. Необходимое усилие торможения создается за счет пружины, которая создает соответствующее усилие поджатия тормозной колодки к направляющей и ролика к основанию. Тормозная колодка поджимается к пружине винтами. Требуемое усилие поджатия создается за счет соответствующего исполнения пружины и регулировочных прокладок. Направляющая пластина предотвращает роли-

ки от выпадения из корпуса, а пластина с табличкой-пломбой служит для опломбирования ловителя.

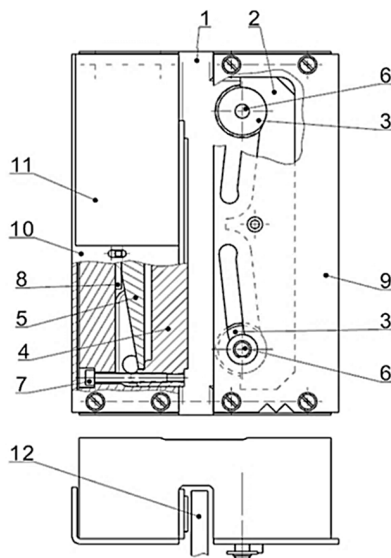


Рис. 2. Общий вид ловителя плавного торможения двухстороннего действия производства ОАО «Могилевлифтмаш»: 1 – корпус; 2 – основание; 3 – ролики; 4 – тормозная колодка; 5 – пружина; 6 – оси; 7 – винты; 8 – регулировочные прокладки; 9 – направляющая пластина; 10 – пластина; 11 – табличка-пломба; 12 – направляющая лифта

Fig. 2. General view of a double-acting smooth braking catcher manufactured by OJSC “Mogilevliftmash”:

1 – body; 2 – base; 3 – rollers; 4 – brake shoe; 5 – spring; 6 – axes; 7 – screws; 8 – adjust shims; 9 – guide plate; 10 – plate; 11 – seal plate; 12 – elevator guide

Следует помнить, что лифт является объектом повышенной опасности не только во время перемещения кабины, но даже в момент остановки в этажной площадке, когда происходит посадка пассажиров в кабину или их выход из нее. Соответственно безопасность пассажиров должна быть обеспечена на всех этапах поль-

зования лифтом. Например, согласно требованиям п. 5.6.1.1 (с) и 5.6.7 ГОСТ 33984.1–2016, лифты должны быть оборудованы средством, предотвращающим или останавливающим неконтролируемое движение кабины вверх или вниз от этажной площадки с незапертой дверью шахты и незакрытой дверью кабины. Выполнить это требование можно двумя способами:

- оснастить лифт контролем тормоза лебедки (в случае если он снабжен необходимыми контактами). Как правило, это возможно сделать при использовании безредукторного привода;
- оснастить ограничитель скорости стопорным устройством (Overspeed governor with UCM, Unattended Car Movement, anticreep system), блокирующим вращение шкива при открытой двери кабины [8]. В качестве примера импортных ограничителей, оснащенных такими устройствами, можно рассмотреть центробежные ограничители скорости Europa [9] фирмы Gervall (Испания) или Vega [10] фирмы Dynatech (Испания) и маятниковые ограничители скорости Gervall Aljo 2129/2130 [11], а также блокировочное устройство SA12.1 фирмы ThyssenKrupp [12].

ОАО «Могилевлифтмаш» также выпускает новые модели лифтов, сертифицированные на соответствие требованиям ГОСТ 33984.1–2016 и оснащенные системой защиты от непреднамеренного движения кабины лифта [13], в состав которой входят устройства:

- обнаружения неконтролируемого движения кабины;
- торможения кабины лифта;
- активации устройств торможения.

Функциональные особенности компонентов системы предотвращения непреднамеренного движения кабины приведены в табл. 1.

Таблица 1

Функциональные особенности компонентов системы от непреднамеренного движения кабины
Functional features of the system components against unintentional movement of the cabin

Компоненты системы предотвращения непреднамеренного движения кабины	Устройства обнаружения	На лифтах, которые не имеют функций повторного выравнивания или выравнивания с открытыми дверями кабины и незапертыми дверями шахты, не требуется выявлять неконтролируемое движение кабины (п. 5.6.7.2. ГОСТ 33984.1–2016)
	Устройства активации	Устройство управления лифтом
		Ограничитель скорости со стопорным устройством
	Устройства торможения	Ловители
		Тормоз главного привода

Взаимодействие компонентов системы предотвращения непреднамеренного движения кабины иллюстрирует рис. 3.

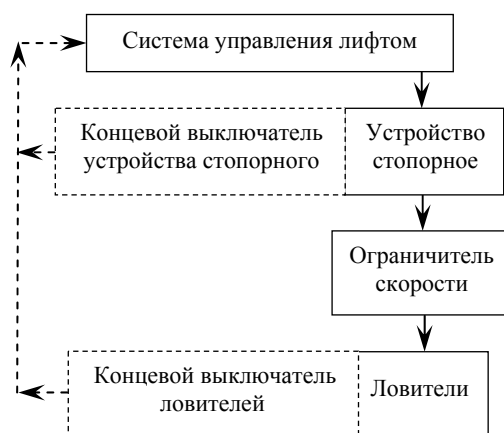


Рис. 3. Структурная схема системы предотвращения непреднамеренного движения кабины

Fig. 3. Block diagram of the system for preventing unintentional movement of the cabin

На рис. 4 показаны конструкция устройства стопорного и принцип его взаимодействия с ограничителем скорости [14–15].

При контролируемом движении кабины система управления лифтом подает напряжение на электромагнит устройства стопорного, который удерживает защелку в отведенном от шкива состоянии (рис. 4). При этом шкив ограничителя скорости не заблокирован и может вращаться при перемещении кабины лифта.

При остановке кабины подача напряжения на электромагнит прекращается. В результате защелка устройства стопорного под действием пружины (или под действием силы тяжести) входит в зацепление с одним из пазов, выполненных в канавке шкива ограничителя скорости, и блокируется посредством рычажного стопора. Положение защелки устройства стопорного в рабочем состоянии контролируется концевым выключателем.

При неконтролируемом движении кабины напряжение на электромагните устройства стопорного отсутствует и защелка остается в зацеплении с одним из пазов, выполненных в канавке шкива ограничителя скорости, предотвращая возможность его вращения. Так как перемещающаяся кабина тянет канат ограничителя скорости, из-за сил трения между ним и шкивом ограничителя скорости в канате возникает растягивающее усилие, которое приводит в действие ловители.

Концевой выключатель ловителя контролирует срабатывание системы предотвращения непреднамеренного движения кабины. Если неконтролируемое движение кабины произошло по причине несанкционированной подачи напряжения на тормоз главного привода, то при срабатывании ловителей их концевой выключатель разрывает цепь безопасности и подача напряжения прекращается.

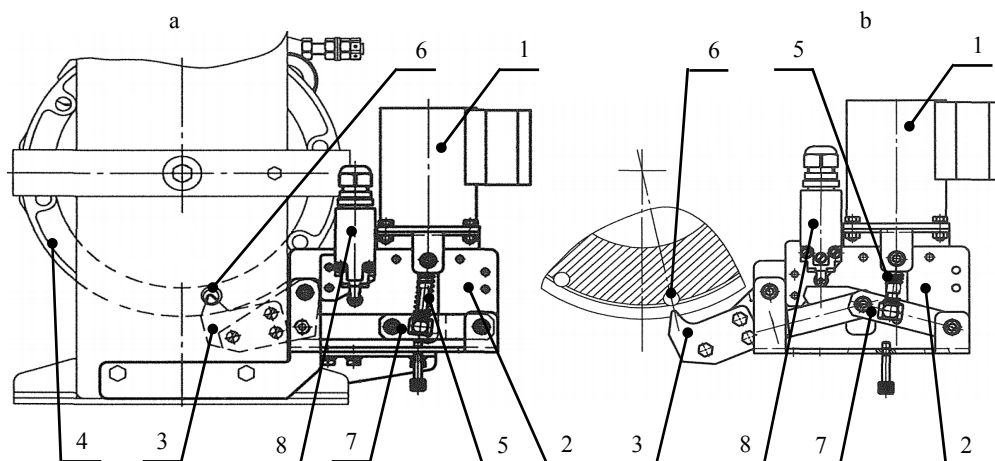


Рис. 4. Устройство стопорное навесное на ограничитель скорости маятникового типа (ОАО «Могилевлифтмаш»):

а – шкив заблокирован (кабина лифта остановлена); б – шкив разблокирован (кабина лифта в движении); 1 – электромагнит; 2 – устройство стопорное; 3 – защелка; 4 – шкив; 5 – пружина; 6 – пазы; 7 – стопор; 8 – выключатель

Fig. 4. Stopping device mounted on a pendulum-type speed limiter (OJSC “Mogilevliftmash”):

а – pulley blocked (elevator car is stopped); б – pulley unlocked (elevator cabin in motion); 1 – electromagnet; 2 – locking device; 3 – latch; 4 – pulley; 5 – spring; 6 – grooves; 7 – stopper; 8 – switch

Необходимость защиты от неконтролируемого движения кабины вверх или вниз от этажной площадки с незапертой дверью шахты и незакрытой дверью кабины, к сожалению, подтверждается несчастными случаями, которые хоть и не часто, но случаются. Так, в 2018 г. в Чебоксарах [16], в 2021 г. в Чите и Красногорске [17] в результате самопроизвольных движений кабин лифтов с открытыми дверями произошли аварии, повлекшие травмы пассажиров. Очевидно, что в перечисленных случаях оснащение ограничителя скорости устройством стопорным позволило бы предотвратить аварию.

Необходимо заострить внимание на том, что помимо обеспечения безопасности пассажиров, также важно обеспечить безопасность обслуживающего персонала при работе лифта в режиме ревизии. Рассмотренная выше система предотвращения непреднамеренного движения кабины и ее устройство стопорное блокируют вращение шкива при остановке кабины как с открытыми, так и с закрытыми дверями кабины и шахты. То есть в момент, когда кабина лифта, который находится в режиме ревизии, не движется, шкив ограничителя скорости заблокирован устройством стопорным. Это позволяет в случае непреднамеренного движения кабины остановить ее не тогда, когда она разгонится до скорости, на которую настроен ограничитель скорости, а сразу, как только она начнет движение, что значительно снижает уровень тяжести последствий такого отказа для обслуживающего лифт персонала.

Следует учитывать, что в лифтах, оснащенных функцией повторного выравнивания кабины, требование о защите от неконтролируемого ее движения вверх или вниз от этажной площадки с незапертой дверью шахты и незакрытой дверью кабины тоже должно выполняться. То есть, с одной стороны, должна быть обеспечена возможность перемещения кабины с незакрытой дверью (п. 3.13 ГОСТ 33984.1–2016) после ее остановки на этаже, а с другой – не должны нарушаться п. 5.6.1.1 (с) и 5.6.7 ГОСТ 33984.1–2016. Необходимо отметить, что временное отключение устройства стопорного для проведения повторного выравнивания кабины лифта снижает уровень безопасности пассажиров, а также уменьшает его ресурс. Ограничители скорости фирм Gervall и Dynatech позволяют выполнять повторное выравнивание

кабины лифта без отключения стопорного устройства. На ОАО «Могилевлифтмаш» также ведутся работы в этом направлении [18]. Разработаны опытные образцы и проводятся испытания ограничителей скорости двухстороннего действия с функцией повторного выравнивания маятникового (рис. 5) и центробежного (рис. 6) типов, при этом оснащенных устройством стопорным.

На рис. 5 показан способ реализации повторного выравнивания кабины при жестко закрепленном на корпусе ограничителя скорости устройстве стопорном. Для этого на шкиве ограничителя скорости расположен промежуточный диск, на периферийной поверхности которого выполнены канавки. На корпусе ограничителя скорости расположено устройство стопорное, чей зацеп при незакрытых и незапертых дверях шахты и кабины контактирует с канавками. Также в промежуточном диске выполнены две пары пазов.

В одной паре пазов расположены пружины сжатия, концы которых опираются на опоры, закрепленные на шкиве ограничителя скорости. Таким образом, при повторном выравнивании кабины шкив может поворачиваться на некоторый угол относительно промежуточного диска, заблокированного зацепом. В центре каждого из второй пары шести пазов расположены упоры, которые жестко закреплены на шкиве ограничителя скорости и ограничивают угол его поворота относительно промежуточного диска.

На рис. 6 показан способ реализации повторного выравнивания кабины при оснащении центробежного ограничителя скорости устройством стопорным, имеющим возможность перемещаться относительно его корпуса. Данное решение, разработанное конструкторами ОАО «Могилевлифтмаш» [19–21], близко к решению фирмы Dynatech [10].

Суть заключается в том, что стопорное устройство закреплено на диске, который может поворачиваться относительно корпуса ограничителя скорости на угол, ограничиваемый упором, который расположен на корпусе. Особенностью этого устройства стопорного является то, что при активации его зацеп перемещается в зону, в которой возможен его контакт непосредственно с рабочими органами ограничителя скорости.

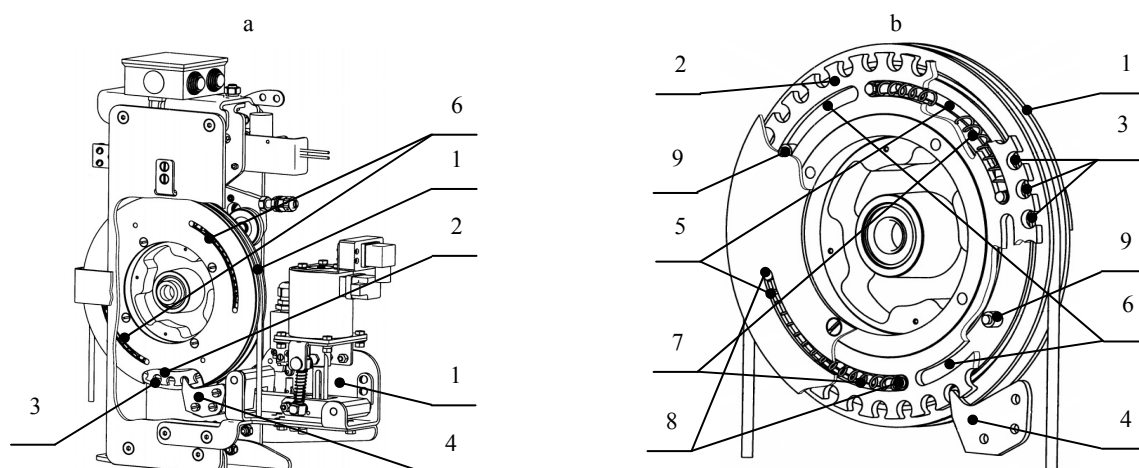


Рис. 5. Конструкция опытного образца ограничителя скорости двухстороннего действия маятникового типа с функцией повторного выравнивания кабины, оснащенного устройством стопорным (ОАО «Могилевлифтмаш»):

а – ограничитель скорости в сборе; б – шкив ограничителя скорости в разрезе;

1 – шкив ограничителя скорости; 2 – промежуточный диск; 3 – канавки; 4 – зацеп; 5 – пазы; 6 – пазы; 7 – пружина; 8 – опоры; 9 – упоры

Fig. 5. Design of a prototype of a pendulum-type double-acting speed limiter with the function of re-leveling the cabin, equipped with a locking device (OJSC “Mogilevliftmash”): a – speed limiter assembly; b – cutaway speed limiter pulley; 1 – speed limiter pulley; 2 – intermediate disk; 3 – grooves; 4 – hook; 5 – channels; 6 – channels; 7 – spring; 8 – supports; 9 – stops

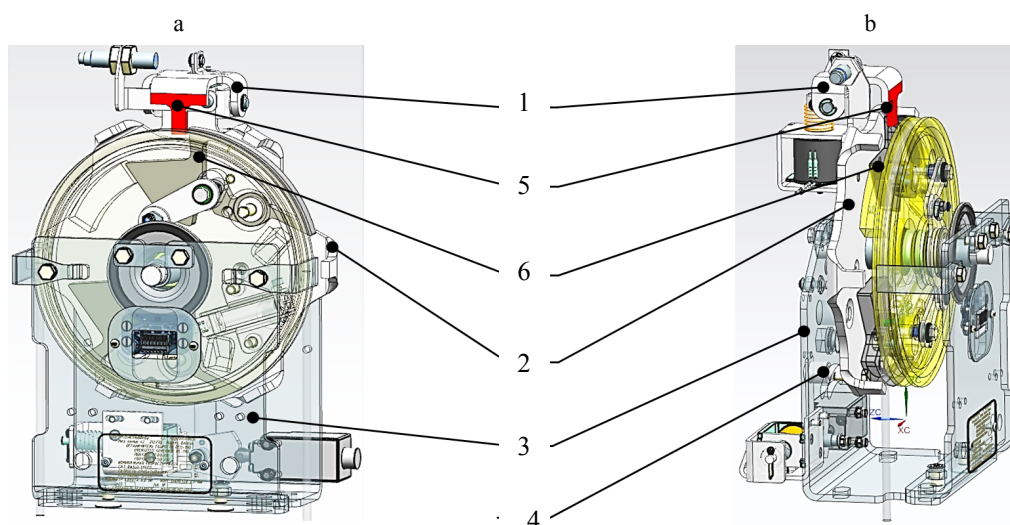


Рис. 6. Конструкция опытного образца ограничителя скорости двухстороннего действия центробежного типа с функцией повторного выравнивания кабины, оснащенного устройством стопорным (ОАО «Могилевлифтмаш»): а – вид спереди; б – вид сбоку; 1 – устройство стопорное; 2 – диск; 3 – корпус ограничителя скорости; 4 – упор; 5 – зацеп; 6 – рабочие органы

Fig. 6. Design of a prototype of a double-acting centrifugal speed limiter with the function of re-leveling the cabin, equipped with a locking device (OJSC “Mogilevliftmash”): a – front view; b – side view;

1 – locking device; 2 – disk; 3 – speed limiter housing; 4 – stop; 5 – hook; 6 – working elements

ВЫВОДЫ

1. Повышение безопасности лифтов при эксплуатации, монтаже, обслуживании, осмотре или ремонте – важнейшая задача, требующая постоянного совершенствования лифтового

оборудования и разработки новых устройств (узлов) безопасности. При этом необходимо ориентироваться не только на отечественные стандарты, но и самые современные зарубежные. Так, лифты, сертифицированные по ГОСТ Р 53780–2010, уступают по уровню без-

опасности лифтам, отвечающим требованиям ГОСТ 33984.1–2016.

2. Основными узлами, обеспечивающими безопасность лифтов, являются ограничитель скорости и ловитель. Поэтому замена устаревших получивших распространение на отечественных лифтах ловителей и ограничителей скорости одностороннего действия на аналогичные устройства двухстороннего действия позволит обеспечить безопасность пассажиров также при движении кабины вверх. Оборудование ограничителя скорости стопорным устройством обеспечит безопасность при загрузке или выгрузке кабины.

3. Модернизация лифтового оборудования может быть произведена в любой момент его эксплуатации, не дожидаясь выработки лифтом его ресурса. Анализ некоторых имевших место инцидентов с лифтами (данные Ростехнадзора) подтверждает вывод о том, что предлагаемые технические решения позволяют их избежать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения = Надійність у техніці. Аналіз видів, наслідків і критичності відмов. Основні положення: ГОСТ 27.310–95. Введ. РБ 01.10.1997. Минск: Госстандарт, 1995. 13 с.
2. Лифты, эскалаторы и пассажирские конвейеры. Методология оценки и снижения риска = Ліфти, ескалатори і пасажирські конвеєри. Методологія оцінки і зніження ризику: ГОСТ ISO 14798–2017. Введ. РБ 01.10.2019. Минск: Госстандарт, 2017. 32 с.
3. Speed Limiting Device [Electronic Resource]: Pat. EA 033019 (B1) / V. F. Komoza, O. A. Dobrinovich, S. V. Pavlov, D. N. Gusev. Publ. date 30.08.2019. Mode of access: https://ru.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=20190830&DB=EPODOC&locale=ru_RU&CC=EA&NR=033019B1&KC=B1&ND=6. Date of access: 25.04.2023.
4. Механизм включения ловителя двухстороннего действия: пат. EA 202000184 (A1) / С. В. Павлов, И. Н. Балабанов, Д. В. Непша, А. С. Старовойтов. Оpubл. 30.11.2021.
5. Непша, Д. В. Параметры контактно-силового взаимодействия элементов ловителя плавного торможения в процессе аварийной остановки / Д. В. Непша, В. Н. Клочков, М. В. Соболев // Вестник Белорусско-Российского университета. 2021. № 4 (73). С. 45–55. https://doi.org/10.53078/20778481_2021_4_45.
6. Ограничитель скорости ОСМ-305 [Электронный ресурс]: Руководство по эксплуатации 1020БК.17.00.000 РЭ / Министерство промышленности Республики Беларусь; ОАО «Могилевлифтомаш». Режим доступа: <https://liftmach.by/upload/iblock/1020BK.17.00.000%20РЭ.pdf>. Дата доступа: 24.04.2023.
7. Лифты: учеб. для студ. высш. учеб. заведений, обучающихся по специальностям: «Механизация и автоматизация строительства» и «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» / Г. Г. Архангельский [и др.]; под общ. ред. Д. П. Волкова. М.: Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2010. 576 с.
8. Gervall. АО «Герваль-Рус». [Электронный ресурс]: каталог. Режим доступа: https://gervall.ru/upload/files/ogran_skorosti/UCM.pdf. Дата доступа: 06.04.2023.
9. Ограничители скорости. Gervall. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://gervall.ru/upload/files/ogran_skorosti/%D0%9E%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%87%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B8%20%D1%81%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8.pdf. Дата доступа: 06.04.2023.
10. Dynatech. Overspeed Governor. Vega. [Electronic Resource]: Instructions: VEGA Cod: DYN 35.1.15. Publ. date 14.12.2022. Mode of access: <https://www.dynatech-elevation.com/documentos/articulos/Reducido%20VEGA-ING.pdf>. Date of access: 07.04.2023.
11. Gervall. Ограничители скорости ALJO 2129 Ø 200 и ALJO 2130 Ø 300 остановка и удержание кабины при спуске и подъеме [Электронный ресурс]: Руководство по эксплуатации. Техническое описание. Инструкции по монтажу. Редакция 2014 DT-2129-2130-RU-00 RU. Режим доступа: <https://gervall.ru/upload/iblock/587/2391gn7hzcl1edfxot58gn3ig5ca0mru.pdf>. – Дата доступа: 27.03.2023.
12. Ограничитель скорости [Электронный ресурс]: Руководство по эксплуатации ThyssenKrupp. Режим доступа: http://liftlift.ru/images/tovar/rukovodstvo_po_ekspluatcii_ogranichitelya_skorosti.pdf. Дата доступа: 23.05.2023.
13. Device Against Unintended Car Movement. 1020.77.00.000 [Electronic Resource]: EU – Type Examination Certificate – Amendment 2 № 3168/1/2019-3. Publ. date 16.12.2019. Mode of access: <https://www.liftmach.by/upload/iblock/Amendment%202%203168-1-2019-3.pdf>. Date of access: 11.05.2023.
14. Device for Pulley Blocking [Electronic resource]: Patent No EA 201700417 (A1) / V. F. Komoza, O. A. Dobrinovich, S. V. Pavlov, I. N. Balabanov. Publ. date 31.01.2019. Mode of access: https://ru.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=20190131&DB=&locale=ru_RU&CC=EA&NR=201700417A1&KC=A1&ND=4. Date of access: 11.04.2023.
15. Лифт пассажирский [Электронный ресурс]: Дополнение к руководству по эксплуатации ФБир.483310.001 ДРЭ12. Режим доступа: <https://www.liftmach.by/upload/iblock/%D0%A4%D0%91%D0%98%D0%A0.483310.001%20%D0%94%D0%A0%D0%AD%2012.pdf>. Дата доступа: 11.04.2023.

16. О причинах аварий и травматизма [Электронный ресурс]: Письмо № 00-07-06/21 от 14.01.2019. Руководителям территориальных управлений Ростехнадзора. Режим доступа: <https://nkprom.ru/upload/priказы/%D0%9F%D0%B8%D1%81%D1%8C%D0%BC%D0%BE%20%D0%90%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7%20%D0%B0%D0%B2%D0%B0%D1%80%D0%B8%D0%B9%20%D0%BF%D0%BE%20%D0%9B%D0%98%D0%A4%D0%A2%D0%90%D0%9C.pdf>. Дата доступа: 26.05.2023.
 17. Анализ причин аварийности при эксплуатации лифтов, подъемных платформ для инвалидов, пассажирских конвейеров (движущихся пешеходных дорожек) и эскалаторов, за исключением эскалаторов в метрополитенах в 2021 году [Электронный ресурс] / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору Ростехнадзор. Северо-западное управление. Режим доступа: <http://szap.gosnadzor.ru/activity/control/analiz-prichin-avariynosti.php>. Дата доступа: 26.05.2023.
 18. Lift [Electronic Resource]: Pat. EA 201800330 (A1) / С. А. Дондик, И. Н. Балабанов, А. В. Куцеполенко, В. Ф. Козмо. Publ. date 29.11.2019. Mode of access: https://ru.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=20191129&DB=&locale=ru_RU&CC=EA&NR=201800330A1&KC=A1&ND=4. Date of access: 11.04.2023.
 19. Разработка центробежного двухстороннего ограничителя скорости лифта и оптимизация его выходных характеристик на основании анализа влияния сил трения в звеньях механизма / А. В. Куцеполенко [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения. 2021. Т. 10. С. 107–115.
 20. Двухсторонний ограничитель скорости: полез. модель ВУ 12899 / А. В. Куцеполенко, М. Э. Подымако, С. А. Дондик, Г. С. Сеницын, К. Н. Князев. Оpubl. 30.06.2022.
 21. Куцеполенко, А. В. Современные направления развития конструкций центробежных ограничителей скорости лифтов / А. В. Куцеполенко, М. Э. Подымако, Е. С. Лустенкова // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 20–21 апреля 2023 года. Могилев: Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 2023. С. 86–87.
- Поступила 20.06.2023
Подписана в печать 25.08.2023
Опубликована онлайн 30.11.2023

REFERENCES

1. State Standard 27.310–95. *Reliability in Technology. Analysis of Failure Modes, Consequences and Criticality. Basic Provisions*. Minsk, Gosstandart Publ., 1995. 13 (in Russian).
2. State Standard ISO 14798–2017. *Elevators, Escalators and Passenger Conveyors. Risk Assessment and Mitigation Methodology*. Minsk, Gosstandart Publ., 2017. 32 (in Russian).
3. Komoza V. F., Dobrinovich O. A., Pavlov S. V., Gusev D. N. (2019) *Speed Limiting Device*. Patent No EA 033019 (B1). Available at: https://ru.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=20190830&DB=EPODOC&locale=ru_RU&CC=EA&NR=033019B1&KC=B1&ND=6 (accessed 25 April 2023).
4. Pavlov S. V., Balabanov I. N., Nepsha D. V., Starovoytov A. S. (2021) *Double-Acting Safety Catcher Activation Mechanism*. Patent no. EA 202000184 (A1) (in Russian).
5. Nepsha D. V., Klochkov V. N., Sobolev M. V. (2021) Parameters of Contact-Force Interaction Between Elements of the Progressive Safety Gear During an Emergency Braking Stop. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo Universiteta* [Bulletin of Belarusian-Russian University], (4), 45–55 (in Russian). https://doi.org/10.53078/20778481_2021_4_45.
6. *Speed Limiter OSM-305: Operation Manual 1020BK.17.00.000 RE*. Available at: <https://liftmach.by/upload/iblock/1020BK.17.00.000%20PЭ.pdf> (accessed 24 April 2023) (in Russian).
7. Arkhangelsky G. G., Volkov D. P., Gorbunov E. A., Ionov A. A., Tkachenko V. Ya., Chutchnikov P. I. (2010) *Elevators*. Moscow, Publishing House of Association of Building Universities. 576 (in Russian).
8. Gervall. JSC “Gervall-Rus”. *Catalog*. Available at: https://gervall.ru/upload/files/ogran_skorosti/UCM.pdf (accessed 06 April 2023).
9. *Speed Limiters. Gervall*. Available at: https://gervall.ru/upload/files/ogran_skorosti/%D0%9E%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%87%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B8%20%D1%81%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8.pdf (accessed 06 April 2023) (in Russian).
10. Dynatech. *Overspeed Governor. Vega: INSTRUCTIONS: VEGA Cod: DYN 35.1.15*. Publ. date 14.12.2022 Available at: <https://www.dynatech-elevation.com/documentos/articulos/Reducido%20VEGA-ING.pdf> (Accessed 07 April 2023).
11. Gervall. *Speed Limiters ALJO 2129 Ø 200 and ALJO 2130 Ø 300 Stopping and Holding the Cabin During Descent and Ascent: Operation Manual. Technical Description. Installation Instructions. VERSION 2014 DT-2129-2130-RU-00 RU*. Available at: <https://gervall.ru/upload/iblock/587/239lgn7hzcl1edfxot58gn3ig5ca0mru.pdf> (Accessed 27 March 2023) (in Russian).
12. *Speed Limiter: ThyssenKrupp Operation Manual*. Available at: http://liftlift.ru/images/tovar/rukovodstvo_po_eksploatacii_ogranichitelya_skorosti.pdf (accessed 23 May 2023) (in Russian).
13. *Device Against Unintended Car Movement. 1020.77.00.000. EU – Type Examination Certificate – Amendment 2 No 3168/1/2019-3*. Publ. date 16.12.2019. Available at: <https://www.liftmach.by/upload/iblock/Amendment%20%203168-1-2019-3.pdf> (accessed 11 May 2023).
14. Komoza V. F., Lobrinovich O. A., Pavlov S. V., Balabanov I. N. (2019) *Device for Pulley Blocking*. Patent

- No EA 201700417 (A1). Available at: https://ru.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=20190131&DB=&locale=ru_RU&CC=EA&NR=201700417A1&KC=A1&ND=4 (accessed 11 April 2023).
15. *Passenger Elevator: Addendum to Manual for Operation of FBIR 483310.001 DRE 12*. Available at: <https://www.liftmach.by/upload/iblock/%D0%A4%D0%91%D0%98%D0%A0.483310.001%20%D0%94%D0%A0%D0%AD%2012.pdf> (accessed 11 April 2023) (in Russian).
 16. *About the Causes of Accidents and Injuries: Letter No 00-07-06/21 dated 14.01.2019 to the Heads of Territorial Departments of Rostekhnadzor*. – Available at: <https://nkprom.ru/upload/prikazy/%D0%9F%D0%B8%D1%81%D1%8C%D0%BC%D0%BE%20%D0%90%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7%20%D0%B0%D0%B2%D0%B0%D1%80%D0%B8%D0%B9%20%D0%BF%D0%BE%20%D0%9B%D0%98%D0%A4%D0%A2%D0%90%D0%9C.pdf> (accessed 26 May 2023) (in Russian).
 17. *Analysis of the causes of Accidents during the Operation of Elevators, Lifting Platforms for the Disabled, Passenger Conveyors (Moving Walkways) and Escalators, with the Exception of Escalators in Subways in 2021*. Available at: <http://szap.gosnadzor.ru/activity/control/analiz-prichin-avariynosti.php> (accessed 26 May 2023) (in Russian).
 18. Dondik S. A., Balabanov I. N., Kutsepoleenko A. V., Komoza V. F. (2019) *Lift*. Patent No EA 201800330 (A1). Available at: https://ru.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=20191129&DB=&locale=ru_RU&CC=EA&NR=201800330A1&KC=A1&ND=4 (accessed 11 April 2023).
 19. Kutsepoleenko A. V., Podymako M. E., Knyazev K. N., Sinitsyn G. S., Dalimaev V. A. (2021) Development of a Centrifugal Double-Sided Elevator Speed Limiter and Optimization of its Output Characteristics Based on an Analysis of the Influence of Friction Forces in the Mechanism Links. *Aktualnye Voprosy Mashinostroeniya* [Current Issues in Mechanical Engineering], 10, 107–115 (in Russian).
 20. Kutsepoleenko A. V., Podymako M. E., Dondik S. A., Sinitsyn G. S., Knyazev K. N. (2022) *Double-Sided Speed Limiter*. Useful Model No BY 12899 (in Russian).
 21. Kutsepoleenko A. V., Podymako M. E., Lustenkova E. S. (2023) Modern Directions of Design Development of Centrifugal Speed Limiters for Elevators. *Materialy, Oborudovanie i Resursosberegayushchie Tekhnologii: Materialy Mezhdunarodnoi Nauch.-Tekhn. Konf., Mogilev, 20–21 Aprelya 2023 goda* [Materials, Equipment and Resource-Saving Technologies: Proceedings of International Scientific and Technical Conference, Mogilev, April 20–21, 2023]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 86–87 (in Russian).

Received: 20.06.2023

Accepted: 25.08.2023

Published online: 30.11.2023

Исследование динамики параметров обработки на режимах твердого точения

Кандидаты техн. наук, доценты А. И. Пронин¹⁾, В. В. Мыльников²⁾,
студенты Д. А. Валько¹⁾, А. С. Севрюков¹⁾

¹⁾Комсомольский-на-Амуре государственный университет (Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация),

²⁾Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (Нижний Новгород, Российская Федерация)

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

Реферат. Одним из видов финишных операций механической обработки поверхности изделий из металлических материалов является твердое точение, которое осуществляется на повышенных режимах токарной обработки. При обработке сталей, закаленных на высокую твердость, на режимах обработки с проявлением всех особенностей, характеризующих твердое точение, выделяется много теплоты, которая в процессе токарной обработки переходит в стружку. При этом значения силы резания уменьшаются, что связано с разупрочнением активных поверхностных слоев обрабатываемого материала и его последующей пластификацией. Это приводит к уменьшению сил резания в зоне контакта. Существенный интерес как с научной, так и с практической точек зрения вызывает вопрос изменения температуры резания и параметров обработки на режимах твердого точения. В статье представлены экспериментальные результаты исследований и эмпирические зависимости радиальной составляющей силы и температуры резания от скорости резания и подачи на оборот при фиксированной глубине резания на режимах твердого точения закаленной стали. Исследования проводили на специально сконструированной для этих целей экспериментальной установке, состоящей из токарного станка и стенда для регистрации, контроля и анализа динамических процессов (в виде сигнала от резца) при проведении токарной обработки. В качестве испытуемого инструмента использовали резец со сменными режущими пластинами из керамики, а материалом заготовок для проведения исследований была сталь ХВГ, подвергнутая термической обработке на категорию твердости 55 HRC. Произведена компьютерная и математическая обработка методом наименьших квадратов полученных результатов, которая позволила вывести расчетные формулы для определения значений исследуемых факторов. Определены оптимальные значения факторов, соответствующие минимальному значению радиальной составляющей силы и температуре резания.

Ключевые слова: резец, твердое точение, сила резания, скорость резания, температура резания, подача резания, режущая керамика, закаленная сталь

Для цитирования: Исследование динамики параметров обработки на режимах твердого точения / А. И. Пронин [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 6. С. 470–476. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-470-476>

Investigation of the Dynamics of Processing Parameters in Hard Turning Modes

A. I. Pronin¹⁾, V. V. Mylnikov²⁾, D. A. Valko¹⁾, A. S. Sevryukov¹⁾

¹⁾Komsomolsk-on-Amur State University (Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation),

²⁾Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (Nizhny Novgorod, Russian Federation)

Abstract. One of the types of finishing operations of machining the surface of products made of metal materials is hard turning, which is carried out at elevated turning modes. When processing steels hardened to high hardness, in processing modes with the manifestation of all the features characterizing hard turning, a lot of heat is released, which turns into chips during turning, while the values of the cutting force decrease, which is associated with the softening of the active surface

Адрес для переписки

Пронин Александр Иннокентьевич
Комсомольский-на-Амуре государственный университет
пр. Ленина, 27,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация
Тел.: +7 4217 24-11-35
mdsov@knastu.ru

Address for correspondence

Pronin Alexander I.
Komsomolsk-on-Amur State University
27, Lenina Ave.,
681013, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation
Тел.: +7 4217 24-11-35
mdsov@knastu.ru

layers of the processed material and its subsequent plasticization, which leads to a decrease in cutting forces in the contact zone. A significant interest both from a scientific and practical point of view is the issue of changing the cutting temperature and processing parameters in hard turning modes. The paper presents experimental research results and empirical dependences of the radial component of the cutting force and temperature on cutting speed and feed per revolution, at a fixed cutting depth in the modes of hard turning of hardened steel. The research has been carried out on an experimental installation specially designed for this purpose, consisting of a lathe and a stand for recording, monitoring and analyzing dynamic processes (in the form of a signal from the cutter) during turning. A cutter with replaceable ceramic cutting plates was used as a test tool, and the material of the workpieces for the research was HVG steel, subjected to heat treatment for a hardness category of 55 HRC. Computer and mathematical processing of the results obtained using the least squares method was carried out, which allowed us to derive calculation formulas for determining the values of the studied factors. The optimal values of the factors corresponding to the minimum value of the radial component of the force and the cutting temperature are determined.

Keywords: cutter, hard turning, cutting force, cutting speed, cutting temperature, cutting feed, cutting ceramics, hardened steel

For citation: Pronin A. I., Mylnikov V. V., Valko D. A., Sevryukov A. S. (2023) Investigation of the Dynamics of Processing Parameters in Hard Turning Modes. *Science and Technique*. 22 (6). 470–476. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-470-476> (in Russian)

Введение

Наилучшая результативность механической обработки деталей машин и изделий с достижением минимальной себестоимости и максимального экономического эффекта на производстве может быть получена лишь при условии оптимальных соотношений технологического процесса в конкретно заданных условиях обработки [1–5]. Выбор предпочтительных параметров и выявление диапазонов их значений с результативными комплексными показателями эффективности механической обработки материалов является одной из приоритетных задач решения параметрической оптимизации технологических процессов. Особая актуальность таких задач выходит на передний план при оптимизации параметров новых технологических процессов на финишных особо ответственных операциях обработки тяжело обрабатываемых сплавов (например, закаленных и нержавеющей сталей) и современных малоизученных материалов нового поколения [6–10].

К одному из видов финишных операций механической обработки поверхности изделий из металлических материалов можно отнести твердое точение. Твердое точение осуществляется на повышенных режимах токарной обработки. При обработке сталей, закаленных на высокую твердость, на режимах обработки с проявлением всех особенностей, характеризующих твердое точение, выделяется много теплоты, которая в процессе токарной обработки переходит в стружку. При этом значения

силы резания уменьшаются, что связано с разупрочнением активных поверхностных слоев обрабатываемого материала и его последующей пластификацией. Это приводит к уменьшению сил резания в зоне контакта. Процесс пластического деформирования поверхности материала обрабатываемой заготовки при твердом точении проходит с высокой скоростью, где наблюдается адиабатический разогрев в зоне резания. При этом максимум теплового потока переходит в стружки, вследствие этого по температуре стружки можно оценивать температуру резания.

В проведенных нами исследованиях, которые опубликованы в работах [11–12], были экспериментально определены режимы твердого точения, на которых обрабатывающий инструмент показал приемлемую по длительности работы стойкость при обеспечении шероховатости, соответствующей чистому шлифованию, при обработке снаружи цилиндрических деталей. В работе [11] определены силы резания на режимах обработки, характеризующих твердое точение, и выявлены наиболее оптимальные режимы. Однако существенный интерес с точки зрения как научной составляющей, так и практической вызывает вопрос изменения температуры резания и динамики изменений параметров обработки на режимах твердого точения.

Решением задач определения оптимальных параметров при токарной обработке занимается большое количество научных коллективов, но обычно исследования не проводят в областях обработки на режимах, характеризующих твер-

дое точение. Например, в [13] исследования выполнены для обычных скоростей. Обработка полученных результатов позволила связать константу температуры резания с некоторыми точками, определяющими минимальную относительную интенсивность изнашивания. Поэтому представляется актуальным исследование динамики параметров обработки на режимах твердого точения.

Цель работы – экспериментально определить особенности динамики изменения силы и температуры резания и выявить значения этих параметров соответствующим режимам, при которых наблюдаются признаки твердого точения.

Выбор факторов эксперимента

Предварительный анализ режимов токарной обработки позволил определить наиболее значимые факторы, оказывающие существенное влияние на силу и температуру резания, тем самым значительно сократить временные затраты в реализации поставленной в данной работе цели. В общем случае на исследуемые параметры оказывают влияние следующие группы факторов:

- 1) геометрические размеры применяемых режущих пластин;
- 2) износ режущего инструмента;
- 3) основные параметры режимов токарной обработки;
- 4) твердость материала, по которому производили процесс резания.

В исследовании для решения задач, поставленных в данной работе:

1) использовали пластины, массово производимые в соответствии с ГОСТ заводом-изготовителем, где геометрические размеры являются стандартизированными, т.е. на результаты в данном исследовании влияния не оказывают;

2) износ тоже принят постоянным, так как испытания проводили на режимах твердого точения, которые относятся к чистовой обработке резанием, призванной заменить шлифование, характеризуемой минимальным срезом обрабатываемого высокотвердого материала на больших скоростях резания. Кроме того, в настоящем исследовании для полного исключения влияния износа на динамику изменения силы и температуры резания в процессе твердого то-

чения до минимума сокращено время контакта режущей поверхности пластины с поверхностью заготовки;

3) исходя из опыта ранее выполненных работ в качестве контролируемых параметров выбраны скорости подачи и резания при фиксированной глубине резания;

4) заготовки, по которым проводили точение, поставлялись после термической обработки на высокую твердость, контроль которой показал допустимый разброс значений, в итоге была принята твердость как постоянный фактор, не влияющий на результаты данного исследования.

С целью обеспечения необходимой идентичности условий и достоверности получаемых результатов измерение значений исследуемых факторов производили на одинаковых диаметрах заготовок.

Методика проведения исследования

Исследования проводили на специально сконструированной для этих целей экспериментальной установке, состоящей из токарного станка марки 16K20Ф3С32 и стенда STD.201-2 для регистрации, контроля и анализа динамических процессов (в виде сигнала от резца), при проведении токарной обработки. Динамометр, смонтированный в конструкции данного стенда, служит для замера составляющих силы резания (F_x – осевая; F_y – радиальная; F_z – тангенциальная) и имеет измерительный преобразователь, передающий сигналы динамических нагрузок на блок управления. Данный блок используется в качестве платы сбора данных электросигналов с датчиков STD 201-2 и форматирует в high-speed USB 2.0 с последующей передачей на порт USB ПЭВМ.

В качестве испытуемого инструмента использовали резец со сменными режущими пластинами, имеющими следующие размеры: $\gamma = -8^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $\lambda = 5^\circ$, сечение державки резца 20×20 мм.

Материалом исследуемых пластин являлась режущая керамика BOK-60, в составе которой 70 % Al_2O_3 + 30 % TiC по ГОСТ 25003–81 ($l = 16,5$ мм; $s = 4,76$ мм; $r = 0,8$ мм; теплопроводность $\lambda_p = 35,0$ Вт/(м·°С)).

В качестве материала заготовок для проведения исследований была использована

сталь ХВГ, подвергнутая термической обработке на категорию твердости 55 HRC в соответствии с ГОСТ 4543–71 ($D = 110$ мм; $L = 350$ мм). Инструмент из данной низколегированной стали используется для производства и контроля точности размеров деталей и узлов машин, где недопустимы даже малейшие потери изначальной формы при закалке во время термической обработки (например, коробление).

Интервалы скоростей подачи и резания для обработки заготовки из стали ХВГ выбраны на основе экспериментальных результатов в ходе работ по твердой обработке сталей, закаленных на высокую твердость [1–3].

Последовательность этапов эксперимента следующая:

1) заготовку устанавливали и зажимали в патроне станка 16К20Ф3С32;

2) перед каждым экспериментом заменяли режущую кромку пластины с целью снижения влияния ее износа на экспериментальные значения;

3) проводили измерения силы и температуры резания, для этого использовали динамометр и пирометр Testo 835-T2.

Результаты экспериментов

Результаты исследования, представленные в работах [5–8], позволили установить, что изменение режимов резания наибольшее влияние оказывает на радиальную составляющую силы резания. Поэтому в представленной работе исследовали динамику изменения радиальной составляющей силы резания F_y в связи с температурой резания T . Проводили четыре серии экспериментов с фиксированной глубиной резания и с увеличением скорости на 60 м/мин при заданной скорости подачи, определяли при этом значения силы F_y и температуры T . В каждой серии было по четыре этапа исследований с одинаковым приращением на пяти скоростях резания.

Экспериментально полученные данные сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты эксперимента

Results of the experiment

Номер серии эксперимента	Режимы резания			Результаты эксперимента	
	Глубина резания t , мм	Скорость подачи S , мм/об	Скорость резания v , м/мин	Радиальная составляющая силы резания F_y , Н	Температура T , °C
1	0,2	0,07	320	136	980
			380	115	1010
			440	102	1041
			500	105	1068
			560	141	1092
2	0,2	0,14	320	167	1061
			380	142	1099
			440	125	1131
			500	138	1160
			560	158	1187
3	0,2	0,21	320	238	1114
			380	187	1153
			440	178	1188
			500	184	1218
			560	213	1261
4	0,2	0,28	320	279	1153
			380	228	1194
			440	185	1229
			500	225	1261
			560	276	1265

При проведении первой серии исследований с минимальной подачей, составляющей 0,07 об/мин, с увеличением скорости резания с приростом на одинаковое значение, составляющее 60 м/мин на каждом этапе эксперимента, наблюдали немонотонное изменение как температуры, так и силы F_y . Повышение скорости с 320 до 380 м/мин приводит к самому большому росту температуры из всех проведенных этапов исследований, при этом наблюдали резкое снижение значения силы F_y , составившей минус 21 Н.

Увеличение скорости до 440 м/мин приводит к последующему снижению силы F_y до 102 Н с продолжающимся ростом температуры. Необходимо отметить, что на данном этапе зафиксированы минимальное значение силы F_y и минимальное изменение температуры в абсолютном приращении.

Дальнейшее повышение скорости с 440 до 500 м/мин показывает кардинальный поворот в динамике изменения силы F_y – наблюдается экстремум на этом этапе исследования, характер изменения демонстрирует последующий прирост значений силы F_y до 105 Н, при этом продолжает расти температура до 1068 °С.

При максимальной скорости проводимых исследований (560 м/мин) зафиксированы максимальные значения силы F_y и температуры T . При этом зафиксирован достаточно резкий скачок в росте силы F_y .

Во второй серии экспериментов с увеличенной скоростью подачи до 0,14 об/мин наблюдается самое большое значение силы F_y при минимальной скорости резания и минимальная температура из всего скоростного диапазона этой серии экспериментов. В дальнейшем снижение силы F_y до скорости 440 м/мин и последующее повышение происходят без каких-либо скачков и выпадов. Прирост температуры на каждом скоростном этапе исследования монотонно незначительно снижается при общем ее увеличении. Так, повышение скорости испытания с 320 до 380 м/мин привело к возрастанию температуры на 38 °С, а на высокоскоростном этапе испытания с 500 до 560 м/мин только на 27 °С.

При испытаниях в третьей экспериментальной серии скорость подачи составляла 0,21 об/мин. При самой низкой скорости испытания получи-

ли очень высокие значения силы F_y . Увеличение скорости на 60 м/мин (до 380 м/мин) привело к резкому снижению силы F_y , но при этом наблюдали увеличенный прирост температуры в сравнении с приростом на следующих этапах испытаний данной серии эксперимента.

В скоростном диапазоне 380–500 м/мин наблюдаются стабилизация изменений значений силы резания F_y с размахом в 10 Н и стабильное повышение температуры порядка 30 °С за каждые 60 м/мин роста скорости.

Дальнейшее увеличение скорости резания до 560 м/мин приводит к ускоренному возрастанию и температуры T , и радиальной составляющей силы резания F_y .

Четвертая серия экспериментов показала самую стабильную динамику изменений исследуемых факторов при изменении скорости резания в заданном диапазоне и максимальной скорости подачи проведенных опытов. На каждом этапе увеличения скорости на 60 м/мин наблюдали равномерное снижение силы F_y до минимума (185 Н) при 440 м/мин, а затем равномерный рост, причем увеличение скорости на последнем этапе до максимума привело к росту значения силы F_y на 51 Н, что полностью совпало со значением, только противоположным по знаку, при уменьшении данной силы в диапазоне скоростей с 320 до 380 м/мин.

Рост температуры T на протяжении всей четвертой серии экспериментов проходил равномерно в среднем чуть более 30 °С за каждое возрастание скорости на 60 м/мин.

Обработка экспериментальных результатов

Полученные результаты (табл. 1) подвергли компьютерной обработке, для этого применили программу Microsoft Office Excel, в которой выполнили графическое построение полученных зависимостей силы F_y и температуры T , представленных на рис. 1 и 2.

На рис. 1 изображены полученные в ходе экспериментов зависимости T и силы F_y от S . Видно, что с увеличением S возрастает F_y и, следовательно, количество выделяющейся теплоты. При $v = 440$ м/мин наблюдается самое минимальное увеличение F_y , значение T продолжает возрастать. Сила F_y растет медленнее по сравнению с ростом подачи, вследствие

чего прирост теплоты отстает от роста подачи. С увеличением S температура T изменяется незначительно.

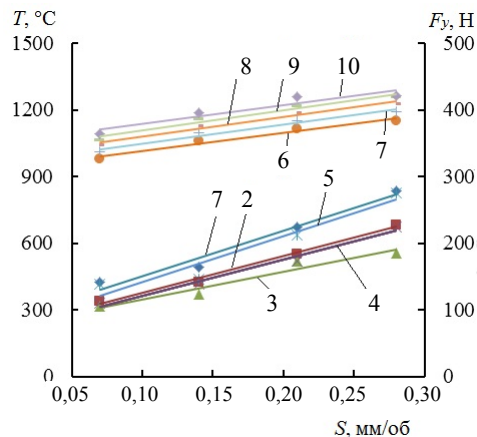


Рис. 1. Зависимости T и F_y от S : 1, 6 – $v = 320$ м/мин; 2, 7 – 380; 3, 8 – 440; 4, 9 – 500; 5, 10 – 560 м/мин

Fig. 1. Dependences of T and F_y on S : 1, 6 – $v = 320$ m/min; 2, 7 – 380; 3, 8 – 440; 4, 9 – 500; 5, 10 – 560 m/min

На рис. 2 изображены полученные в ходе экспериментов зависимости T и F_y от v (рис. 2).

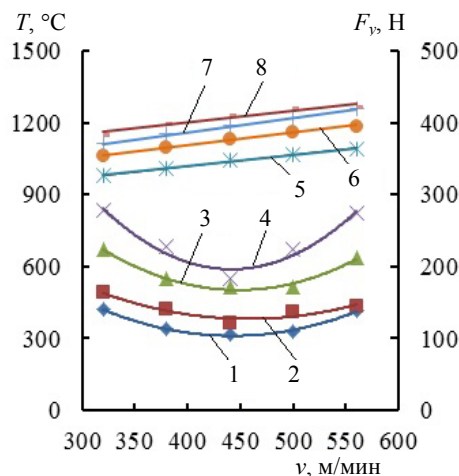


Рис. 2. Зависимости T и F_y от v резания: 1, 5 – $S = 0,07$ мм/об; 2, 6 – 0,14; 3, 7 – 0,21; 4, 8 – 0,28 мм/об

Fig. 2. Dependences of T and F_y on cutting v : 1, 5 – $S = 0.07$ mm/rev; 2, 6 – 0,14; 3, 7 – 0,21; 4, 8 – 0,28 mm/rev

Из полученных зависимостей видно, что с увеличением v в диапазоне от 320 до 440 м/мин F_y уменьшается и, следовательно, снижается мощность резания. Затем наблюдается рост F_y , из чего следует увеличение мощности резания.

С повышением v возрастает количество выделяющейся теплоты, которая в основном уносится стружкой и немного резцом. Унос теплоты стружкой тоже возрастает с увеличением v , поэтому не наблюдается линейной зависимости T от v .

На основе полученных результатов экспериментальных данных и построенных графиков производили их математическую обработку, используя метод наименьших квадратов. Это позволило вывести расчетные формулы для определения значений исследуемых факторов, которые для простоты восприятия оформили в виде соответствующих табл. 2, 3.

Таблица 2

Расчетные формулы для определения T и F_y

Calculation formulas for determining T and F_y

Режим резания		Формула для определения T , °C	Формула для определения F_y , Н
t , мм	v , м/мин		
0,2	320	$T = 817S + 734$	$F_y = 667S + 84$
	380	$T = 865S + 963$	$F_y = 553S + 70$
	440	$T = 887S + 992$	$F_y = 414S + 74$
	500	$T = 910S + 1018$	$F_y = 543S + 67$
	560	$T = 847S + 1053$	$F_y = 687S + 73$

Таблица 3

Расчетные формулы для определения T и F_y

Calculation formulas for determining T and F_y

Режим резания		Формула для определения T , °C	Формула для определения F_y , Н
t , мм	S , мм/об		
0,2	0,07	$T = 0,48v + 828$	$F_y = 0,0024v^2 - 2,16v + 581$
	0,14	$T = 0,53v + 893$	$F_y = 0,002v^2 - 1,74v + 526$
	0,21	$T = 0,6v + 921$	$F_y = 0,003v^2 - 3,08v + 856$
	0,28	$T = 0,49v + 1004$	$F_y = 0,006v^2 - 5,04v + 1310$

ВЫВОДЫ

1. С увеличением скорости подачи при фиксированной глубине резания наблюдается возрастание температуры, при этом наименьший ее прирост за каждый этап увеличения скорости резания на 60 м/мин происходит в сериях экспериментов с малыми скоростями подачи.

2. Минимальные значения силы F_y при всех исследованных скоростях подачи получили при скорости резания 440 м/мин на каждой серии эксперимента, которые графически показаны в виде экстремумов.

3. Результаты испытаний показали снижение величины силы F_y во всех четырех сериях проведенных экспериментов в диапазоне скоростей резания с 320 до 440 м/мин, а с 440 до 560 м/мин – ее увеличение. При этом установлено, что испытания при $S = 0,21$ в третьей серии экспериментов выявили протяженный скоростной диапазон резания (380–500 м/мин), на котором сила F_y изменяется незначительно (в пределах 5 %).

4. Получена зависимости F_y и T от параметров обработки на режимах твердого точения, и выявлена динамика их изменения, что позволило определить значения скорости подачи и резания, обеспечивающие минимальное значение F_y и соответствующую ему T .

ЛИТЕРАТУРА

- Stephenson, D. A. Metal Cutting Theory and Practice / D. A. Stephenson, J. S. Agapiou. CRC Press, 2018. 864 p. <https://doi.org/10.1201/9781315373119>.
- Ashley, S. High – Speed Machining Goes Mainstream / S. Ashley // Mechanical Engineering. 1995. Vol. 117, No 5. P. 56–61.
- Боровский, Г. В. Современные технологии обработки материалов / Г. В. Боровский, С. Н. Григорьев, А. Р. Маслов. М.: Машиностроение, 2015. 304 с.
- Plaza, M. The prons and cons of High-Speed Machining / M. Plaza // Canadian Machinery and Metalworking. Sep. 1995. P. 8–10.
- Schulz, H. High – Speed Machining / H. Schulz, T. Moriwaki // CIRP Annals. 1992. T. 41, No 2. P. 637–642. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)63250-8](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)63250-8).
- Грубый, С. В. Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами / С. В. Грубый. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 149 с.
- Плотников, А. Л. Управление режимами резания на токарных станках с ЧПУ: монография / А. Л. Плотников, А. О. Таубе. Волгоград: РПК «Политехник», 2003. 184 с.
- Plasty, J. High – Speed Machining / J. Plasty // CIRP Annals. 1993. T. 42, No 2. P. 733–738. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)62536-0](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)62536-0).
- Енек, М. Влияние состава покрытия инструментальных пластин методом PVD на шероховатость поверхности при точении / М. Енек, В. И. Серебряков, Л. Э. Шварцбург // Технология машиностроения. 2010. № 8. С. 25–28.
- Подураев, В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В. Н. Подураев. М.: Высш. шк., 1974. 587 с.
- Pronin, A. I. Application of Orthogonal Central Composition Planning of Experiments to Optimize the Turning of KHVГ-Hardened Steel by Cutting Ceramics / A. I. Pro-

- nin, V. V. Myl'nikov, A. D. Romanov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2018. Vol. 47, No 1. P. 112–120. <https://doi.org/10.3103/s1052618818010132>.
- Пронин, А. И. Исследование температуры резания при токарной обработке закаленных сталей, применяемых для изготовления деталей морских судов / А. И. Пронин, В. В. Мыльников, Д. А. Валько, И. С. Синецын // Морские интеллектуальные технологии. 2021. Т. 2, No 2. С. 42–46. <https://doi.org/10.37220/mit.2021.52.2.050>.
- Макаров, А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.

Поступила 15.04.2022

Подписана в печать 10.01.2023

Опубликована онлайн 30.11.2023

ЛИТЕРАТУРА

- Stephenson D. A., Agapiou J. S. (2018) *Metal Cutting Theory and Practice*. CRC Press. 864. <https://doi.org/10.1201/9781315373119>.
- Ashley S. (1995) High – Speed Machining Goes Mainstream. *Mechanical Engineering*, 117 (5), 56–61.
- Borovsky G. V., Grigoriev S. N., Maslov A. R. (2015) *Modern Materials Processing Technologies*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 304 (in Russian).
- Plaza M. (1995) The Prons and cons of High-Speed Machining. *Canadian Machinery and Metalworking*, Sep., 8–10.
- Schulz H., Moriwaki T. (1992) High – Speed Machining. *CIRP Annals*, 41 (2), 637–642. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)63250-8](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)63250-8).
- Gruby S. V. (2014) *Optimization of the Machining Process and Control of Operating Parameters*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publishing House. 149 (in Russian).
- Plotnikov A. L., Taube A. O. (2003) *Control of Cutting Modes on Lathes with Numerical Control*. Volgograd, Polytekhnik Publ. 184 (in Russian).
- Plasty J. (1993) High – Speed Machining. *CIRP Annals*, 42 (2), 733–738. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)62536-0](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)62536-0).
- Enek M., Serebryakov V. I., Shvartsburg L. E. (2010) Influence of the Coating Composition of Tool Inserts Using PVD Method on Surface Roughness During Turning. *Tekhnologiya Mashinostroeniya* [Mechanical Engineering Technology], (8), 25–28 (in Russian).
- Poduraev V. N. (1974) *Cutting of Difficult-to-Cut Materials*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 587 (in Russian).
- Pronin A. I., Myl'nikov V. V., Romanov A. D. (2018) Application of Orthogonal Central Composition Planning of Experiments to Optimize the Turning of KHVГ-Hardened Steel by Cutting Ceramics. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 47 (1), 112–120. <https://doi.org/10.3103/s1052618818010132>.
- Pronin A. I., Myl'nikov V. V., Valko D. A., Sinitsyn I. S. (2021) A Study of the Cutting Temperature during Turning of Hardened Steels used for the Manufacture of Marine Parts. *Morskie Intellektualnye Tekhnologii = Marine Intellectual Technologies*, 2 (2), 42–46 (in Russian). <https://doi.org/10.37220/mit.2021.52.2.050>.
- Makarov A. D. (1976) *Optimization of Cutting Processes*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 278 (in Russian).

Received: 15.04.2022

Accepted: 10.01.2023

Published online: 30.11.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-477-486>

УДК 621.923

Обеспечение равномерности съема припуска при магнитно-абразивной финишной обработке полупроводниковых пластин за счет управления режимами процесса обработки

Докт. техн. наук Д. А. Степаненко¹⁾, асп. Е. С. Еромин¹⁾

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

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

Реферат. В статье описана методика решения прямых и обратных задач моделирования процесса магнитно-абразивной финишной обработки (МАФО) полупроводниковых пластин. Решение прямой задачи позволяет производить расчет функции съема припуска при заданных параметрах обработки, а решение обратной задачи – расчет значений параметров обработки, требуемых для реализации заданной функции съема припуска. Прямая задача решается на основе уравнения Престона, обычно используемого для описания скорости съема припуска при полировании оптических деталей. Обратная задача рассматривается в матричной формулировке, а ее решение в смысле наименьших квадратов определяется с помощью обобщенной обратной матрицы Мура–Пенроуза. На основе решения прямой задачи с постоянными значениями кинематических и магнитных параметров обработки показано, что МАФО при постоянных значениях параметров не обеспечивает равномерности съема припуска. На основе численных примеров показано, что близкий к равномерному съем припуска может быть обеспечен за счет управления магнитными параметрами обработки, закон изменения которых определяется путем решения обратной задачи. Показано, что гладкость решения исходной плохо обусловленной обратной задачи может быть повышена путем ее регуляризации, по Тихонову, что, в свою очередь, технически упрощает управление параметрами обработки.

Ключевые слова: магнитно-абразивная финишная обработка; полупроводниковые пластины; равномерность съема припуска; уравнение Престона; плохо обусловленные обратные задачи; регуляризация, по Тихонову

Для цитирования: Степаненко, Д. А. Обеспечение равномерности съема припуска при магнитно-абразивной финишной обработке полупроводниковых пластин за счет управления режимами процесса обработки / Д. А. Степаненко, Е. С. Еромин // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 6. С. 477–486. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-477-486>

Ensuring Uniform Material Removal with Magnetic Abrasive Finishing of Semiconductor Wafers by Mode Control of Machining Parameters

D. A. Stepanenko, E. S. Eromin

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

Abstract. The paper describes a solution technique for direct and inverse problems of modeling the process of magnetic abrasive finishing (MAF) of semiconductor wafers. Solution of the direct problem enables calculation of allowance removal

Адрес для переписки

Степаненко Дмитрий Александрович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-91-01
stepd@tut.by

Address for correspondence

Stepanenko Dmitry A.
Belarusian National Technical University
22, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-91-01
stepd@tut.by

function for the prescribed machining parameters, and solution of the inverse problem enables determination of machining parameters required for realization of the prescribed allowance removal function. The direct problem is solved by means of Preston equation, which is usually used for description of material removal rate when polishing optical parts. The inverse problem is considered in a matrix formulation, and its least squares solution is determined by means of generalized inverse Moore-Penrose matrix. Based on the solution of the direct problem with constant values of kinematic and magnetic machining parameters shows that MAF with constant values of machining parameters does not ensure uniformity of material removal. On the basis of numerical examples it is shown that close to uniform material removal can be ensured by control of magnetic machining parameters with the law of variation determined from solution of the inverse problem. It is demonstrated that the smoothness of solution of the initial ill-conditioned inverse problem can be improved by means of Tikhonov's regularization, which in turn technically simplifies control of machining parameters.

Keywords: magnetic abrasive finishing, semiconductor wafers, uniformity of material removal, Preston equation, ill-conditioned inverse problems, Tikhonov's regularization

For citation: Stepanenko D. A., Eromin E. S. (2023) Ensuring Uniform Material Removal with Magnetic Abrasive Finishing of Semiconductor Wafers by Mode Control of Machining Parameters. *Science and Technique*. 22 (6), 477–486. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-477-486> (in Russian)

Введение

Магнитно-абразивная финишная обработка (МАФО) представляет собой способ финишной обработки поверхностей, основанный на создании силы резания путем воздействия магнитного поля на частицы ферро-абразивного (магнитно-абразивного) порошка (ФАП), в качестве которого могут применяться композиционные материалы на основе технического железа (магнитная фаза) и электрокорунда, алмаза или карбидов вольфрама, молибдена, ниобия и титана (абразивная фаза) [1]. Под действием магнитного поля ФАП может приобретать условно связанное состояние с формированием так называемой абразивной щетки, жесткость которой может регулироваться путем изменения характеристик магнитного поля. Таким образом, путем регулировки режимов МАФО можно в зависимости от требований к характеристикам обработанной поверхности реализовать процесс обработки, близкий к обработке свободным или связанным абразивом. При МАФО количество режущих элементов на единицу площади обрабатываемой поверхности значительно выше, чем при традиционном шлифовании, что позволяет в отличие от шлифования обеспечить высокую производительность обработки при малых давлениях на обрабатываемую поверхность, что, в свою очередь, приводит к существенному уменьшению глубины дефектного слоя. Одним из перспективных направлений применения МАФО является обработка пластин из кремния и других полупроводниковых материалов [1, с. 188; 2].

Традиционно финишная обработка кремниевых пластин производится методом химико-

механического полирования (ХМП), основанном на использовании абразивной суспензии, содержащей сильный окислитель, например пероксид водорода [3]. Очевидным недостатком такой технологии является необходимость использования вредных для здоровья человека и окружающей среды химических реактивов.

Важная характеристика поверхностей кремниевых пластин – их шероховатость: среднеарифметическое значение шероховатости Sa по поверхности (двумерное обобщение известного параметра Ra), достижимое с помощью ХМП, составляет 0,4 нм [4]. Как показывают исследования, шероховатость поверхности раздела полупроводниковой подложки и диэлектрического затвора оказывает существенное влияние на подвижность носителей заряда в электронных устройствах типа МДП-транзисторов и соответственно на их работоспособность [5].

Вторая важная характеристика кремниевых пластин, которую требуется обеспечить при их обработке, – общее изменение (отклонение) толщины по пластине TTV (Total Thickness Variation) [6]. Требования к этому параметру становятся все более жесткими с уменьшением размеров элементов микросхем. Предельно достижимый размер элементов микросхемы при фотолитографии обратно пропорционален числовой апертуре используемого объектива, а глубина резкости обратно пропорциональна квадрату числовой апертуры [6]. Как следствие, миниатюризация элементов микросхемы сопровождается значительным уменьшением глубины резкости, что, в свою очередь, приводит к повышенным требованиям к плоскостности пластин, так как отклонения от плоскостно-

сти не должны превышать глубины резкости. Для сверхплоских кремниевых пластин параметр TTV не должен превышать 1 мкм. МАФО способна обеспечивать требуемые для кремниевых пластин значения шероховатости (0,7–2,0 нм по параметру Ra) и минимальную глубину дефектного слоя [1], однако обеспечение равномерного съема припуска (и, как следствие, минимальных отклонений от плоскостности) требует управления скоростью съема припуска и/или продолжительностью контакта инструмента с различными участками поверхности заготовки в зависимости от положения инструмента относительно заготовки. Данная статья посвящена исследованию возможности повышения равномерности съема припуска при МАФО пластин из полупроводниковых материалов за счет управления режимами процесса обработки.

Прямая задача моделирования процесса МАФО

При моделировании съема припуска будем считать, что скорость съема припуска может быть рассчитана по формуле Престона [7, 8]:

$$RR(\rho, \varphi, t) = k \cdot p(\rho, \varphi, \rho_c(t), \varphi_c(t))v(\rho, \varphi, \rho_c(t), \varphi_c(t)), \quad (1)$$

где k – коэффициент, зависящий от условий обработки; $p(\rho, \varphi, \rho_c(t), \varphi_c(t))$ – давление инструмента на обрабатываемую поверхность в точке с координатами (ρ, φ) в момент времени t , соответствующий расположению оси вращения инструмента в точке (ρ_c, φ_c) ; $v(\rho, \varphi, \rho_c(t), \varphi_c(t))$ – скорость движения точки (ρ, φ) относительно инструмента.

Для упрощения модели считаем коэффициент k постоянным и не будем учитывать его в дальнейшем анализе. При моделировании рассматривается кинематика, представляющая собой сочетание вращательного движения заготовки с угловой скоростью Ω , вращательного движения инструмента (полюсного наконечника магнитной системы) с угловой скоростью ω и радиального поступательного движения инструмента со скоростью v_r .

Функция съема припуска может быть определена путем интегрирования уравнения (1)

$$h(\rho, \varphi) = \int_0^T RR(\rho, \varphi, t)dt, \quad (2)$$

где T – общая продолжительность процесса обработки.

Прямая задача моделирования процесса МАФО состоит в определении функции (2) при известной скорости (1) съема припуска и легко решается путем численного интегрирования. Для решения прямой задачи в двумерной постановке введем на поверхности обрабатываемой пластины регулярную сетку точек, лежащих на концентрических окружностях с радиусами $\rho_i = i\Delta\rho$, где $i = 0 \dots N_r$, $\Delta\rho = R/N_r$, R – радиус пластины. В случае равномерного окружного распределения точек с угловым шагом $\Delta\varphi = 2\pi/N_a$ они будут иметь угловые координаты $\varphi_j = j\Delta\varphi$, где $j = 0 \dots N_a - 1$. Если ρ_c – текущее значение радиальной координаты оси вращения инструмента, а φ_c – текущее значение ее угловой координаты, то точка $P_{ij}(\rho_i, \varphi_j)$ поверхности пластины принадлежит области проекции полюсного наконечника при выполнении следующих условий:

$$\rho_c - r \leq \rho_i \leq \rho_c + r; \quad (3)$$

$$\varphi_c - \arcsin(r/\rho_c) \leq \varphi_j \leq \varphi_c + \arcsin(r/\rho_c); \quad (4)$$

$$\rho_c^2 + \rho_i^2 - 2\rho_c\rho_i \cos(\varphi_c - \varphi_j) \leq r^2, \quad (5)$$

где r – радиус полюсного наконечника; $2\arcsin(r/\rho_c)$ – угол охвата зоны обработки.

Условие (5) является достаточным, однако его непосредственная проверка для всего массива точек требует значительных затрат времени на вычисления. В связи с этим вводятся два избыточных условия (3)–(4), позволяющих сузить множество индексов (i, j) , для которых требуется проверка условия (5). В случае $\rho_c(t) \geq r$ проверка (5) проводится для значений индексов, лежащих в следующих диапазонах:

$$\begin{aligned} \text{ceil}((\rho_c - r)/\Delta\rho) \leq i \leq \\ \leq \min(\text{floor}((\rho_c + r)/\Delta\rho), N_r); \end{aligned} \quad (6)$$

$$j_1 \leq j \leq j_2 \text{ при условии } j_2 \geq j_1;$$

$$(0 \leq j \leq j_2) \cup (j_1 \leq j \leq N_a - 1) \text{ при условии } j_2 < j_1;$$

$$j_1 = \text{if}(\text{ceil}(\text{mod}(\varphi_c - \arcsin(r/\rho_c), 2\pi)/\Delta\varphi) = N_a, 0, \text{ceil}(\text{mod}(\varphi_c - \arcsin(r/\rho_c), 2\pi)/\Delta\varphi));$$

$$j_2 = \text{floor}(\text{mod}(\varphi_c + \arcsin(r/\rho_c), 2\pi)/\Delta\varphi),$$

где ceil – оператор округления до ближайшего большего целого значения; floor – оператор округления до ближайшего меньшего целого значения; $\text{mod}(a, b)$ – остаток от деления числа a на число b ; функция $\text{if}(\text{cond}, \text{val1}, \text{val2})$ принимает значение val1 при $\text{cond} = 1$ (истинное логическое условие) и val2 при $\text{cond} = 0$ (ложное логическое условие).

В формуле (6) при определении верхней границы изменения индекса i значение N_r принимается в случае, когда $\rho_c(t) > R - r$, то есть полюсный наконечник имеет неполное перекрытие с поверхностью заготовки. Случай $j_2 < j_1$ возникает при пересечении зоной обработки радиуса пластины $\varphi = 0$.

Функция mod приводит углы к диапазону $[0, 2\pi)$, а функции ceil и floor дают диапазоны значений $[1, N_a]$ и $[0, N_a - 1]$. Так как по определению значения индекса j должны лежать в диапазоне $[0, N_a - 1]$, то в случае $\text{ceil}(\text{mod}(\varphi_c - \arcsin(r/\rho_c), 2\pi)/\Delta\varphi) = N_a$ нижняя граница изменения индекса j принимается равной нулю, что описывается с помощью функции if .

При $\rho_c(t) < r$ условие (5) проверяется для всех значений индекса j , так как понятие угла охвата зоны обработки теряет в этом случае смысл и для индексов i , удовлетворяющих условию

$$0 \leq i \leq \text{floor}((\rho_c + r)/\Delta\rho).$$

При моделировании рассматривались следующие варианты начальных условий:

$$\rho_c(0) = R - r, \varphi_c(0) = \pi, \rho_c(T) = r; \quad (7)$$

$$\rho_c(0) = R, \varphi_c(0) = \pi, \rho_c(T) = r; \quad (8)$$

$$\rho_c(0) = R, \varphi_c(0) = \pi, \rho_c(T) = 0. \quad (9)$$

Начальное условие $\varphi_c(0) = \pi$ удобно использовать, так как в этом случае угол $\varphi_c - \arcsin(r/\rho_c)$ все время остается положительным.

Пластину будем условно считать неподвижной, а полюсный наконечник – совершающим радиальное движение подачи с линейной скоростью v_r в сочетании с вращательным дви-

жением относительно оси симметрии пластины с угловой скоростью Ω . В этом случае:

$$\rho_c(t) = \rho_c(0) - v_r t;$$

$$\varphi_c(t) = \varphi_c(0) + \Omega t;$$

$$T = (\rho_c(0) - \rho_c(T))/v_r.$$

При моделировании будет использоваться дискретная временная переменная:

$$t_k = k\Delta t;$$

$$k = 0 \dots N_t;$$

$$\Delta t = T/N_t.$$

Давление p будет считаться постоянным в области проекции полюсного наконечника, однако в случае необходимости в рассматриваемую модель может быть без труда введена истинная функция распределения давления, определенная расчетным или экспериментальным путем. Скорость v движения точки P поверхности заготовки относительно инструмента определялась по формуле

$$v_P = \sqrt{v_{\perp}^2 + v_{\parallel}^2},$$

где $v_{\perp}$ – составляющая скорости, перпендикулярная радиус-вектору оси вращения инструмента; $v_{\parallel}$ – составляющая скорости, параллельная радиус-вектору оси вращения инструмента.

Составляющие скорости рассчитывались по формулам:

$$v_{\perp} = \omega d \cdot \cos(\theta) + \Omega \rho_i \cos(\varphi_c(t_k) - \varphi_j);$$

$$v_{\parallel} = \omega d \cdot \sqrt{1 - \cos^2(\theta)} + \Omega \rho_i \sqrt{1 - \cos^2(\varphi_c(t_k) - \varphi_j)} + v_r,$$

где $d = \sqrt{\rho_c^2(t_k) + \rho_i^2 - 2\rho_c(t_k)\rho_i \cos(\varphi_c(t_k) - \varphi_j)}$ – расстояние между точкой поверхности заготовки и осью вращения инструмента; $\cos(\theta) = (\rho_i \cos(\varphi_c(t_k) - \varphi_j) - \rho_c(t_k))/d$ – косинус угла между радиус-вектором оси вращения инструмента и вектором, соединяющим рассматриваемую точку поверхности заготовки с осью вращения инструмента.

Для расчета функции (2) вводилась матрица $\{h_{\Sigma}\}$ съема припуска с нулевыми начальными значениями элементов. Если в момент времени t_k точка P_{ij} находится в области обработки, то значение соответствующего ей элемента матрицы $\{h_{\Sigma}\}$ увеличивается на величину $v_P(t_k)\Delta t$. Для определения истинных значений съема припуска полученную таким образом матрицу нужно умножить на коэффициент k , характеризующий условия обработки, и давление p в зоне обработки, однако для качественного анализа возникающих при обработке отклонений формы можно принять $k = 1$ и $p = 1$.

Результаты расчета при начальных условиях (7)–(9) приведены на рис. 1.

Расчет производился при следующих исходных данных: $R = 150$ мм; радиус полюсного наконечника $r = 10$ мм; $\Omega = 1$ об/с; $\omega = 10$ об/с; $v_r = 1$ мм/с; $N_r = 150$; $N_a = 360$; $\Delta t = 0,56$ мс.

Все рассмотренные случаи характеризуются значительной неравномерностью съема припуска. В случае начальных условий (7) наблюдается «краевой эффект», состоящий в снижении величины съема припуска до нуля в центре

и на периферии заготовки, не пересекаемых инструментом в процессе обработки. В случае начальных условий (8) краевой эффект не периферии заготовки становится менее выраженным, так как инструмент пересекает ее в процессе обработки. Аналогичным образом при начальных условиях (9) снижается краевой эффект в центре заготовки. Кривые, аналогичные представленным на рис. 1, были ранее получены при исследовании имеющего схожую кинематику процесса напыления покрытий на поверхность вращающегося диска [9]. Таким образом, для исключения возникновения краевого эффекта инструмент должен пересекать при обработке центр и периферию заготовки. Что касается неравномерности съема припуска вне зоны краевого эффекта, она сохраняется во всех рассмотренных случаях и для ее компенсации требуется управление режимами обработки, которое может быть реализовано несколькими способами, вытекающими из уравнения (1), за счет изменения:

- 1) кинематических параметров процесса обработки (скорости v).
- 2) давления p .

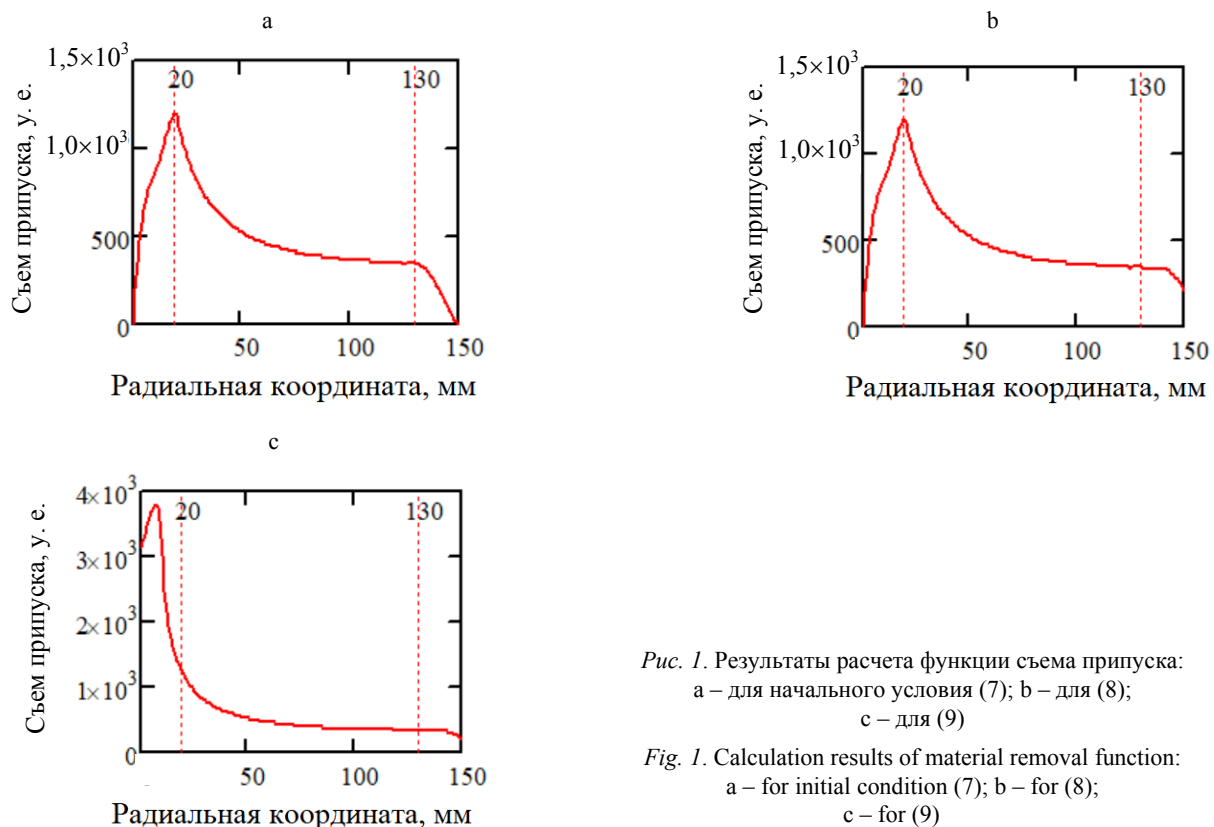


Рис. 1. Результаты расчета функции съема припуска: а – для начального условия (7); б – для (8); в – для (9)

Fig. 1. Calculation results of material removal function: а – for initial condition (7); б – for (8); в – for (9)

Предпочтение следует отдать второму способу, так как давление p влияет на скорость съема припуска линейным образом (в отличие от кинематических параметров Ω , ω и v_r), хотя существуют исследования, посвященные управлению съемом припуска при МАФО за счет изменения кинематических параметров [10]. Так как давление при МАФО определяется характеристиками магнитного поля [11], технически возможны следующие варианты его регулирования:

1) изменение индукции магнитного поля за счет регулирования силы тока, протекающего через обмотку электромагнита (для магнитных систем на основе электромагнитных индукторов);

2) варьирование величины воздушного зазора между полюсным наконечником и поверхностью заготовки (для магнитных систем на основе электромагнитных индукторов и постоянных магнитов);

3) изменение скважности импульсов магнитного поля при фиксированной частоте их повторения (широотно-импульсная модуляция) (для магнитных систем на основе электромагнитных индукторов при обработке в импульсных магнитных полях).

Обратная задача моделирования процесса МАФО

Рассматриваемая в данном разделе обратная задача состоит в определении закона регулирования давления p при МАФО, обеспечивающего заданное (близкое к равномерному) распределение величины съема припуска по поверхности заготовки. Для вывода описывающих обратную задачу уравнений рассмотрим одномерную функцию съема припуска

$$h_{1D}(p) = h(p, 0)$$

и представим ее в виде суммы функций съема за один оборот заготовки (пооборотных функций съема):

$$h_{1D}(p) = \sum_{k=1}^{N+1} \int_{t(k)}^{t(k+1)} RR(p, 0, t) dt = \sum_{k=1}^{N+1} h_k(p), \quad (10)$$

где N – число полных оборотов заготовки за время T ; $t(k) = 2\pi(k-1)/\Omega$ при $k \leq N+1$; $t(N+2) = T$.

Функции $h_k(p)$ рассчитываются путем численного интегрирования функции (1) скорости съема припуска на интервале $(t(k); t(k+1))$.

Как было показано в предыдущем разделе, при постоянных режимах обработки функция $h_{1D}(p)$ является непостоянной, что соответствует возникновению при обработке отклонений формы. Для минимизации этих отклонений необходимо, чтобы функция $h_{1D}(p)$ принимала близкое к постоянному значение, что может быть достигнуто заменой суммирования в выражении (10) взвешенным суммированием:

$$h_{1D}(p) = \sum_{k=1}^{N+1} w_k h_k(p), \quad (11)$$

где весовые коэффициенты w_k должны быть подобраны таким образом, чтобы обеспечить минимальное отклонение функции $h_{1D}(p)$ от заданного значения.

С технической точки зрения, введение весовых коэффициентов в выражении (11) соответствует пропорциональному изменению давления p при обработке. Таким образом, обратная задача моделирования процесса МАФО может быть сведена к определению весовых коэффициентов w_k в выражении (11), обеспечивающих минимальное отклонение одномерной функции $h_{1D}(p)$ съема припуска от заданного постоянного значения. Для решения этой задачи представим выражение (11) в дискретной форме

$$h_{\text{opt}(i)} = \sum_{k=1}^{N+1} w_k h_{i,k}, \quad (12)$$

где $h_{\text{opt}(i)} = h_{\text{opt}}(p_i)$; $h_{i,k} = h_k(p_i)$; $p_i = (i-1)R/(N_r-1)$, $i = 1 \dots N_r$; $h_{\text{opt}}(p)$ – требуемое (оптимальное) распределение одномерной функции $h_{1D}(p)$ съема припуска.

Уравнение (12) может быть записано в матричной форме

$$\{\mathbf{h}\} \mathbf{w} = \mathbf{h}_{\text{opt}}, \quad (13)$$

где $\{\mathbf{h}\}$ – матрица пооборотного съема припуска, столбцы которой соответствуют дискретизированным значениям пооборотных функций съема $h_k(p)$; $\mathbf{w}$ – вектор весовых коэффициентов; $\mathbf{h}_{\text{opt}}$ – вектор оптимального распределения съема припуска.

Как было показано ранее (рис. 1), при перемещении инструмента из положения $p_c(0) = R-r$ в положение $p_c(T) = r$ функция $h_{1D}(p)$, рассчитанная для постоянных режимов обработки, характеризуется наличием зон краевого эффекта $p \geq R-2r$ и $p \leq 2r$, в которых величина съема припуска плавно снижается до нуля. Поэтому

оптимальное распределение $h_{\text{opt}}(\rho)$ съема припуска должно задаваться в виде трапецеидальной функции

$$h_{\text{opt}}(\rho) = h_0 \cdot \text{if}(\rho \geq R - 2r, (R - \rho)/2r, \text{if}(\rho \leq 2r, \rho/2r, 1)).$$

Так как матрица $\{\mathbf{h}\}$ в (13) в общем случае является прямоугольной, для решения этого уравнения требуется использование обобщенной обратной (псевдообратной) матрицы Мура–Пенроуза:

$$\{\mathbf{h}\}^+ = (\{\mathbf{h}\}^T \{\mathbf{h}\})^{-1} \{\mathbf{h}\}^T; \\ \mathbf{w} = \{\mathbf{h}\}^+ \mathbf{h}_{\text{opt}}, \quad (14)$$

где индекс T обозначает транспонирование матрицы.

Численный анализ показывает, что матрица $\{\mathbf{h}\}^T \{\mathbf{h}\}$ и соответственно рассматриваемая обратная задача моделирования процесса МАФО являются плохо обусловленными, что характерно для многих обратных задач. Как будет показано далее, представление решения обратной задачи в виде (14) дает достаточно точное (в смысле величины отклонения $\|\{\mathbf{h}\}\mathbf{w} - \mathbf{h}_{\text{opt}}\|$, где $\|\cdot\|$ – евклидова (ℓ_2) норма) решение, однако распределение весовых коэффициентов w_k является в этом случае недостаточно гладким, что делает затруднительным или невозможным соответствующее управление режимами обработки. Сглаживание решения и улучшение обусловленности задачи могут быть достигнуты путем регуляризации, по Тихонову, которая в простейшем варианте описывается уравнением [8]

$$\mathbf{w} = (\{\mathbf{h}\}^T \{\mathbf{h}\} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \{\mathbf{h}\}^T \mathbf{h}_{\text{opt}},$$

где $\lambda > 0$ – параметр регуляризации; $\mathbf{I}$ – единичная матрица.

Выбор параметра λ является компромиссной задачей, так как его увеличение приводит к повышению гладкости решения, однако при этом происходит потеря точности (увеличение отклонения $\|\{\mathbf{h}\}\mathbf{w} - \mathbf{h}_{\text{opt}}\|$).

В работах [9, 12], посвященных равномерности нанесения покрытий на поверхность вращающихся деталей, использовалось следующее интуитивное (не имеющее строгого математического обоснования, однако демонстрирующее практически приемлемые результаты) определение весовых коэффициентов:

$$w_k = \min(H)/H_k \leq 1; \quad (15)$$

$$H_k = \max(\{\mathbf{h}\}^{<k>}), \quad (16)$$

где индекс $<k>$ соответствует извлечению k -го столбца матрицы.

Технически подобное определение весовых коэффициентов соответствует снижению давления p при обработке обратно пропорционально максимальному значению пооборотного съема припуска, то есть на оборотах, соответствующих максимальному съему припуска будет прикладываться минимальное давление. Альтернативным вариантом является определение весовых коэффициентов через интегральное (или, что равносильно, среднее) значение пооборотного съема припуска. В этом случае

$$H_k = \sum_{i=1}^{N_r} h_{i,k}. \quad (17)$$

Оба описанных определения весовых коэффициентов будут использоваться в дальнейшем для оценки достоверности результатов, полученных путем решения регуляризованной обратной задачи.

На рис. 2 представлены графики изменения весовых коэффициентов, рассчитанных по формулам (15), (16) и (15), (17) для тех же исходных данных, что и приведенное выше решение прямой задачи.

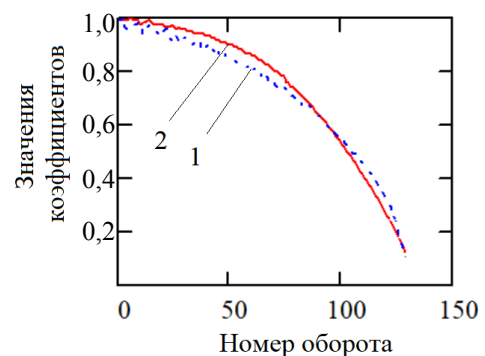


Рис. 2. Графики изменения весовых коэффициентов: 1 – расчет по формулам (15), (16); 2 – по (15), (17)

Fig. 2. Plots of variation in weight coefficients: 1 – calculation by formulas (15), (16); 2 – calculation by formulas (15), (17)

На рис. 3 представлен график оптимального распределения съема припуска и графики съема припуска, рассчитанные по формуле (11) с учетом приведенных на рис. 2 значений весовых коэффициентов.

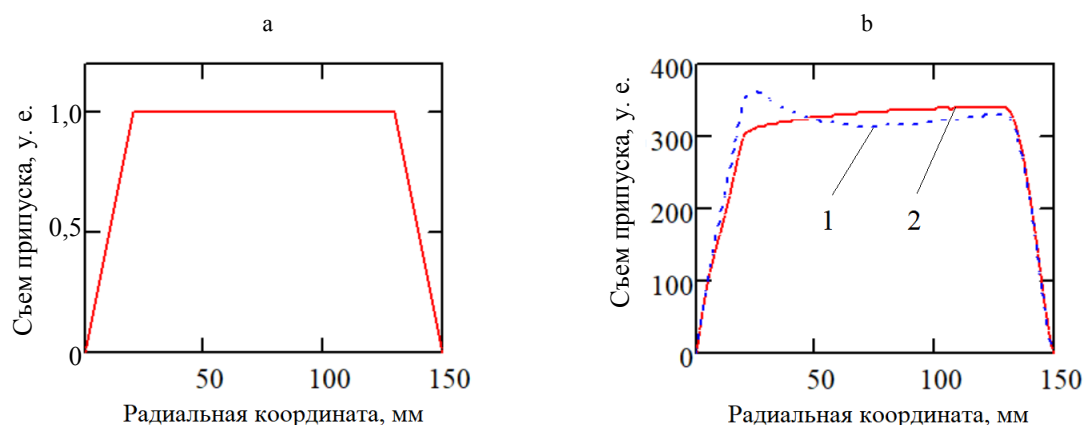


Рис. 3. Графики: а – оптимального распределения съема; б – рассчитанные по формуле (11); 1 – расчет весовых коэффициентов по (15), (16); 2 – то же по (15), (17)

Fig. 3. Plots of material removal: а – optimal distribution of removal; б – plots calculated by formula (11); 1 – calculation of weight coefficients by formulas (15), (16); 2 – calculation of weight coefficients by formulas (15), (17)

Как видно из графиков, распределение съема припуска становится значительно более равномерным по сравнению с распределениями, представленными на рис. 1, однако все же достаточно сильно отклоняется от оптимального, особенно в случае расчета весовых коэффициентов по (15), (16).

На рис. 4 представлены графики изменения весовых коэффициентов, рассчитанных путем решения нерегуляризованной и регуляризованной обратной задач.

На этих же графиках для сравнения приведено нормированное распределение весовых коэффициентов, рассчитанных по (15), (17). Нормировка производилась путем умножения на постоянный коэффициент, минимизирую-

щий среднеквадратическое отклонение между коэффициентами, рассчитанными двумя способами. Как видно из графиков, общая тенденция изменения весовых коэффициентов соответствует расчету по (15), (17), однако для изменения коэффициентов, рассчитанных путем решения обратных задач, характерна более высокая степень колебательности. Как предсказывает теория, решение регуляризованной обратной задачи является более гладким по сравнению с решением нерегуляризованной задачи.

На рис. 5 представлены графики съема припуска, рассчитанные по формуле (11) с учетом значений весовых коэффициентов, полученных путем решения обратных задач.

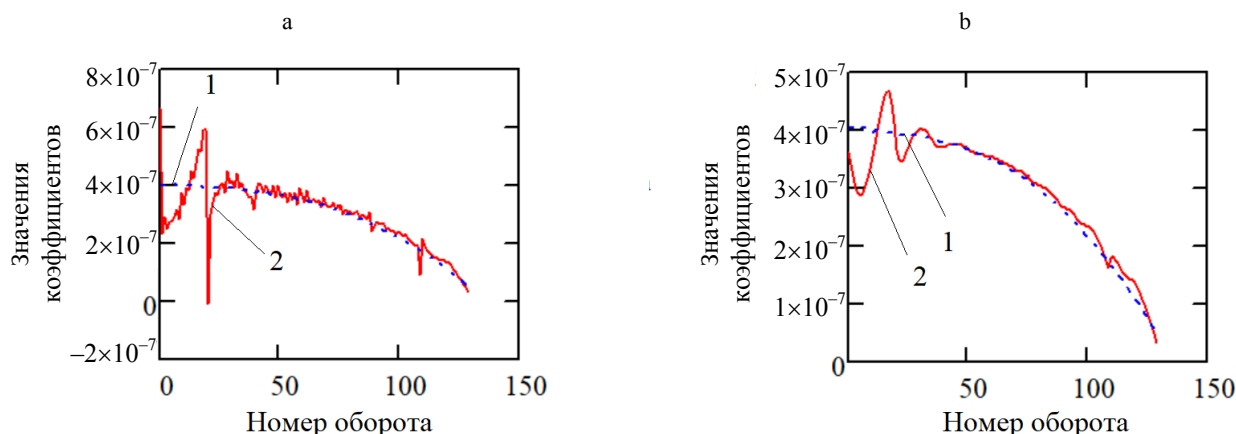


Рис. 4. Графики изменения весовых коэффициентов: а – расчет путем решения нерегуляризованной обратной задачи; б – то же путем решения регуляризованной обратной задачи; 1 – расчет по формулам (15), (17); 2 – решение обратной задачи

Fig. 4. Plots of variation in weight coefficients: а – calculation using solution of non-regularized inverse problem; б – calculation using solution of regularized inverse problem; 1 – calculation by formulas (15), (17); 2 – solution of inverse problem

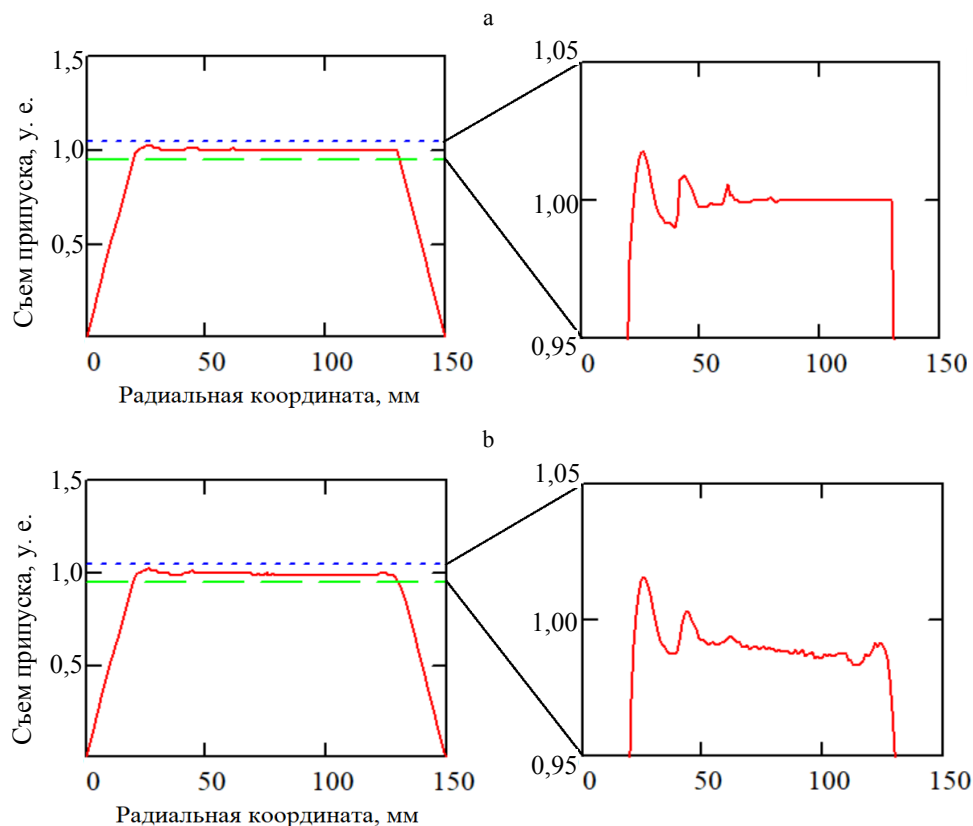


Рис. 5. Графики съема припуска: а – расчет весовых коэффициентов путем решения нерегуляризованной обратной задачи; б – то же регуляризованной обратной задачи

Fig. 5. Plots of material removal: a – calculation of weight coefficients using solution of non-regularized inverse problem; b – calculation of weight coefficients using solution of regularized inverse problem

В обоих случаях (для нерегуляризованной и регуляризованной обратных задач) расчетные распределения съема припуска достаточно близки к требуемому оптимальному распределению. Как предсказывает теория, для решения регуляризованной задачи характерно более сильное отклонение расчетного распределения от требуемого оптимального.

На практике важной является не только задача о равномерном съеме припуска, но и более общая задача о съеме припуска по определенному закону, так как заготовка поступает на операцию МАФО с отклонениями от формы, возникшими на предшествующих операциях обработки, и соответственно возникает проблема коррекции этих отклонений (корректирующей обработки со съемом припуска по определенному закону) [10, 13]. Решение этой задачи будет рассмотрено в дальнейших исследованиях. Корректирующая обработка может производиться как методом МАФО [10], так и с помощью других методов, таких как локальное жидкостное травление [13], однако последний

способ требует применения химически агрессивных сред.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика решения прямых и обратных задач моделирования процесса МАФО полупроводниковых пластин, позволяющих рассчитывать функцию съема припуска при заданных параметрах обработки (прямая задача) и требуемые для реализации заданной функции съема припуска значения параметров обработки (обратная задача).

2. На основе анализа прямой задачи с постоянными значениями кинематических и магнитных параметров обработки показано, что обработка при постоянных значениях параметров не обеспечивает равномерности съема припуска.

3. На основе анализа обратной задачи показано, что управление магнитными параметрами обработки позволяет с достаточно высокой точностью реализовать заданную функцию съема припуска и, как частный случай, близкий к равномерному съему припуска.

4. Путем сравнительного анализа решения исходной обратной задачи и решения обратной регуляризованной, по Тихонову, задачи показано, что регуляризация позволяет повысить гладкость решения и соответственно упростить процесс управления параметрами обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хомич, Н. С. Магнитно-абразивная обработка изделий / Н. С. Хомич. Минск: БНТУ, 2006. 217 с.
2. Mosavat, M. Nano-Finishing of the Monocrystalline Silicon Wafer Using Magnetic Abrasive Finishing Process / M. Mosavat // *Applied Optics*. 2019. Vol. 58, No 13. P. 3447–3453. <https://doi.org/10.1364/AO.58.003447>.
3. The use of Potassium Peroxodisulphate and Oxone® as Oxidizers for the Chemical Mechanical Polishing of Silicon wafers / A. Piñero [et al.] // *Wear*. 2013. Vol. 303, No 1–2. P. 446–450. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.03.030>.
4. An Efficient Approach for Atomic-Scale Polishing of Single-Crystal Silicon Via Plasma-Based Atom-Selective Etching / Z. Fang [et al.] // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2020. Vol. 159, Part B. Article 103649. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103649>.
5. Influence of Silicon Wafer Surface Roughness on Semiconductor Device Characteristics / K. Mori [et al.] // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2020. Vol. 59. Article SMMB06. <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ab918c>.
6. Silicon Wafer Thickness Variation Measurements Using the National Institute of Standards and Technology Infrared Interferometer / T. L. Schmitz [et al.] // *Optical Engineering*. 2003. Vol. 42, No 8. P. 2281–2290. <https://doi.org/10.1117/1.1589757>.
7. Моделирование кинематики процесса магнитно-абразивного полирования кремниевых пластин / Н. С. Хомич [и др.] // *Вестник БНТУ*. 2009. № 1. С. 32–38.
8. Bouvier, C. Investigation of Polishing Algorithms and Removal Processes for a Deterministic Subaperture Polisher: PhD Thesis / C. Bouvier. – University of Rochester, 2007. 272 p.
9. Stepanenko, D. A. Modeling of Spraying with Time-Dependent Material Feed Rate / D. A. Stepanenko // *Applied Mathematical Modelling*. 2007. Vol. 31, No 11. P. 2564–2576. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2006.10.005>.
10. Zhang, Y. Study of Corrective Abrasive Finishing for Plane Surfaces Using Magnetic Abrasive Finishing Processes / Y. Zhang, Y. Zou // *Nanotechnology and Precision Engineering*. 2021. Vol. 4, No 3. Article 033001. <https://doi.org/10.1063/1.5004961>.
11. Modeling of Material Removal in Magnetic Finishing Based on Maxwell's Stress Tensor Theory and its Experimental Validation / X. He [et al.] // *Journal of Materials Processing Technology*. 2023. Vol. 312. Article 117808. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117808>.
12. Киселев, М. Г. Исследование равномерности нанесения покрытий на примере напыления абразивной суспензии на поверхность ограниченного диска / М. Г. Киселев, Д. А. Степаненко // *Вестник БНТУ*. 2006. № 3. С. 51–56.
13. Improvement of Thickness Uniformity of Bulk Silicon Wafer by Numerically Controlled Local Wet Etching / M. Nagano [et al.] // *Journal of Crystal Growth*. 2009. Vol. 311, No 8. P. 2560–2563. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2009.01.131>.

Поступила 10.07.2023

Подписана в печать 12.09.2023

Опубликована онлайн 30.11.2023

REFERENCES

1. Khomich N. S. (2006) *Magnetic Abrasive Treatment of products*. Minsk, Belarusian National Technical University. 217 (in Russian).
2. Mosavat M. (2019) Nano-Finishing of the Monocrystalline Silicon Wafer Using Magnetic Abrasive Finishing Process. *Applied Optics*, 58 (13), 3447–3453. <https://doi.org/10.1364/AO.58.003447>.
3. Piñero A., Black A., Medina J. C., Dieguez E., Parra V. (2013) The use of Potassium Peroxodisulphate and Oxone® as Oxidizers for the Chemical Mechanical Polishing of Silicon Wafers. *Wear*, 303 (1–2), 446–450. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.03.030>.
4. Fang Z., Zhang Y., Li R., Liang Y., Deng H. (2020) An Efficient Approach for Atomic-Scale Polishing of Single-Crystal Silicon Via Plasma-Based Atom-Selective Etching. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 159, Part B, 103649. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103649>.
5. Mori K., Samata S., Mitsugi N., Teramoto A., Kuroda R., Suwa T., Hashimoto K., Sugawa S. (2020) Influence of Silicon Wafer Surface Roughness on Semiconductor Device Characteristics. *Japanese Journal of Applied Physics*, 59, Article SMMB06. <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ab918c>.
6. Schmitz T. L., Davies A., Evans C. J., Parks R. E. (2003) Silicon Wafer Thickness Variation Measurements Using the National Institute of Standards and Technology Infrared Interferometer. *Optical Engineering*, 42 (8), 2281–2290. <https://doi.org/10.1117/1.1589757>.
7. Fedortsev R. V., Khomich N. S., Lougovik A. I., Korzun A. E., Kukhto P. V. (2009) Kinematics Modeling of Magnetic and Abrasive Silicon Wafer Polishing. *Vestnik BNTU*, (1), 32–38 (in Russian).
8. Bouvier C. (2007) *Investigation of Polishing Algorithms and Removal Processes for a Deterministic Subaperture Polisher: PhD Thesis*. University of Rochester. 272.
9. Stepanenko D. A. (2007) Modeling Of Spraying With Time-Dependent Material Feed Rate. *Applied Mathematical Modelling*, 31 (11), 2564–2576. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2006.10.005>.
10. Zhang Y., Zou Y. (2021) Study of Corrective Abrasive Finishing for Plane Surfaces Using Magnetic Abrasive Finishing Processes. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 4 (3), Article 033001. <https://doi.org/10.1063/1.5004961>.
11. He X., Jin H., Zhou C., Gao C., Zhang G., Shiju E. (2023) Modeling of Material Removal in Magnetic Finishing Based on Maxwell's Stress Tensor Theory and its Experimental Validation. *Journal of Materials Processing Technology*, 312, Article 117808. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117808>.
12. Kiselev M. G., Stepanenko D. A. (2006) Study of Uniformity of Coating Application Using the Example of Spraying an Abrasive Suspension Onto the Surface of a Cutting Disc. *Vestnik BNTU*, (3), 51–56 (in Russian).
13. Nagano M., Mitani T., Ueda K., Zettsu N., Yamamura K. (2009) Improvement of Thickness Uniformity of Bulk Silicon Wafer by Numerically Controlled Local Wet Etching. *Journal of Crystal Growth*, 311 (8), 2560–2563. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2009.01.131>.

Received: 10.07.2023

Accepted: 12.09.2023

Published online: 30.11.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-487-494>

УДК 621.387.143

Влияние электрических характеристик импульсного источника питания СВЧ магнетрона на условия формирования плазмы в вакуумной камере плазмотрона резонаторного типа

О. И. Тихон¹⁾, канд. техн. наук, доц. С. И. Мадвейко¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)

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

Реферат. Изучено влияние электрических характеристик импульсного источника питания сверхвысокой частоты (СВЧ) магнетрона на условия формирования СВЧ разряда, определяемые режимом работы СВЧ генераторной системы в целом. Формирование плазменного разряда осуществлялось в вакуумируемом реакционно-разрядном объеме, расположенном внутри прямоугольной резонаторной камеры. В зависимости от режимов работы источника электропитания СВЧ магнетрона проведены исследования для трех режимов генерации плазмы СВЧ разряда (импульсный режим со скажностью $S \approx 2$; импульсный режим со скажностью $S \approx 1,15$; непрерывный режим). Выполнены зондовые измерения величины мощности СВЧ в объеме плазмы СВЧ разряда и ее локальной проводимости. В работе представлены зависимость мощности СВЧ энергии в центральной области реакционно-разрядной кварцевой камеры СВЧ плазмотрона от величины потребляемой СВЧ магнетроном мощности, а также распределение электрической составляющей плазмы СВЧ разряда по длине и плоскости сечения рабочего объема. Установлено, что для всех исследуемых режимов работы источника питания с повышением потребляемой мощности СВЧ генераторной системой характерно увеличение СВЧ мощности, регистрируемой в центральной области плазменного разряда. Для непрерывного режима генерации свойственно снижение неравномерности распределения электромагнитной энергии по оси разрядной камеры. Показано, что переход от импульсного к непрерывному режиму формирования плазменного СВЧ разряда при одинаковом уровне энергопотребления генераторной системой характеризуется снижением величины регистрируемой СВЧ мощности в объеме плазмы СВЧ разряда и ростом ее локальной проводимости в отдельных зонах реакционно-разрядного объема.

Ключевые слова: сверхвысокочастотный разряд, сверхвысокочастотный магнетрон, импульсный источник питания, мощность сверхвысокой частоты, локальная проводимость плазмы

Для цитирования: Тихон, О. И. Влияние электрических характеристик импульсного источника питания СВЧ магнетрона на условия формирования плазмы в вакуумной камере плазмотрона резонаторного типа / О. И. Тихон, С. И. Мадвейко // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 6. С. 487–494. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-487-494>

Influence of the Electrical Characteristics of Pulsed Microwave Magnetron Power Supply on the Conditions for Plasma Formation in the Vacuum Chamber of Resonator-Type Plasmatron

О. И. Tsikhan, S. I. Madveika

¹⁾Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents the research results of the influence of the electrical characteristics of a pulsed microwave magnetron power supply on the microwave discharge generation conditions, determined by the operating mode of the microwave

Адрес для переписки

Мадвейко Сергей Игоревич
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-80-88
E-mail: kritgar@bsuir.by

Address for correspondence

Madveika Siarhei I.
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
6, P. Brovka str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 17 293-80-88
E-mail: kritgar@bsuir.by

generating system as a whole. Plasma was formed in a vacuumized reaction-discharge volume located inside a rectangular resonator chamber. Depending on the operating modes of the microwave magnetron power supply, studies have been conducted for three modes of microwave discharge plasma generation: pulsed mode with a duty factor $S \approx 2$; pulsed mode with a duty factor $S \approx 1.15$; continuous mode. Probe measurements of the microwave power in the microwave discharge plasma volume and its local conductivity have been carried out. The paper presents the dependence of the power of microwave energy in the central area of the reaction-discharge quartz chamber of a microwave plasmotron on the amount of power consumed by the microwave magnetron, as well as the distribution of the electrical component of the microwave discharge plasma along the length and cross-sectional plane of the working volume. It has been established that for all studied modes of operation of the power source, with an increase in the power consumption of the microwave generator system, an increase in the microwave power recorded in the central region of the plasma discharge is characteristic. The continuous generation mode is characterized by a decrease in the uneven distribution of electromagnetic energy along the axis of the discharge chamber. It is shown that the transition from a pulsed to a continuous mode of microwave plasma discharge generation at the same level of power consumption by the generating system is characterized by a decrease in the value of the registered microwave power in the microwave discharge plasma volume and an increase in its local conductivity in particular areas of the reaction-discharge volume.

Keywords: microwave discharge, microwave magnetron, pulsed power supply, microwave power, local plasma conductivity

For citation: Tsikhan O. I., Madveika S. I. (2023) Influence of the Electrical Characteristics of Pulsed Microwave Magnetron Power Supply on the Conditions for Plasma Formation in the Vacuum Chamber of Resonator-Type Plasmatron. *Science and Technique*. 22 (6), 487–494. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-487-494> (in Russian)

Введение

Новые задачи и постоянно растущие требования субмикронной микро- и нанoeлектроники стимулируют поиск новых способов направленного плазменного воздействия на обрабатываемые конденсированные среды. Актуальной задачей остается повышение эффективности реализуемых и создание новых технологических процессов. С точки зрения энерго- и ресурсосбережения, особое внимание уделяется многократно повторяющимся операциям в одном технологическом цикле, к которым относится сверхвысокочастотное (СВЧ) плазмохимическое удаление фоторезистивных покрытий с поверхности полупроводниковых пластин, реализуемых с использованием плазмотронов технологического назначения [1, 2].

Практический интерес представляет обеспечение возбуждения и поддержания СВЧ плазмы большого объема в плазмотронах, разработанных на базе объемных резонаторов, позволяющих выполнять плазмохимическую обработку полупроводниковых материалов большой площади при использовании в качестве источников энергии малогабаритных бытовых СВЧ магнетронов средней мощности. Ввиду особенностей работы СВЧ магнетрона на нестационарную нагрузку большое внимание необходимо уделять выбору его источника питания, который позволил бы обеспечить эффективную работу магнетрона на плазменную нагрузку при сохранении его надежности и долговечности.

Известно, что одним из ключевых параметров, влияющим на электро- и физико-химические характеристики формируемой плазмы, является вводимая в разряд мощность [3]. Режим работы магнетрона, а следовательно, и режим генерации плазмы при этом зависят от параметров тока в анодной цепи источника питания СВЧ магнетрона [4, 5].

Разработанное и используемое при проведении исследований техническое решение импульсного источника питания СВЧ магнетрона [6, 7] позволяет регулировать мгновенную мощность в широком диапазоне за счет управления амплитудой импульсов тока и дает возможность сформировать плазму СВЧ разряда как в импульсном, так и непрерывном режиме генерации.

Вопрос изучения параметров и свойств плазмы СВЧ разряда большого объема, формируемой при различных условиях электропитания СВЧ генераторов с применением разрядных устройств резонаторного типа, в научно-исследовательской литературе пока не нашел глубокой проработки. Потенциальная возможность совершенствования и оптимизации конструктивного исполнения существующих технических решений СВЧ плазмотронов резонаторного типа обосновывает необходимость выполнения качественных исследований, а также разработки методологии и рекомендаций по внедрению данного типа устройств в различные технологические вакуумно-плазменной обработки.

Таким образом, целью проведенного исследования являлось изучение характеристик формируемого СВЧ разряда, определяемых режи-

мом работы СВЧ генераторной системы, путем проведения зондовых измерений величины мощности СВЧ в объеме плазмы и ее локальной проводимости.

Методика проведения экспериментов

Наиболее распространенными методами контроля параметров возбуждаемого СВЧ разряда являются зондовые методы диагностики [8, 9]. Их преимущества заключаются в относительной простоте реализации, локальности и многообразии измеряемых параметров. Применение таких методов измерений позволяет изучить влияние режима генерации электромагнитной энергии при работе СВЧ магнетрона в составе плазмотрона на характеристики СВЧ разряда.

Экспериментальные исследования проводились на базе СВЧ вакуумно-плазменной установки резонаторного типа, схематически представленной на рис. 1 [5].

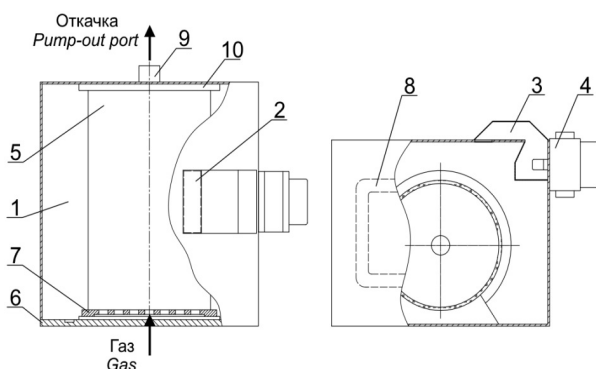


Рис. 1. Схематичное изображение реакционно-разрядной системы сверхвысокочастотной плазменной установки:

- 1 – резонатор; 2 – отверстие связи; 3 – волновод;
- 4 – сверхвысокочастотный магнетрон;
- 5 – реакционно-разрядная камера; 6 – передняя стенка резонатора; 7 – передняя крышка камеры;
- 8 – смотровое окно; 9 – патрубок для откачки;
- 10 – торцевая крышка камеры

Fig. 1. Schematic representation of reaction-discharge system of the microwave plasma unit:

- 1 – resonator; 2 – energy input slot; 3 – waveguide;
- 4 – microwave magnetron; 5 – reaction-discharge chamber;
- 6 – front wall of the resonator; 7 – front lid of the chamber;
- 8 – viewing window; 9 – pipe for pumping out;
- 10 – back lid of the chamber

Основным элементом сверхвысокочастотного плазмотрона является прямоугольная резонаторная камера, в объем которой вводится электромагнитная энергия через волноводный тракт.

Источником энергии выступает малогабаритный СВЧ магнетрон средней мощности 2М261, для питания которого был использован трехфазный импульсный источник питания [6]. Внутри объемного резонатора располагается вакуумируемая реакционно-разрядная камера туннельного типа объемом около 9000 см³, выполненная из кварцевого стекла. При проведении экспериментов величина давления в рабочем объеме устанавливалась на уровне 133 Па, оптимальном для проведения процессов СВЧ плазмохимического травления фоторезистивных слоев, в качестве рабочего газа использован воздух.

Исследования проводились при трех режимах работы импульсного источника электропитания СВЧ магнетрона: импульсном режиме работы со скважностью анодного тока $S \approx 2$; импульсном режиме работы со скважностью анодного тока $S \approx 1,15$; непрерывном режиме работы.

Оценка величины мощности СВЧ в объеме плазмы разряда осуществлялась с использованием «активного» СВЧ зонда [10], конструкция которого представлена на рис. 2.

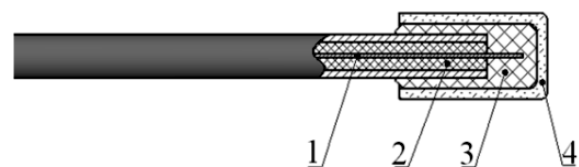


Рис. 2. Внешний вид «активного» зонда:

- 1 – центральная жила; 2 – изоляция зонда;
- 3 – дополнительная фторопластовая изоляция;
- 4 – кварцевый колпачок

Fig. 2. Appearance of the “active” probe:

- 1 – central core; 2 – probe insulation; 3 – additional fluoroplastic insulation; 4 – quartz cap

Зонд вводился в реакционно-разрядный объем через герметичный ввод в торцевой крышке камеры и перемещался по оси рабочей камеры СВЧ плазмотрона в процессе проведения экспериментов (рис. 3). Через высокочастотный разъем посредством 50-омного переходника зонд был подключен к измерителю мощности МЗ-28. В состав измерителя входят высокочастотный переключатель и термисторный мост Я2М-64, способный путем измерения полного сопротивления термистора при поглощении мощности высокочастотных колебаний регистрировать величину мощности СВЧ волны.

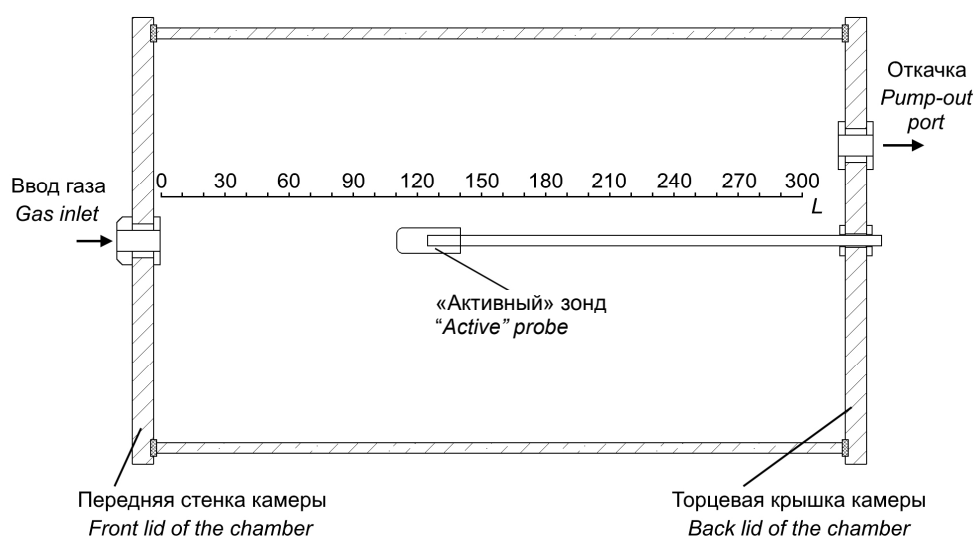


Рис. 3. Схематичное изображение расположения «активного» зонда в объеме рабочей камеры при проведении измерений
Fig. 3. Schematic representation of the "active" probe position in the reaction chamber volume during the measurements

Величину локальной проводимости СВЧ плазмы измеряли с использованием электрического зонда, представляющего собой плоские электроды из нержавеющей стали размером 5×5 мм, расположенные симметрично на расстоянии 5 мм друг от друга (рис. 4).

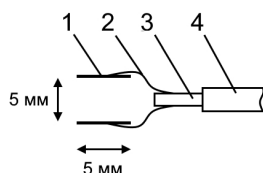


Рис. 4. Внешний вид электрического зонда:
1 – плоский электрод; 2 – проволочный вывод зонда;
3 – керамическая трубка; 4 – металлический чехол

Fig. 4. Appearance of the electrical probe:
1 – flat electrode; 2 – wire lead of the probe;
3 – ceramic tubing; 4 – metal casing

Проволочные выводы зонда, соединенные с нерабочими сторонами электродов, были пропущены через керамическую трубку, помещенную в металлический чехол из меди. Вакуумно уплотненная с обратной стороны трубка вводилась в рабочую камеру через герметичный ввод в торцевой крышке. Использование подобной конструкции электрического зонда позволило осуществить измерения зондового тока (мА) в различных локальных областях возбуждаемого плазменного разряда путем его перемещения в объеме реакционно-разрядной камеры.

Описанные методики проведения исследований позволили оценить влияние электриче-

ских характеристик импульсного трехфазного источника питания СВЧ магнетрона на величину СВЧ мощности в объеме плазмы СВЧ разряда и его локальную проводимость, которая может быть связана с концентрацией электронов, являющейся наиболее важным параметром для процессов удаления материалов с поверхности полупроводниковых пластин.

Результаты и их обсуждение

Результаты экспериментальных исследований величины СВЧ мощности в центральной области рабочей камеры СВЧ плазмотрона для всех исследуемых режимов работы импульсного источника питания СВЧ магнетрона представлены на рис. 5.

Анализ представленных результатов измерений показывает, что с увеличением мощности питания СВЧ магнетрона для всех режимов работы наблюдается рост мощности СВЧ энергии в объеме плазмы. При переходе от импульсного к постоянному режиму генерации плазмы степень зависимости роста мощности СВЧ энергии в центральной области разрядной камеры от мощности источника питания уменьшается. При работе СВЧ магнетрона от источника питания в непрерывном режиме генерации тока после ≈3500 Вт можно отметить скачок регистрируемой величины мощности СВЧ энергии в камере, который не наблюдался для других режимов работы источника питания.

Данное изменение уровня мощности соотносится с результатами исследований влияния величины электрической мощности и режимов работы импульсного источника питания СВЧ магнетрона на параметры интегрального оптического свечения плазмы СВЧ разряда, где при таких же мощностях отмечается скачок амплитудного значения интегрального оптического свечения плазмы СВЧ разряда [6].

Экспериментально установлено, что при энергопотреблении СВЧ генераторной системой мощности ~ 1850 Вт переход от импульсного к непрерывному режиму генерации плазмы сопровождается уменьшением величины регистрируемой СВЧ мощности в рабочей камере в 2,8 раза (рис. 5).

Для анализа равномерности распределения величины СВЧ мощности в плазме СВЧ разряда регистрировались показания «активного» зонда через определенные промежутки на оси разрядной камеры. Согласно полученным результатам для всех исследуемых режимов работы с увеличением потребляемой мощности СВЧ генераторной системой характерно повышение СВЧ мощности во всех рассмотренных точках рабочей камеры. Для непрерывного режима генерации плазмы СВЧ разряда харак-

терно увеличение равномерности распределения электромагнитной энергии по оси разрядной камеры СВЧ плазмотрона. При этом повышение потребляемой электрической мощности не приводит к значительному росту регистрируемой мощности СВЧ энергии по сравнению с импульсным режимом формирования плазмы.

Результаты экспериментальных исследований электрической составляющей плазмы СВЧ разряда для всех исследуемых режимов работы импульсного источника питания СВЧ магнетрона при уровне энергопотребления СВЧ генераторной системой ~ 1850 Вт представлены на рис. 6. Электрический зонд при проведении исследований перемещался по оси разрядной камеры. Через определенные промежутки проводилась регистрация показаний электрического зонда.

Полученные данные коррелируют с результатами регистрации процесса формирования СВЧ плазменного разряда (рис. 7). Как видно из представленной фотографии, в верхней части разрядной камеры присутствуют ярко светящиеся области плазмообразования, расположение которых по длине разрядной камеры соответствует экстремумам показаний электрического зонда, представленным на рис. 6.

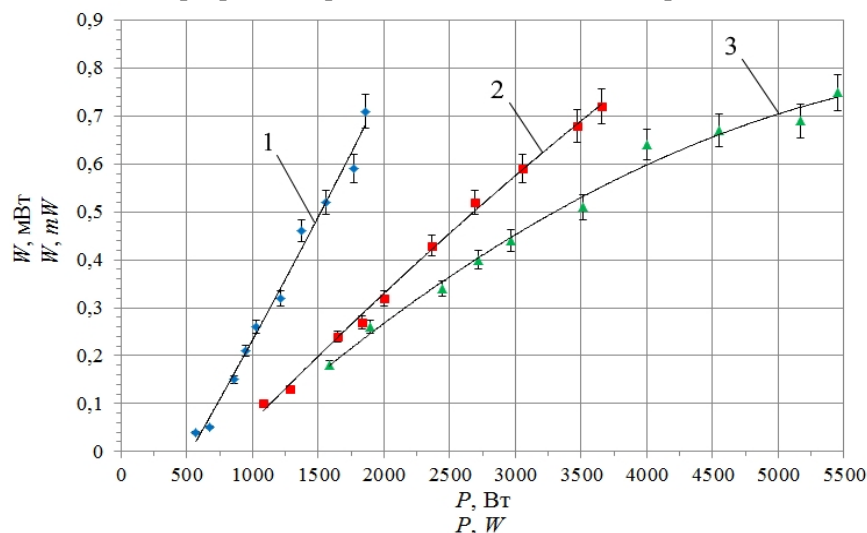


Рис. 5. Зависимость величины мощности сверхвысокочастотной энергии в центральной области рабочей камеры сверхвысокочастотного плазмотрона от величины потребляемой магнетроном сверхвысокочастотной мощности:

1 – импульсный режим работы со скважностью анодного тока $S \approx 2$; 2 – то же со скважностью анодного тока $S \approx 1,15$; 3 – непрерывный режим работы

Fig. 5. Dependence of the value of microwave energy power in the reaction chamber central area of the microwave plasma unit on the amount of microwave magnetron power consumption: 1 – a pulsed operation mode with the anode current duty factor $S \approx 2$;

2 – a pulsed operation mode with the anode current duty factor $S \approx 1,15$; 3 – a continuous operation mode

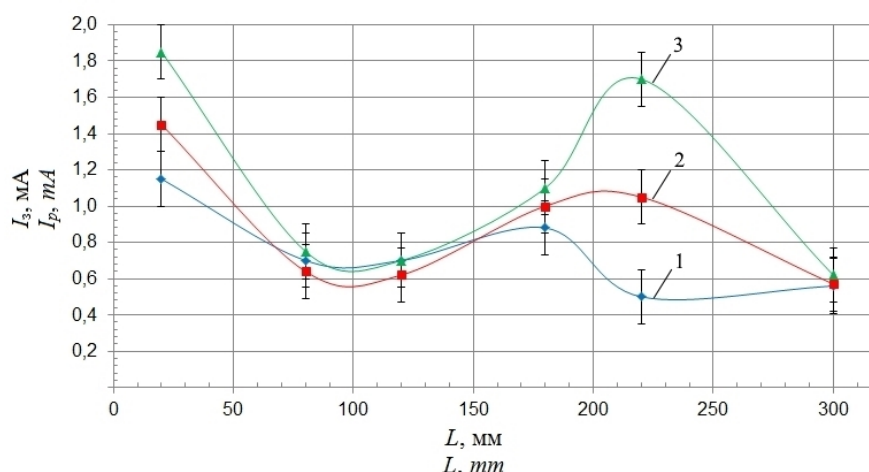


Рис. 6. Показания электрического зонда по длине разрядной камеры (энергопотребление сверхвысокочастотной генераторной системой ~1850 Вт): 1 – импульсный режим работы со скважностью анодного тока $S \approx 2$; 2 – то же со скважностью анодного тока $S \approx 1,15$; 3 – непрерывный режим работы

Fig. 6. Electrical probe readings along the length of the discharge chamber (microwave generator system power consumption ~1850 W): 1 – a pulsed operation mode with the anode current duty factor $S \approx 2$; 2 – a pulsed operation mode with the anode current duty factor $S \approx 1.15$; 3 – a continuous operation mode

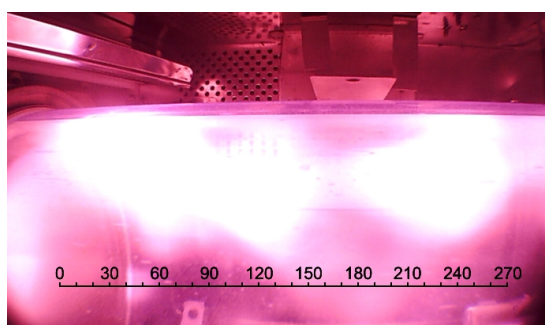


Рис. 7. Кварцевая камера сверхвысокочастотного плазмотрона с находящимся внутри плазменным образованием

Fig. 7. Quartz chamber of the microwave plasma unit with plasma formed inside

Согласно полученным экспериментальным результатам, уменьшение скважности импульсного сигнала анодного тока СВЧ магнетрона и дальнейший переход к непрерывному режиму работы источника питания при одинаковом уровне энергопотребления генераторной системы характеризуются ростом локальной проводимости в отдельных зонах реакционно-разрядного объема.

Полученные результаты указывают на наличие неоднородностей плазменного формирования в разрядной камере СВЧ плазмотрона, пространственное распределение которых сохраняется в объеме камеры для всех режимов работы СВЧ генераторной системы.

Влияние режима формирования СВЧ разряда на электрическую составляющую плазмы изучено путем исследования равномерности распределения проводимости плазмы по плоскости сечения плазменного разряда (рис. 8). Измерения проводились на расстоянии 180 мм от передней стенки камеры, электрический зонд перемещался в радиальном направлении.

Полученные показания электрической составляющей плазмы значительно отличаются в разных точках плоскости сечения кварцевого реактора. Значения зондового тока уменьшались при смещении зондов ближе к центру камеры во всех радиальных направлениях. Установлено, что области плазменного образования с наибольшими значениями зарегистрированной электрической составляющей 3,8; 4,2 и 5,2 мА, соответствующими трем режимам работы СВЧ генераторной системы, располагаются в верхней области реактора ближе к отверстию связи резонатора.

На основании полученных экспериментальных результатов можно сделать вывод, что переход от импульсного к непрерывному режиму генерации плазмы при одинаковой потребляемой мощности СВЧ генераторной системой приводит к увеличению значений проводимости плазменного объема.

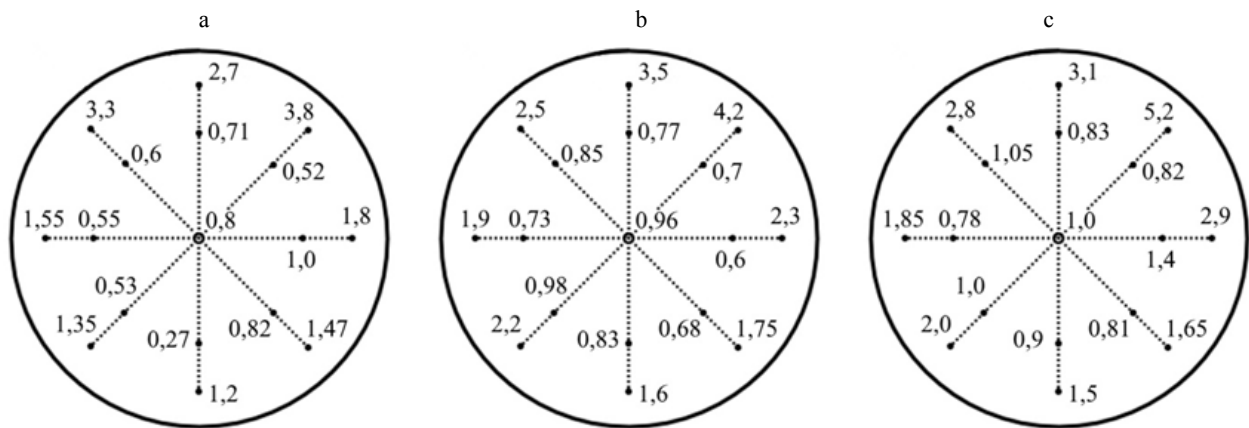


Рис. 8. Распределение электрической составляющей плазмы (мА) в радиальном направлении по плоскости сечения рабочей камеры сверхвысокочастотного плазмотрона: а – импульсный режим работы со скважностью анодного тока $S \approx 2$; б – то же со скважностью анодного тока $S \approx 1,15$; в – непрерывный режим работы

Fig. 8. Distribution of the plasma electric component (mA) in the radial direction over the cross-section plane of the microwave plasma unit reaction chamber: а – a pulsed operation mode with the anode current duty factor $S \approx 2$; б – a pulsed operation mode with the anode current duty factor $S \approx 1.15$; в – a continuous operation mode

В отдельных единичных точках на плоскости сечения разрядной камеры значения электрической составляющей плазмы не описываются представленной закономерностью, что может быть связано с разнесением измерений по времени, влиянием положения зонда в объеме камеры на перераспределение параметров плазменного формирования и т.д.

ВЫВОДЫ

1. Переход от импульсного к непрерывному режиму работы источника электропитания СВЧ магнетрона при одинаковом уровне энергопотребления генераторной системой характеризуется снижением величины регистрируемой СВЧ мощности в объеме плазмы СВЧ разряда и ростом ее локальной проводимости в отдельных зонах реакционно-разрядного объема. Полученные результаты можно объяснить тем, что уменьшение скважности импульсов анодного тока источника электропитания СВЧ магнетрона приводит к уменьшению скважности следования импульсов плазменных формирований. Распад плазмы между импульсами плазменных формирований происходит не полностью, и значительная часть электронов и других возбужденных частиц может оставаться в разрядном объеме.

2. Непрерывный режим генерации плазмы СВЧ разряда может характеризоваться нарастанием концентрации электронов в плазменном объеме и, как показали экспериментальные результаты, увеличением равномерности распределения электромагнитной энергии в объеме разрядной камеры СВЧ плазмотрона. При этом увеличение потребляемой электрической мощности не приводит к значительному росту регистрируемой мощности СВЧ энергии по сравнению с импульсным режимом формирования плазмы.

3. Данный эффект может быть связан с наличием скин-слоя, способствующего переотражению части СВЧ мощности в резонаторной камере, при этом большая часть СВЧ энергии может поглощаться в нем. В этом случае электрофизические свойства плазмы в центральной области плазменного разряда будут характеризоваться энергией электронов, которые вырываются из скин-слоя.

4. Полученные результаты могут быть использованы как при разработке нового плазменного технологического оборудования, так и при модернизации существующего с учетом вопросов энерго- и ресурсосбережения при проведении технологических процессов обработки материалов микро- и нанoeлектроники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бордусов, С. В. Плазменные СВЧ-технологии в производстве изделий электронной техники / С. В. Бордусов; под ред. А. П. Достанко. Минск: Бестпринт, 2002. 452 с.
2. Плазменные процессы в производстве электронной техники: в 3 т. / А. П. Достанко [и др.]; под общ. ред. А. П. Достанко. Минск: ФУАинформ, 2001. Т. 3. 244 с.
3. Яфаров, Р. К. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий / Р. К. Яфаров. М.: Физматлит, 2009. 216 с.
4. Хлопов, Ю. Н. Магнетрон / Ю. Н. Хлопов. М.: Знание, 1967. 50 с.
5. Tsikhan, O. I. Study of Pulsed and Continuous Modes of Microwave Discharge Plasma Generation on a Resonator-Type Plasmatron / O. I. Tsikhan, S. I. Madveika, S. V. Bordusau // *High Temperature Material Processes*. 2021. Vol. 25, No 2. P. 65–75. <https://doi.org/10.1615/hightempmatproc.2021039440>.
6. Тихон, О. И. Исследование влияния электрических параметров импульсного источника питания СВЧ магнетрона на режимы генерации плазмы СВЧ разряда / О. И. Тихон, С. И. Мадвейко, С. В. Бордусов // *Проблемы физики, математики и техники*. 2022. № 3 (52). С. 42–47. https://doi.org/10.54341/20778708_2022_3_52_42.
7. Исследование характера изменения величины СВЧ мощности в плазменном объеме при квазипостоянном режиме ее генерации / О. И. Тихон [и др.] // *Приборостроение – 2021: материалы 14-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 17–19 ноября 2021 г.* / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол. О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. Минск, 2021. С. 357–358.
8. Алексеев, Б. В. Зондовый метод диагностики плазмы / Б. В. Алексеев, В. А. Котельников. М.: Энергоатомиздат, 1988. 240 с.
9. Животов, В. К. Диагностика неравновесной химически активной плазмы / В. К. Животов, В. Д. Русанов, А. А. Фридман. М.: Энергоатомиздат, 1985. 216 с.
10. Investigation of the Method of Dynamic Microwave Power Redistribution in a Resonator-Type Plasmatron / S. Madveika [et al.] // *Plasma Physics and Technology*. 2018. Vol. 5, No 2. P. 60.

Поступила 19.05.2023

Подписана в печать 25.07.2023

Опубликована онлайн 30.11.2023

REFERENCES

1. Bordusov S. V. (2002) *Plasma Microwave Technologies in the Production of Electronic Equipment*. Minsk, Bestprint Publ. 452 (in Russian).
2. Dostanko A. P., Bordusov S. V., Svadkovskii I. V., Kundas S. P., Bosyakov M. N., Anufriev L. P., Lugscheider E. (2001) *Plasma Processes in the Production of Electronic Equipment. Vol. 3*. Minsk, FUAinform Publ. 244 (in Russian).
3. Yafarov R. K. (2009) *Physics of Microwave Vacuum-Plasma Nanotechnologies*. Moscow, Fizmatlit Publ. 216 (in Russian).
4. Khlopov Yu. N. (1967) *Magnetron*. Moscow, Znanie Publ. 50 (in Russian).
5. Tsikhan O. I., Madveika S. I., Bordusau S. V. (2021) Study of Pulsed and Continuous Modes of Microwave Discharge Plasma Generation on a Resonator-Type Plasmatron. *High Temperature Material Processes*, 25 (2), 65–75. <https://doi.org/10.1615/hightempmatproc.2021039440>.
6. Tsikhan O. I., Madveyko S. I., Bordusov S. V. (2022) The Study of the Microwave Magnetron Pulse Power Supply Electrical Parameters Influence on the Microwave Discharge Plasma Generation Modes. *Problemy Fiziki, Matematiki i Tekhniki = Problems of Physics, Mathematics and Technics*, 3 (52), 42–47 (in Russian). https://doi.org/10.54341/20778708_2022_3_52_42.
7. Tikhon O. I., Madveiko S. I., Bordusov S. V., Dostanko A. P., Lyakh A. S., Zhavoronok I. A. (2021) Study of the Nature of Changes in the Magnitude of Microwave Power in a Plasma Volume Under a Quasi-Constant Mode of Its Generation. *Priborostroenie – 2021: Materialy 14-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Minsk, 17–19 Noyabrya 2021 g.* [Instrumentation – 2021: Proceedings of the 14th International Scientific and Technical Conference, Minsk, November 17–19, 2021]. Minsk, 357–358 (in Russian).
8. Alekseev B. V., Kotelnikov V. A. (1988) *Probe Method for Plasma Diagnostics*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 240 (in Russian).
9. Zhivotov V. K., Rusanov V. D., Fridman A. A. (1985) *Diagnostics on Non-Equilibrium Chemically Active Plasma*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 216 (in Russian).
10. Madveika S., Bordusau S., Zemlyakov A., Lushakova M. (2018) Investigation of the Method of Dynamic Microwave Power Redistribution in a Resonator-Type Plasmatron. *Plasma Physics and Technology*, 5 (2), 60.

Received: 19.05.2023

Accepted: 25.07.2023

Published online: 30.11.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-495-499>

УДК 624.13

Расчет кольцевого свайно-плитного фундамента при условии нахождения части плиты в одной плоскости

Докт. техн. наук., проф. С. В. Босаков¹⁾

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

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

Реферат. Рассмотрена задача расчета кольцевой плиты на сваях на упругом основании при условии нахождения части плиты в одной плоскости. Подобная задача возникает в практике при расчете свайно-плитного фундамента дымовых труб ТЭЦ. Расчет выполняется способом Б. Н. Жемочкина – смешанным методом строительной механики, где за неизвестные принимаются усилия в разрезанных связях Б. Н. Жемочкина на контакте плиты и упругого основания, линейные и угловые перемещения введенного защемления на плите, пружинах, которыми моделируются сваи, и неизвестные усилия, вызывающие перемещения части кольцевой плиты в одной плоскости. Известными считаются внешние вертикальная сила, момент. Сформирована в общем виде система линейных алгебраических уравнений для решения поставленной задачи. Получены результаты для кольцевого свайно-плитного фундамента дымовой трубы. Приводятся графики распределения контактных напряжений, перемещений для нескольких сечений фундаментной плиты, усилий в сваях и внешней нагрузки, вызывающей перемещения части плиты в одной плоскости. Полученные результаты могут быть заложены в нормативные документы Республики Беларусь и Российской Федерации.

Ключевые слова: кольцевая плита, свая, способ Б. Н. Жемочкина, упругое основание, контактные напряжения

Для цитирования: Босаков, С. В. Расчет кольцевого свайно-плитного фундамента при условии нахождения части плиты в одной плоскости / С. В. Босаков // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 6. С. 495–499. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-495-499>

Calculation of Ring Pile-Slab Foundation Under Condition of Part of the Slab in the Same Plane

S. V. Bosakov¹⁾

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

Abstract. The problem of calculating a ring slab on piles on an elastic foundation is considered, provided that a part of the slab is in the same plane. A similar problem arises in practice when calculating the pile-slab foundation of chimneys of a thermal power plant. The calculation is performed using the method of B. N. Zhemochkin – a mixed method of structural mechanics, where the unknown forces in the cut connections of B. N. Zhemochkin at the contact of the slab and the elastic base, the linear and angular displacements of the introduced pinching on the slab, the springs that simulate the piles and the unknown forces that cause movement of part of the annular slab in one plane. The external vertical force and moment are considered as known. A system of linear algebraic equations has been formed in a general form to solve the problem. The results are obtained for a circular pile-slab foundation of a chimney. Graphs are presented of the distribution of contact stresses, displacements for several sections of the foundation slab, forces in piles and external loads that cause movement of a part of the slab in one plane. The results obtained can be included in the regulatory documents of the Republic of Belarus and the Russian Federation.

Keywords: ring slab, pile, method of B. N. Zhemochkin, elastic foundation, contact stresses

For citation: Bosakov S. V. (2023) Calculation of Ring Pile-Slab Foundation Under Condition of Part of the Slab in the Same Plane. *Science and Technique*. 22 (6), 495–499. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-495-499> (in Russian)

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

Введение

При расчетах плитных и плитно-свайных фундаментов высотных сооружений на эксплуатационные нагрузки, очевидно, точки плиты, где опираются колонны, диафрагмы жесткости, стены вследствие большой жесткости надфундаментного строения примерно находятся в одной плоскости. В отечественной научной литературе на это впервые обратила внимание Т. А. Маликова [1]. Расчеты многоэтажных зданий методом конечных элементов на программных комплексах подтвердили справедливость этого утверждения [2, 3]. В работе [4] было использовано такое предположение при расчете металлической базы колонны двутаврового поперечного сечения. В монографии [5] рассматривается плоский вариант нахождения точек фундаментной балки в одной плоскости. Различные аспекты расчета свайно-плитных и плитных фундаментов многоэтажных зданий приводятся в работах [6–9].

Ниже предлагается линейно-упругий расчет свайно-плитного кольцевого фундамента при условии, что часть точек фундаментной плиты по окружности лежит в одной плоскости. Практическим аналогом рассматриваемой задачи является кольцевой фундамент дымовой трубы ТЭЦ. Расчет выполняется способом Б. Н. Жемочкина [10] в полярной системе координат.

Постановка задачи

Рассмотрим кольцевую плиту, лежащую без трения в контактной зоне, на упругом основании. Разобьем ее концентрическими окружностями и радиально расходящимися лучами на участки Б. Н. Жемочкина. В центре каждого участка поставим жесткую вертикальную связь, через которую осуществляется контакт плиты с упругим основанием. Будем считать, что по краям каждого среднего участка находятся пружины вертикальной жесткостью R , которыми моделируются вертикальные сваи. Также допустим, что центры средних участков Б. Н. Жемочкина находятся в одной плоскости. Определим их уравнением

$$W(r, \theta) = W_0 + \theta_x r \sin[\theta] + \theta_y r \cos[\theta], \quad (1)$$

где θ_x , θ_y – углы поворота плоскости окружности, в которой находятся центры средних участков Б. Н. Жемочкина.

Также к центрам средних участков приложена неизвестная внешняя нагрузка Y_k , которая вызывает вертикальные перемещения точек окружности. На ней расположены центры средних участков, лежащие в одной плоскости (рис. 1). Равнодействующая внешней нагрузки известны и равны Z и M_y .

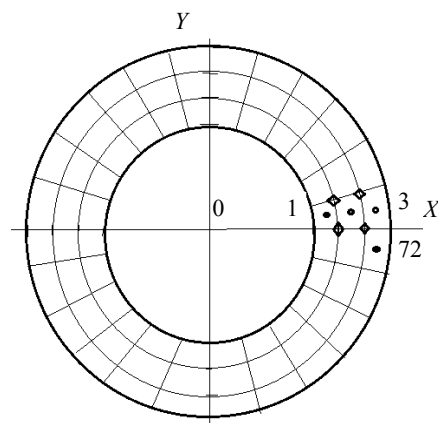


Рис. 1. Разбивка кольцевой плиты на участки Б. Н. Жемочкина

Fig. 1. Breaking out the ring slab to the plots of B. N. Zhemochkin

Поставленную задачу решаем смешанным методом строительной механики [11], введя защемление в точке внутренней окружности плиты (рис. 2), разрезав все связи Б. Н. Жемочкина и пружины, моделирующие сваи.

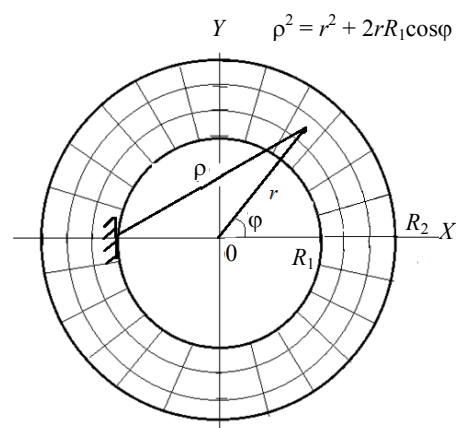


Рис. 2. Основная система смешанного метода для решения задачи

Fig. 2. Basic mixed method system to solve the problem

При применении способа Б. Н. Жемочкина необходимо иметь выражения для определения перемещений поверхности упругого основания

от действия единичной силы, распределенной по участку Б. Н. Жемочкина, и прогибы кольцевой плиты с защемленной нормалью от различно приложенной сосредоточенной силы. Перемещения упругого основания от действия единичной силы, распределенной по участку в полярных координатах, имеют довольно сложный вид даже для полупространства и здесь не приводятся.

Прогибы кольцевой плиты с защемленной нормалью (рис. 2) найдены методом Ритца [12] при представлении их функцией, удовлетворяющей граничным условиям по перемещениям:

$$W(r, \varphi) = (r^2 + 2rR_1 \cos \varphi + R_1^2) \times (A_0 + A_1 \cos \varphi + B_1 \sin \varphi), \quad (1)$$

где коэффициенты A_0 , A_1 , B_1 зависят от размеров и жесткости кольцевой плиты, места приложения и величины внешней нагрузки.

При принятой разбивке плиты на участки Б. Н. Жемочкина (рис. 1) за неизвестные принимаются:

- 72 усилия в связях Б. Н. Жемочкина;
- 48 усилий в сваях-пружинах;

- 24 внешние узловые нагрузки;
- 6 неизвестных линейных и угловых перемещений введенного защемления и уравнения плоскости окружности, на которой находятся внешние узловые силы (табл. 1).

Структура системы линейных алгебраических уравнений для решения рассматриваемой задачи приведена на рис. 3.

Уравнение плоскости, в которой находятся 24 точки плиты, к которой приложены внешние неизвестные силы Y_k , выражаются через усилия в связях Б. Н. Жемочкина в следующем виде:

$$W(r_i, \varphi_i) = \frac{1 - \nu_0^2}{\pi E_0} \sum_{k=1}^{72} F_{i,k} X_k, \quad (2)$$

где $F_{i,k}$ – функция для определения вертикальных перемещений точки i поверхности упругого основания от единичной силы, распределенной по участку Б. Н. Жемочкина с номером k ; зависит от вида упругого основания, некоторые функции можно найти в [13]; E_0 , ν_0 – модуль упругости и коэффициент Пуассона упругого основания.

Таблица 1

Усилия в связях Б. Н. Жемочкина	Три перемещения	Усилия в пружинах	Неизвестные силы	Три перемещения	
Взаимные перемещения концов разрезанных связей Б. Н. Жемочкина от усилий в этих связях (72 неизвестных, 72 уравнений)	Перемещения от введенного защемления (3)	Взаимные перемещения концов разрезанных связей Б. Н. Жемочкина от усилий в пружинах (48)	Взаимные перемещения концов разрезанных связей Б. Н. Жемочкина от неизвестных усилий (24)	Перемещения плоскости окружности загрузки (3)	Свободные члены 0
Уравнения равновесия (3 уравнений)	0			0	0
Перемещения точек вершин свай от усилий в связях Б. Н. Жемочкина (48 уравнений)		Перемещения точек вершин свай от усилий в разрезанных пружинах (48 уравнений)	Перемещения точек вершин свай от неизвестных усилий (48 уравнений)	0	0
Перемещения точек окружности плиты, лежащих в одной плоскости (24 уравнений)	0	0	0		0
Уравнения равновесия для внешних неизвестных сил, действующих по окружности (3 уравнения)	0	0			Z 0 M_y

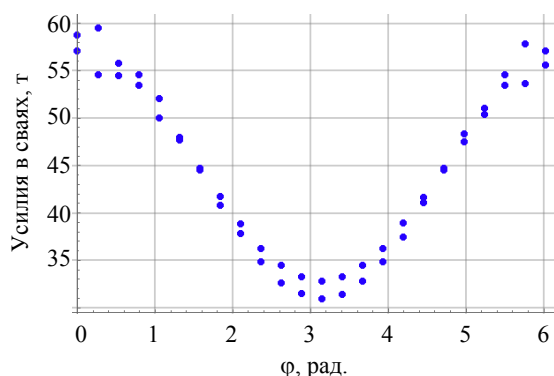


Рис. 3. Распределение усилий в сваях по окружности
Fig. 3. Distribution of forces in piles around the circumference

Пример расчета для кольцевой пластинки с параметрами:

$$R_1 = 6 \text{ м}; R_2 = 9 \text{ м}; E_0 = 3000 \frac{\text{Т}}{\text{м}^2}; \nu_0 = 0,35.$$

Плита из бетона С^{25/30} толщиной 1,5 м.

Внешние нагрузки $Z = 3827 \text{ Т}$; $M = 5747 \text{ тм}$.

Результаты расчета приводятся на рис. 4–7.

Из рис. 4 следует, что все сваи сжаты, причем наиболее сжаты сваи при $\varphi \approx 0$, наименее при $\varphi \approx \pi$, причем при малых углах более нагружен наружный ряд свай, при $\varphi \approx \pi$ – внутренний ряд свай.

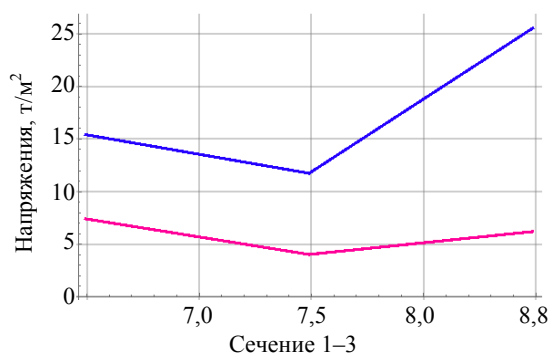


Рис. 4. Распределение контактных напряжений по двум сечениям (красный цвет – сечение 34–36)

Fig. 4. Contact stress distribution along two sections (red color – section 34–36)

Контактные напряжения увеличиваются к краям кольцевой плиты (рис. 4), что соответствует известным зонам концентрации напряжений [5].

Вертикальные перемещения увеличиваются или уменьшаются к наружному краю кольцевой плиты в зависимости от величины угла φ (рис. 5, 6).

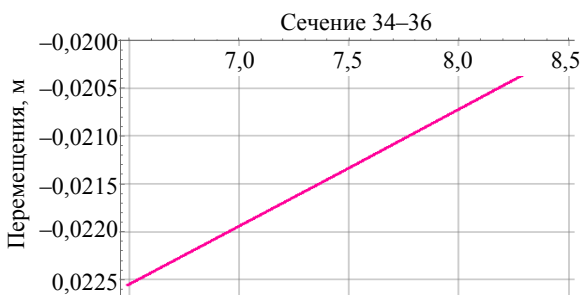
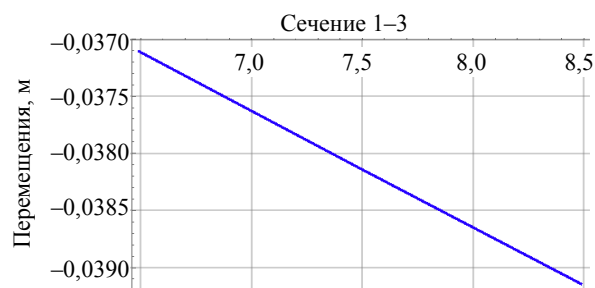


Рис. 5. Распределение вертикальных перемещений по двум сечениям

Fig. 5. Distribution of vertical movements along two sections

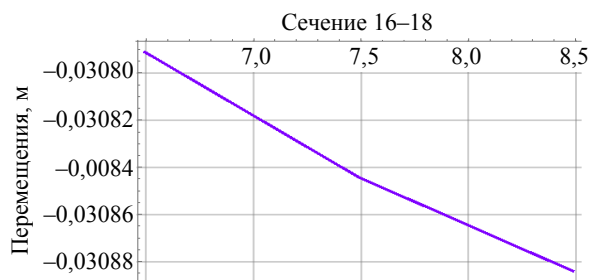


Рис. 6. Распределение вертикальных перемещений по сечению 16–18

Fig. 6. Distribution of vertical movements along the section 16–18

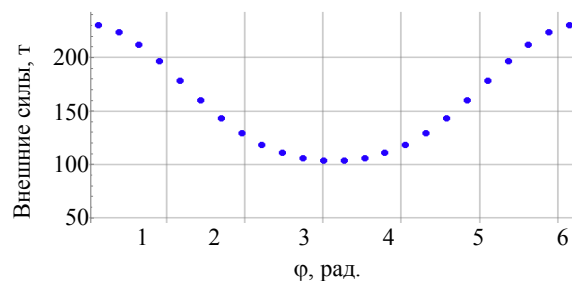


Рис. 7. Распределение и величины сил, вызывающие перемещения окружности нагружения плиты в одной плоскости

Fig. 7. Distribution and magnitude of forces, causing movement of the loading slab circumference in one plane

Из рис. 7 видно, что наибольшая внешняя нагрузка приложена к окружности нагружения при углах $\varphi \approx 0$ и наименьшая при $\varphi \approx \pi$.

ВЫВОДЫ

1. Впервые предложен способ Б. Н. Жемочкина для линейно-упругого расчета свайно-плитного кольцевого фундамента на произвольном упругом основании при условии нахождения части плиты в одной плоскости.

2. Результаты расчета по распределению контактных напряжений, вертикальных перемещений и усилий в сваях логично согласуются с направлением действия внешних момента и осесимметрично приложенной вертикальной силы.

ЛИТЕРАТУРА

- Маликова, Т. А. Анализ натурных осадок плитных и коробчатых фундаментов многоэтажных зданий / Т. А. Маликова // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1972. № 2. С. 17–21.
- Ривкин, С. А. Расчет фундаментов с учетом работы надфундаментных конструкций и неупругих деформаций грунта и железобетона / С. А. Ривкин // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1969. № 6. С. 14–17.
- Улицкий, В. М. Геотехническое сопровождение реконструкции городов / В. М. Улицкий, А. Г. Шашкин. М.: АСВ, 1999. 327 с.
- Босаков, С. В. Контактная задача для пластинки при условии ограничений на ее некоторые перемещения / С. В. Босаков, Ю. Н. Котов // Строительная механика и расчет сооружений. 2022. Т. 303, № 4. С. 54–58. <https://doi.org/10.37538/0039-2383.2022.1.54.58>.
- Горбунов-Посадов, М. И. Расчет конструкций на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов, Т. А. Маликова, В. И. Соломин. М.: Стройиздат, 1984. 679 с.
- Poulos, H. G. Piled Raft Foundations for Tall Blding / H. G. Poulos, J. C. Small, H. Chow // Geot. Eng. J. 2011. Vol. 42, No 2. P. 78–84.
- Самородов, А. Н. Особенности расчета, проектирования и оценки эффективности комбинированных свайных и плитных фундаментов многоэтажных зданий // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2017. № 6. С. 17–20.
- Особенности конструирования плитных и плитно-свайных фундаментов под каркасные и крупнопанельные многоэтажные здания / П. В. Шведовский, П. С. Пойта, Д. Н. Клебанюк, Д. Н. Сливка // Вестник БрГТУ. 2018. № 1. С. 58–64.
- Шулятьев, О. А. Основания и фундаменты высотных зданий / О. А. Шулятьев. М.: АСВ, 2016. 292 с.
- Жемочкин, Б. Н. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании / Б. Н. Жемочкин, А. П. Синицын. М.: Стройиздат, 1962. 239 с.
- Ржаницын, А. Р. Строительная механика / А. Р. Ржаницын. М.: Высш. шк., 1991. 439 с.
- Михлин, С. Г. Прямые методы в математической физике / С. Г. Михлин. М. – Л.: Гостехтеориздат, 1950. 458 с.
- Босаков, С. В. Статические расчеты плит на упругом основании / С. В. Босаков. Минск: БНТУ, 2002. 128 с.

Поступила 22.05.2023

Подписана в печать 25.07.2023

Опубликована онлайн 30.11.2023

REFERENCES

- Malikova T. A. (1972) Analysis of Natural Settlements of Slab and Box Foundations of Multistory Buildings. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 9 (2), 99–104. <https://doi.org/10.1007/bf01702896>.
- Rivkin S. A. (1969) Design of Foundations Taking Into Account the Superstructure Behavior and Inelastic Deformations of Soil and Reinforced Concrete. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, (6), 402–406. <https://doi.org/10.1007/bf01838274>.
- Ulitsky V. M., Shashkin A. G. (1999) *Geotechnical Support of Urban Reconstruction*. Moscow, ASV Publ. 327 (in Russian).
- Bosakov S. V., Kotov Yu. N. (2022) Contact Problem for a Plate Subject to Restrictions on Its Certain Displacements. *Stroitel'naya Mekhanika i Raschyot Sooruzheniy = Structural Mechanics and Analysis of Constructions*, 303 (4), 54–58. <https://doi.org/10.37538/0039-2383.2022.1.54.58> (in Russian).
- Gorbunov-Posadov M. I., Malikova T. A., Solomin V. I. (1984) *Calculation of Structures on an Elastic Base*. Moscow, Stroizdat Publ. 679 (in Russian).
- Poulos H. G., Small J. C., Chow H. (2011) Piled Raft Foundations for Tall Blding. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 42 (2), 78–84.
- Samorodov A. N. (2017) Combined Pile and Slab Foundations of Multistory Buildings: Calculation, Design, and Evaluation. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 54 (6), 395–401. <https://doi.org/10.1007/s11204-018-9486-4>.
- Shvedovsky P. V., Poita P. S., Klebanyuk D. N., Slivka D. N. (2018) Design Features of Slab and Slab-Pile Foundations for Frame and Large-Panel Multi-Storey Buildings. *Vestnik Brestskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Vestnik of Brest State Technical University*, (1), 58–64 (in Russian).
- Shulyatyev O. A. (2016) *Bases and Foundations of High-rise Buildings*. Moscow, ASV Publ. 292 (in Russian).
- Zhemochkin B. N., Sinitsyn A. P. (1962) *Practical Methods for Calculating Foundation Beams and Slabs on an Elastic Base*. Moscow, Stroizdat Publ. 239 (in Russian).
- Rzhanitsyn A. R. (1991) *Structural Mechbaics*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 439 (in Russian).
- Mikhlin S. G. (1950) *Direct Methods in Mathematical Physics*. Moscow – Leningrad: Gostekhtheorizdat Publ. 458 (in Russian).
- Bosakov S. V. (2002) *Static Calculations of Plates on an Elastic Base*. Minsk, Belarusian National Technical University. 128 (in Russian).

Received: 22.05.2023

Accepted: 25.07.2023

Published online: 30.11.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-500-507>

УДК 685.659.1+536.48

Влияние рекламных баннеров и логотипов команд на температурный режим льда крытых ледовых катков, встраиваемых в ледовую пластину

Канд. техн. наук Д. Г. Ливанский¹⁾

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

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

Реферат. Искусственные крытые ледовые площадки – сложные и дорогостоящие инженерные сооружения, которые широко используются для проведения различных спортивно-массовых и спортивных мероприятий, таких как ледовое шоу, хоккей, фигурное катание, конькобежный спорт и др. Присутствие на всех перечисленных мероприятиях большого количества зрителей способствует широкому распространению информации с помощью рекламы различных форм представления. Как показал опыт, прежде всего, это различные баннеры и логотипы команд, размещаемые в массиве ледовой пластины. Последнее, очевидно, влияет на температурный режим ледового покрытия, поскольку баннеры изменяют сопротивление теплопередаче слоя льда. Вместе с тем применительно к конкретному виду мероприятий устанавливаются (международными федерациями хоккея на льду, фигурного катания, конькобежного спорта, в том числе и международными правилами) жесткие требования к параметрам температурного поля поверхности ледовой пластины. Для изучения влияния рекламных баннеров на температурный режим поверхности льда проведены натурные эксперименты на ледовой площадке стандартного размера многофункциональной спортивной арены на 15000 зрителей и численное решение дифференциального уравнения теплопроводности для льда с рекламными баннерами. Проведенное исследование подтверждает, что рекламные баннеры на ледовых площадках оказывают существенное влияние на температурный режим льда, что влияет на качество льда и условия проведения спортивных соревнований. Соблюдение рекомендаций по выбору материалов и цветов баннеров, а также эффективное управление системой охлаждения помогут минимизировать негативные последствия баннеров на качество льда.

Ключевые слова: ледовый каток, теплообмен, логотип команды, рекламный баннер

Для цитирования: Ливанский, Д. Г. Влияние рекламных баннеров и логотипов команд на температурный режим льда крытых ледовых катков, встраиваемых в ледовую пластину / Д. Г. Ливанский // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 6. С. 500–507. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-500-507>

Influence of Advertising Banners and Team Logos on the Temperature Regime of Ice of Indoor Ice Skating Rinks, Built Into the Ice Plate

D. G. Livanskiy¹⁾

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

Abstract. Artificial indoor ice rinks are complex and expensive engineering structures that are widely used for hosting various public and sports events, such as ice shows, hockey, figure skating, speed skating, etc. The presence of large audiences at all these events contributes to the widespread dissemination of information through various forms of advertising. As experience has shown, this primarily involves various banners and team logos placed within the ice surface. The latter obviously affects

Адрес для переписки

Ливанский Дмитрий Геннадьевич
Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 67/18,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-30-13
fes@bntu.by

Address for correspondence

Livanskiy Dmitry G.
Belarusian National Technical University
67/18, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 17 292-30-13
fes@bntu.by

the temperature regime of the ice covering, as banners alter the heat transfer resistance of the ice layer. Furthermore, strict requirements for temperature field parameters on the ice surface are established for each type of event (by international federations of ice hockey, figure skating, speed skating, including international rules). To study the impact of advertising banners on the temperature regime of the ice surface, both natural experiments on a standard-size ice rink in a multifunctional sports arena for 15,000 spectators and numerical solutions of the heat conduction differential equation for ice with advertising banners were conducted. The research confirms that advertising banners on ice rinks have a significant impact on the temperature regime of the ice, which in turn affects the quality of the ice and the conditions for holding sports competitions. Adhering to recommendations regarding the choice of banner materials and colors, as well as effective management of the cooling system, can help minimize the negative consequences of banners on ice quality.

Keywords: ice rink, heat transfer, team logo, advertising banner

For citation: Livanskiy D. G. (2023) Influence of Advertising Banners and Team Logos on the Temperature Regime of Ice of Indoor Ice Skating Rinks, Built Into the Ice Plate. *Science and Technique*. 22 (6), 500–507. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-500-507> (in Russian)

Введение

Крытые ледовые площадки оказывают большое влияние на развитие массового и профессионального спорта, а также проведение спортивных соревнований различного масштаба и уровня. Международными федерациями ледовых видов спорта установлены требуемые температурные режимы поверхности льда. Так, для хоккеистов требуется поддерживать температуру поверхности льда $t_{\text{л}} = -7^{\circ}\text{C}$, а для фигуристов -3°C , при этом разность температур в любых двух точках поверхности ледовой пластины не должна превышать 0,5 К.

В последнее время широко распространено применение в теле ледовой пластины логоти-

пов хоккейных команд и рекламных баннеров спонсоров, которые устанавливаются в промежуточных слоях льда перед началом проведения соревнований различного уровня. По информации, опубликованной на сайте ИИХФ (Международная федерация хоккея с шайбой) [1], общая площадь стандартной ледовой поверхности для проведения международных соревнований по хоккею обычно составляет 1800 м². Суммарная площадь всех логотипов на ледовой арене во время чемпионата мира по хоккею обычно зависит от требований организаторов мероприятия и спонсорских соглашений. Так, например, логотипы могут занимать от 5 до 50 % площади ледовой поверхности, в зависимости от их количества и размеров (рис. 1).

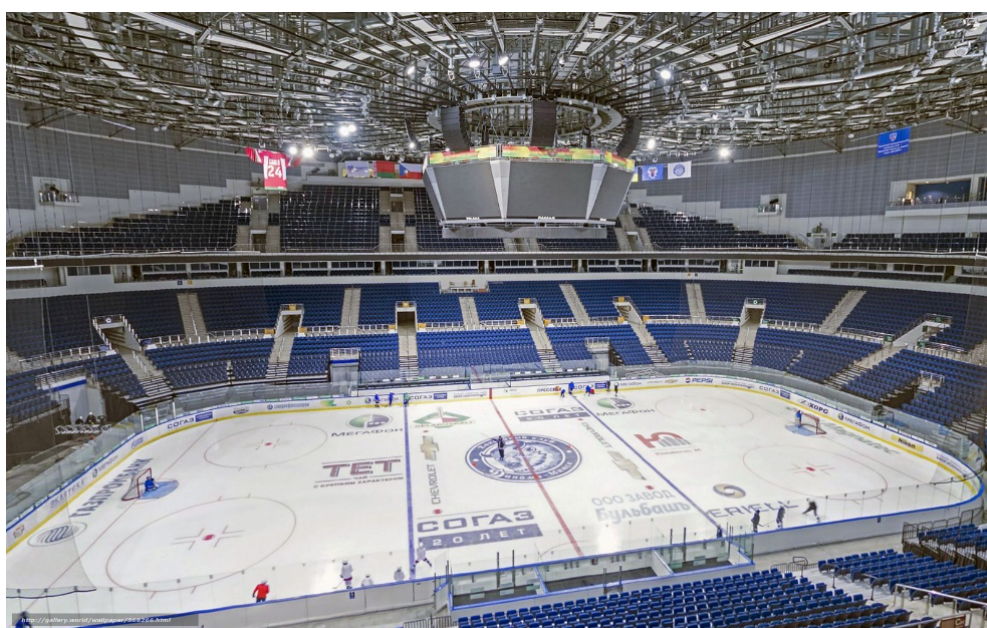


Рис. 1. Расположение рекламных баннеров и логотипа команды на ледовой площадке

Fig. 1. Location of advertising banners and team logo on the ice rink

Анализ влияния рекламных баннеров

Анализ отечественных и зарубежных источников [1–4] показывает, что логотипы команд и рекламные баннеры в массиве льда оказывают как экономический, так и социальный эффект. Они могут стать визуальным элементом, который привлечет внимание зрителей на катке и телезрителей во время телевизионной трансляции, например, хоккейного матча, что может повысить интерес к спортивной команде и спортивному мероприятию в целом. Логотип команды может оказать влияние на эстетику ледового катка. Если логотип выполнен в ярких цветах и соответствует общему дизайну катка, то он может добавить яркости и энергии в общую атмосферу различных мероприятий.

В свою очередь, логотипы команд и рекламные баннеры оказывают влияние и на температурный режим ледового поля. Баннеры представляют собой специальные листы с нанесенными на них цветными рисунками или надписями, которые обычно выполняются из бумаги, полиэтиленовой или поливинилхлоридной пленки. В случае, если логотип выполнен из материала с низкой теплопроводностью, то это может привести к некоторому увеличению температуры на поверхности льда над логотипом и, как результат, ухудшить качество льда в зоне расположения логотипа или рекламного баннера.

Стоит отметить, что достаточно важными факторами влияния логотипов и рекламных баннеров на температурный режим льда являются их цвет, толщина и теплопроводные свойства материала. Общеизвестно, что темные цвета, такие как черный или темно-синий, поглощают больше лучистой энергии и теплоты, чем светлые цвета, что может приводить к повышению температуры льда в тех местах, где расположены логотипы с темными цветами, и, как результат, приводить к различным проблемам, таким как плохое качество льда, повышенный риск таяния и т. д. Если логотип выполнен из материала, который плохо проводит теплоту, то это может также привести к некоторому увеличению температуры на поверхности льда над логотипом. Важно, чтобы повышение температуры было незначительным и не оказывало серьезного влияния на катание или качество льда.

Обычно рекламный баннер располагают в теле льда на ледовой площадке на расстоянии примерно 20 мм от поверхности бетонной плиты. На рис. 2 приведена примерная схема расположения рекламных баннеров на ледовой площадке и в теле льда.

Площадь логотипов команд на ледовом катке может значительно различаться в зависимости от конкретных требований. Обычно размер логотипа зависит от габаритов конкретной зоны, отведенной для размещения рекламы на ледовой арене, на которой будет играть команда. Например, для профессиональных лиг, таких как Национальная хоккейная лига (NHL), минимальный размер логотипа для центральной зоны на льду составляет 10 футов, или 3,05 м, в диаметре, а для зон угловых бортов – 4 фута, или 1,22 м, в диаметре. В то же время, в любительских лигах и на маленьких ледовых аренах размеры логотипов могут быть значительно меньше. Также важно отметить, что в различных странах и регионах могут быть свои требования и нормативы к размерам логотипов на ледовых аренах [1–4].

Для изучения влияния рекламных баннеров на температурный режим поверхности льда ледовых площадок автором проведены натурный и численный эксперименты. Для проведения натурного эксперимента была выбрана многофункциональная ледовая арена на 15000 зрителей с ледовой площадкой стандартного размера 30×60 м. Данная ледовая арена предназначена для проведения международных соревнований по хоккею с шайбой, например чемпионатов Европы, чемпионата мира или олимпийского хоккейного турнира. Площадь рекламных баннеров на данной ледовой площадке составляет 400 м², или ≈22 % от общей площади.

В процессе проведения натурного эксперимента была подготовлена ледовая площадка, выполнены измерения температуры (рис. 3) на участках льда без баннеров и с баннерами различного цвета. По окончании эксперимента осуществлен анализ полученных данных.

Измерения температуры проводились с помощью датчиков температуры ИТП-МГ4. Участки с однородной температурой поверхности льда были выбраны на максимальном удалении от расположения распределительных коллекторов системы холодоснабжения, чтобы минимизировать разность температур над подающим и обратным трубопроводами [5].

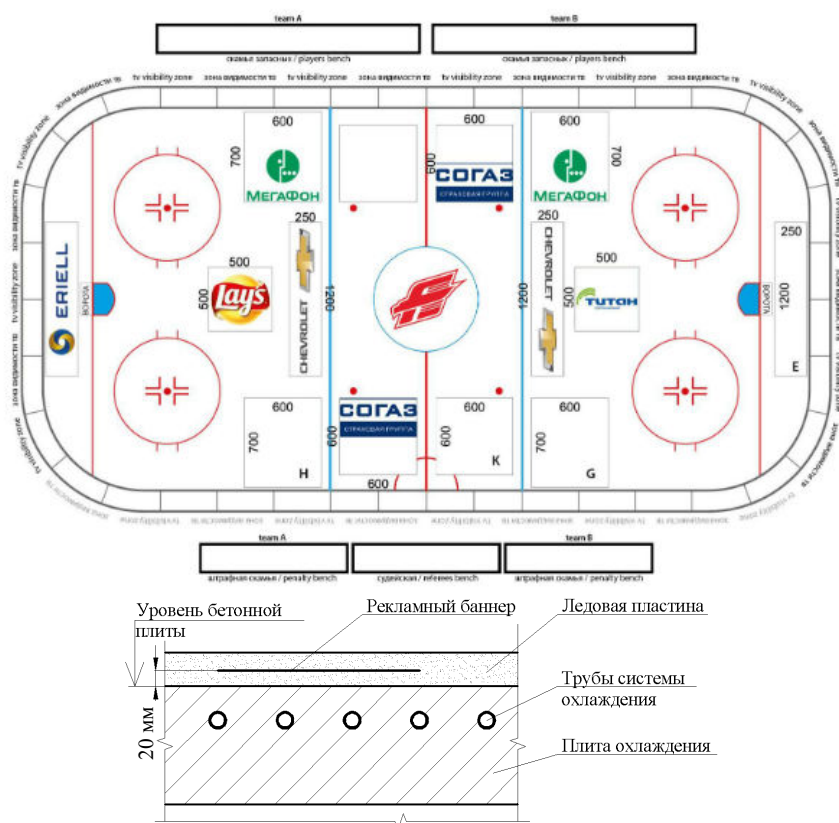


Рис. 2. Схема расположения рекламных баннеров на ледовой площадке и внутри ледовой пластины

Fig. 2. Layout of advertising banners on the ice platform and inside the ice plate

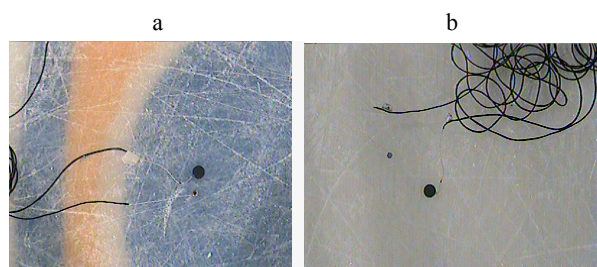


Рис. 3. Фото измерения температуры поверхности льда в зоне: а – расположения рекламного баннера; б – чистого льда без баннера

Fig. 3. Photos of measuring temperature of the ice surface: а – in the area of the advertising banner; б – in the area of pure ice without a banner

Результаты измерения температуры поверхности льда с наличием рекламного баннера разного цвета в теле льда приведены в табл. 1.

Как видно из полученных в результате измерений данных, диапазон изменения средней температуры поверхности льда для рекламных баннеров разных цветов составляет

$$\Delta t_{\text{л.ср}} = \max(t_{\text{л.ср}}) - \min(t_{\text{л.ср}}) = -6,66 - (-6,78) = 0,12 \text{ (}^{\circ}\text{C)}. \quad (1)$$

Таблица 1

Результаты измерения температуры поверхности льда с наличием рекламных баннеров разного цвета в теле льда

Results of measuring the temperature of the ice surface with advertising banners of different colors in the body of ice

Цвет баннера в теле льда	Среднее значение температуры льда серии измерений $t_{\text{л.ср}}, ^{\circ}\text{C}$	Полная погрешность измерений $\Delta U, ^{\circ}\text{C}$	Относительная погрешность измерений $\delta, \%$
Желтый	-6,76	$\pm 0,16$	2,4
Черный	-6,76	$\pm 0,11$	1,6
Зеленый	-6,68	$\pm 0,15$	2,2
Красный	-6,66	$\pm 0,12$	1,8
Синий	-6,75	$\pm 0,11$	1,7
Участок льда без баннера	-6,78	$\pm 0,11$	1,6

Как видно из данных табл. 1 и расчета по формуле (1), влияние цвета баннера на температурную неоднородность на поверхности льда составляет 24 % ($0,12 \text{ }^{\circ}\text{C} / 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot 100 \% = 24 \%$), что можно считать существенным при условии, что разность температур в любых двух точках поверхности ледовой пластины допускается не более $0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, наличие реклам-

ного баннера может локально повысить температуру льда сверх допустимого значения.

Стоит отметить, что наибольшее повышение температуры поверхности льда наблюдается для красного и зеленого цветов баннера по сравнению с температурой участка льда без баннера. В то же время температура поверхности участка льда для желтого, черного и синего баннеров незначительно выше (на 0,02–0,03 °C) по сравнению с температурой участка льда без баннера. Это можно объяснить за счет того, что лед хоть и является прозрачным телом, но на ледовой площадке лучистый теплообмен преимущественно происходит с поверхностным слоем льда. В связи с чем свойства баннера поглощать и отражать лучистый тепловой поток оказывают дополнительное влияние на повышение температуры льда.

Численный эксперимент исследования процессов теплопереноса в массиве льда с рекламным баннером проводился путем решения дифференциального уравнения теплопроводности

$$\begin{aligned} \rho(x, y, z, T) c(x, y, z, T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(x, y, z, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(x, y, z, T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(x, y, z, T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + q_v, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\lambda(x, y, z, T)$, $\rho(x, y, z, T)$, $c(x, y, z, T)$ – соответственно коэффициент теплопроводности,

Вт/(м·К), плотность, кг/м³, удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К); τ – время, с; x, y, z – координаты, м; T – температура, К.

Начальные и граничные условия задавались максимально близкими к условиям проведения натурного эксперимента: температура воздуха над ледовой площадкой $t_v = 6$ °C; температура хладоносителя подающая/обратная $t_{хн} = -17,5/-14,7$ °C; коэффициенты теплопроводности рекламного баннера: $\lambda_{бумага} = 0,14$ Вт/(м·К); $\lambda_{ПЭ} = 0,41$ Вт/(м·К). Более подробно решение поставленной задачи рассмотрено в [5–8].

Расчетная схема основания ледового поля и фрагмент распределения температур в его основании представлены на рис. 4. На данном фрагменте отчетливо виден волнообразный характер распределения изотерм внутри расчетной схемы ледового поля, вызванный расположением трубопроводов с чередующейся температурой. Данный волновой характер сохраняется в теле льда ниже и выше уровня расположения рекламного баннера, что свидетельствует о незначительном влиянии, которое оказывает рекламный баннер на температуру льда.

На рис. 5 представлено распределение температуры на поверхности льда над местом размещения рекламного баннера при различных толщинах ($\delta = 0,01; 0,05; 0,1$ мм) и материалах баннера (а – бумага; б – полиэтилен).

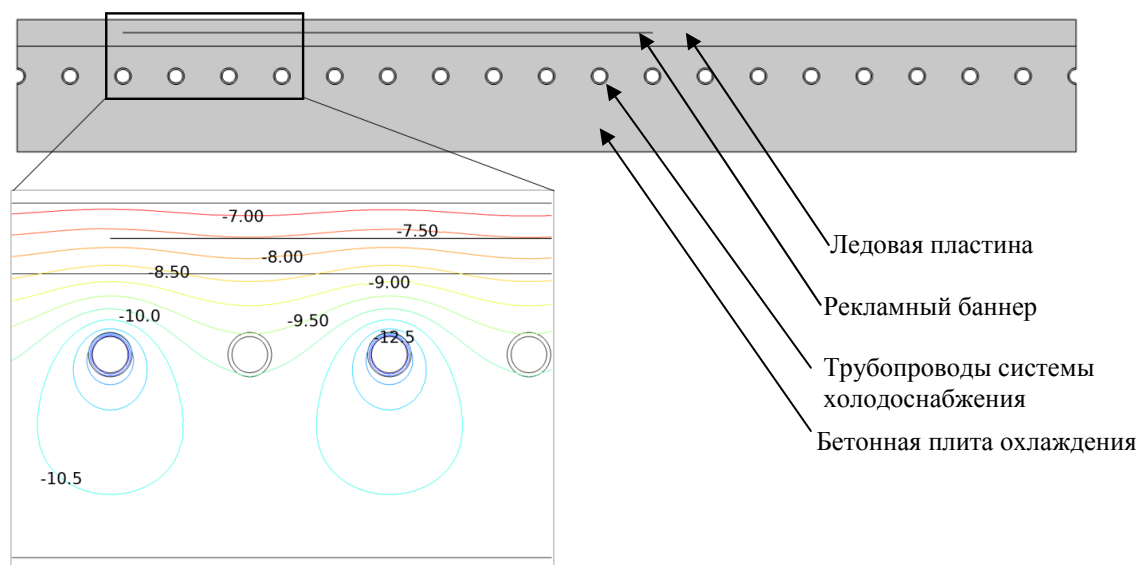


Рис. 4. Расчетная схема основания ледового поля и фрагмент распределения температур в его основании

Fig. 4. Calculation scheme of the base of the ice field and a fragment of the temperature distribution at its base

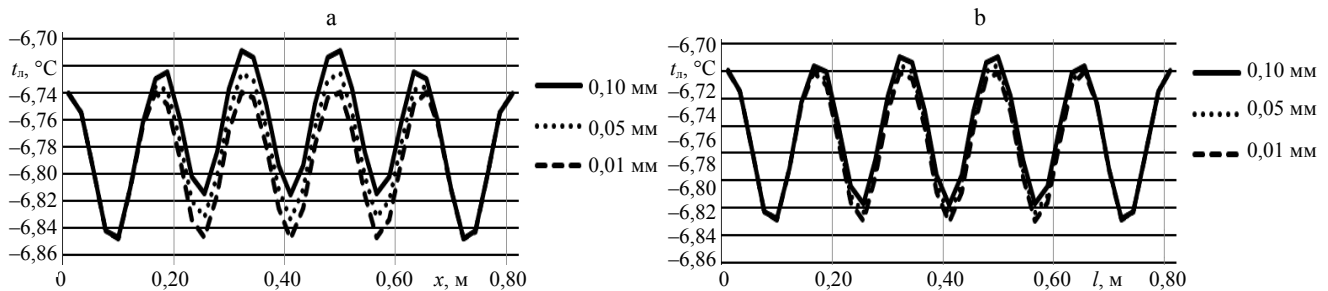


Рис. 5. Распределение температуры на поверхности льда над местом размещения рекламных баннеров при их различных толщинах ($\delta = 0,01; 0,05; 0,10$ мм) и материалах: а – бумага; б – полиэтилен

Fig. 5. Temperature distribution on the ice surface above the location advertising banner with different thickness ($\delta = 0.01$ mm; 0.05 mm; 0.10 mm) and banner material: а – paper; б – polyethylene

Установлено: влияние рассмотренных рекламных баннеров на температуру поверхности льда малозначительное, повышение температуры составляет $0,01$ – $0,03$ °C, что приводит к увеличению температурной неоднородности на поверхности льда на 6% ($0,03$ °C / $0,5$ °C $\times 100\% = 6\%$). Это вызвано дополнительным термическим сопротивлением, создаваемым баннером в теле льда, что приводит к локальному повышению температуры льда. Рекомендуется применять рекламные баннеры с толщиной листа менее $0,1$ мм и коэффициентом теплопроводности по величине, близкой к коэффициенту теплопроводности водного льда.

На рис. 6 представлено распределение температуры на поверхности льда в зависимости от высоты расположения рекламного баннера из полиэтиленовой пленки толщиной $0,1$ мм над поверхностью бетонной плиты охлаждения ($h = 0,02; 0,01; 0,005$ м). Как видно из графиков рис. 6, высота расположения рекламного баннера над плитой охлаждения оказывает малозначительное влияние на температуру поверхности льда, повышение температуры состав-

ляет $0,01$ °C, что приводит к увеличению температурной неоднородности на поверхности льда на 2% ($0,01$ °C / $0,5$ °C $\cdot 100\% = 2\%$).

Изменения температуры на поверхности льда на участках над подающим и обратным трубопроводами системы холодоснабжения для рекламных баннеров, выполненных из полиэтиленовой пленки толщиной $0,1$ мм, приведены на рис. 7.

Необходимо отметить, что процесс намораживания льда в зоне расположения рекламного баннера проходит несколько медленнее по сравнению с зоной без баннера. Данный факт подтверждается формой графика на рис. 7б. Так, графики изменения температур с течением времени над подающим и обратным трубопроводами системы холодоснабжения над баннером смещены по шкале времени вправо (рис. 7б) по сравнению с графиками изменения температур без баннера (рис. 7а). Величина запаздывания намораживания льда в зоне расположения рекламного баннера над подающим трубопроводом составляет $\Delta t = 1,5$ мин и над обратным трубопроводом $\Delta t = 2,3$ мин.

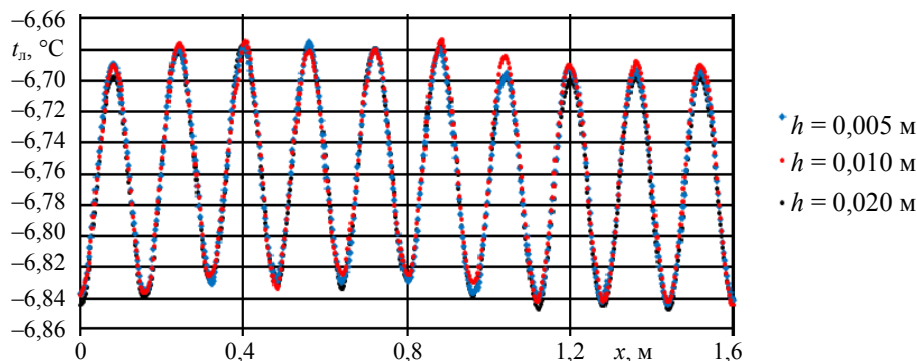


Рис. 6. График изменения температуры на поверхности льда при различной высоте расположения рекламного баннера над плитой охлаждения ($h = 0,020; 0,010; 0,005$ м)

Fig. 6. Graph of temperature changes on the ice surface at different heights of the advertising banner above the cooling plate ($h = 0.020$ m; 0.010 m; 0.005 m)

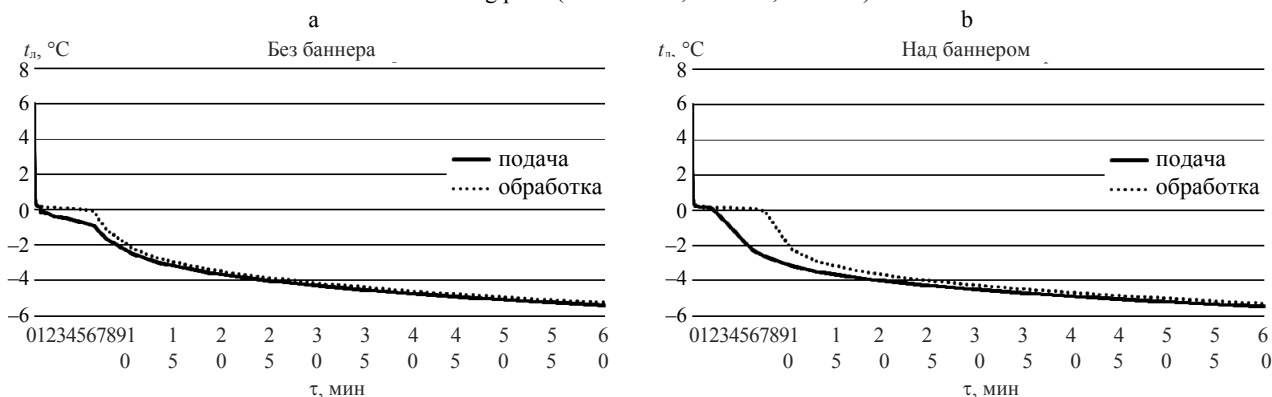


Рис. 7. Изменение температуры поверхности льда над подающим и обратным трубопроводами системы холодоснабжения в месте отсутствия (а – без баннера) и расположения рекламного баннера (б – над баннером) в теле льда при намораживании слоя льда толщиной 1 мм (материал баннера – полиэтилен толщиной 0,1 мм)

Fig. 7. Changes in the temperature of the ice surface above the supply and return pipelines of the refrigeration supply system in the place of absence (a – “without a banner”) and the location of an advertising banner (b – “above the banner”) in the ice body when freezing a layer of ice with a thickness of 1 mm (material of the banner is polyethylene with a thickness of 0.1 mm)

Установлено, что наличие рекламных баннеров в теле льда создает условия для более медленного намораживания ледового поля в местах их расположения. Данное обстоятельство приводит к тому, что вода не будет успевать перейти в лед за отведенный период времени, например во время хоккейного матча, когда за 15 мин перерыва технические службы должны восстановить поверхность льда.

ВЫВОДЫ

1. Наличие рекламных баннеров и логотипов команд в теле льда крытых ледовых площадок оказывает существенное влияние на температуру поверхности льда, что подтверждается проведенными натурными экспериментами.

2. Рекламные баннеры создают дополнительное термическое сопротивление, что приводит к локальному повышению температуры льда. Рекомендуется применять рекламные баннеры с толщиной листа менее 0,1 мм и коэффициентом теплопроводности по величине, близкой к коэффициенту теплопроводности водного льда.

3. Высота расположения рекламного баннера относительно плиты охлаждения оказывает малозначительное влияние на температуру поверхности льда, повышение температуры составляет $0,01$ °C, что приводит к увеличению

температурной неоднородности на поверхности льда на 2 % ($0,01$ °C / $0,5$ °C · 100 % = 2 %).

4. Рекламные баннеры в теле льда замедляют процесс намораживания льда в зоне расположения рекламного баннера по сравнению с участками льда без баннера на ледовой площадке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство ИИХФ по ледовым аренам [Электронный ресурс] / International Ice Hockey Federation. 2016. Режим доступа: https://blob.iihf.com/iihf-media/iihfimvc/media/downloads/projects/ice%20rink%20guide/iihf_ice_rink_guide_rus_web.pdf. Дата доступа: 21.08.2023.
2. Рекомендации по проектированию инженерного оборудования искусственных катков (хладотехническая часть) / Ленингр. зон. науч.-исслед. и проект. ин-т типового и эксперим. проектирования жилых и обществ. зданий «ЛенЗНИИЭП» Госгражданстроя. Л.: [б. и.], 1972. 100 с.
3. Ice Rinks // ASHRAE Handbook. Refrigeration / Amer. Soc. of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Eng. Atlanta, 2002. Chap. 34. P. 34.1–34.11.
4. Рекомендации по проектированию конструкций основания ледовых площадок многофункциональных сооружений: Р 03.02.178–2019: [для проектировщиков, инженерно-технических работников и студентов технических вузов] / Министерство архитектуры и строительства, Министерство спорта и туризма Республики Беларусь, Белорусский национальный технический университет, Многофункциональный культурно-спортивный комплекс «Минск-арена» / сост.: П. И. Дячек, Д. Г. Ливанский. Минск: БНТУ, 2019. 81 с.
5. Ливанский, Д. Г. Температурно-влажностный режим ледовых площадок многофункциональных сооруже-

- ний [Электронный ресурс]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Д. Г. Ливанский; Белорусский национальный технический университет. Минск, 2020. Режим доступа: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/77756/Temperaturno_vlazhnostnyj_rezhim_ledovyh_ploschadok_mnogofunkcionalnyh_sooruzhenij.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
6. Дячек, П. И. Температурная неоднородность поверхности ледового поля крытых искусственных катков / П. И. Дячек, Д. Г. Ливанский // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2010. № 2. С. 41–47.
 7. Ливанский, Д. Г. Анализ методов расчета и процессов формирования температурного режима основания ледового поля / Д. Г. Ливанский // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2010. № 6. С. 74–80.
 8. Ливанский, Д. Г. Физико-математическая модель процессов формирования ледового поля / Д. Г. Ливанский // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2011. № 1. С. 69–79.
 9. Livanski, D. G. Temperature Mode of an ice Covering of Sports Construction / D. G. Livanski // *Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources: proc. of the VII Minsk intern. Seminar, Minsk, 8–11 Sept. 2008 / NIS Sci. Assoc. "Heat Pipes" [et al.]; редкол.: Л. Л. Васильев, А. С. Журавлев, Л. В. Драгун. Minsk, 2008. P. 412–418.*
 10. Ливанский, Д. Г. Математическое моделирование температурного режима ледовых арен / Д. Г. Ливанский // 20-й Международный научно-промышленный форум «Великие реки'2018»: [труды научного конгресса]: в 3 т. / Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т; отв. ред. А. А. Лапшин. Н. Новгород: ННГАСУ, 2018. Т. 3. С. 420–423.
- Поступила 10.08.2023
Подписана в печать 11.10.2023
Опубликована онлайн 30.11.2023
- ЛИТЕРАТУРА
1. Internartional Ice Hockey Fedetation (2016) *IIHF Ice Arena|Guide*. Available at: https://blob.iihf.com/iihf-media/iihfmvc/media/downloads/projects/ice%20rink%20guide/iihf_ice_rink_guide_rus_web.pdf (accessed 21 August 2023) (in Russian).
 2. Leningrad Zonal Research and Design Institute of Typical and Experimental Design of Residential and Public Buildings of State Committee for Civil Engineering and Architecture (1972). *Recommendations for the Design of Engineering Equipment for Artificial Skating Rinks (Refrigeration Part)*. Leningrad. 100 (in Russian).
 3. Amer. Soc. of Heating, Refrigerating a. Air Conditioning Eng (2002) Chap. 34. Ice Rinks. *ASHRAE Handbook. Refrigeration*. Atlanta, 34.1–34.11.
 4. P 03.02.178–2019. Recommendations for the Design of Basestructures for Ice Rinks of Multifunctional Structures. Minsk, Belarusian National Technical University, 2019. 81 (in Russian).
 5. Livanskiy D. G. (2020) *Temperature and Humidity Conditions of Ice Rinks of Multifunctional Structures. Dissertation of Candidate of Technical Sciences*. Minsk, 2020. Available at: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/77756/Temperaturno_vlazhnostnyj_rezhim_ledovyh_ploschadok_mnogofunkcionalnyh_sooruzhenij.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
 6. Diachek P. I., Livanskiy D. G. (2010) Temperature Non-Uniformity of Ice-Field Surface at Covered Skating-Rinks. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (2), 41–47 (in Russian).
 7. Livanskiy D. G. (2010) Analysis of Methods for Calculation and Processes Pertaining to Formation of Temperature Regime of Ice Field Foundation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (6), 74–80 (in Russian).
 8. Livanskiy D. G. (2011) Physical and Mathematical Model of Ice-Field Formation Processes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 69–79 (in Russian).
 9. Livanski D. G. (2008) Temperature mode of an ice covering of sports construction. Vasiliev L. L., Zhuravliov A. S., Dragun L. V. (eds). *Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources: Proceedings of the 7th Minsk International Seminar, Minsk, September 8–11, 2008*. Minsk, 412–418 (in Russian).
 10. Livanskiy D. G. (2018) Mathematical Modeling of the Temperature Regime of Ice Arenas. 20-i Mezhdunarodnyi Nauchno-Promyshlennyi Forum «Velikie Reki'2018»: Trudy Nauchnogo Kongressa. T. 3 [20th International Scientific and Industrial Forum "Velikie Reki [Great Rivers]-2018": Proceedings of Scientific Congress. Vol. 3]. Nizhny Novgorod, NNGASU Publishing House, 420–423 (in Russian).

Received: 10.08.2023

Accepted: 11.10.2023

Published online: 30.11.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-508-518>

УДК 620.97

О целесообразности строительства мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях Республики Беларусь

Часть 2

Роль мини-ТЭЦ в системах теплоснабжения городов и населенных пунктов Беларуси

Докт. техн. наук, проф. В. А. Седнин¹⁾, асп. Р. С. Игнатович¹⁾, И. Л. Иокова¹⁾

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

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

Реферат. В рамках обеспечения энергетической безопасности страны и проведения политики декарбонизации экономики в Республике Беларусь предполагается максимальное использование собственных топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Однако открытым остается вопрос выбора вида теплоисточника в системах централизованного теплоснабжения при использовании местных видов топлива (МВТ). Ввод в эксплуатацию Белорусской АЭС и относительно высокая удельная стоимость электрогенерирующих мощностей на МВТ склоняют чашу весов к применению в качестве теплоисточников котельных. Исходя из мирового опыта развития и применения теплофикации как наиболее энергоэффективного решения в области теплоснабжения, исследована данная проблема в условиях Республики Беларусь. Показано, что электрическая мощность мини-ТЭЦ на традиционных МВТ, подключенных к объединенной системе страны, составляет менее 100 МВт, а основными технологиями, реализованными на мини-ТЭЦ на МВТ в Республике Беларусь, являются традиционные ПСУ с водяным паром в качестве рабочего тела (11 электростанций) и ПСУ с органическим циклом Ренкина (ОРЦ) (3 электростанции). Географически мини-ТЭЦ, работающие на МВТ, расположены равномерно по всей территории Республики Беларусь. Определено число часов использования установленной мощности возобновляемых источников энергии Республики Беларусь. Явное преимущество имеют энергоисточники на органических отходах и биомассе (свыше 4000 ч/год) и на гидроресурсах (около 3500 ч/год), для которых показатель числа часов использования установленной мощности значительно выше, чем для установок солнечной и ветровой энергетики. Кроме того, генерирующие мощности на биомассе имеют наименьший коэффициент поставки электроэнергии в Объединенную энергетическую систему Беларуси. На основе анализа современных тенденций развития энергетики сформулированы технико-экономические «факторы привлекательности» строительства теплофикационных систем теплоснабжения на МВТ в условиях Беларуси, к которым, помимо традиционных факторов (замещение импортируемого топлива – природного газа и нефти), относятся повышение качества и надежности энергообеспечения потребителей в удаленных точках, развитие полигенерации, снижение потерь электрической энергии на ее транспорт, участие в покрытии электрического графика нагрузок объединенной энергосистемы, а также указана возможность создания на базе мини-ТЭЦ энергетического хаба, структурированного под интеграцию энергетических подотраслей, источников распределенной генерации и опцию генерации «зеленых» энергоносителей.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, возобновляемые источники энергии, декарбонизация, местные виды топлива, мини-ТЭЦ, мультиэнергетическая система, энергетический хаб, топливно-энергетические ресурсы, «факторы привлекательности»

Для цитирования: Седнин, В. А. О целесообразности строительства мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях Республики Беларусь. Ч. 2: Роль мини-ТЭЦ в системах теплоснабжения городов и населенных пунктов Беларуси / В. А. Седнин, Р. С. Игнатович, И. Л. Иокова // *Наука и техника*. 2023. № 6. С. 508–518. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-508-518>

Адрес для переписки

Седнин Владимир Александрович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
sednin@bntu.by

Address for correspondence

Sednin Vladimir A.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
sednin@bntu.by

On the Feasibility of Building Mini-Thermal Power Plant Using Local Fuels in the Conditions of the Republic of Belarus

Part 2

Role of Mini-Thermal Power Plant in Heat Supply Systems of Cities and Settlements in Belarus

V. A. Sednin¹⁾, R. S. Ignatovich¹⁾, I. L. Iokova¹⁾

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

Abstract. Within the framework of ensuring the country's energy security and pursuing a policy of decarbonization of the economy in the Republic of Belarus, it is assumed to maximize the use of its own fuel and energy resources (TER). However, the question of choosing the type of heat source in centralized heat supply systems when using local fuels (LF) remains open. The commissioning of the Belarusian Nuclear Power Plant and the relatively high unit cost of power generation capacities running on LF inclines the scales to use boiler houses as heat sources. Based on the world experience in the development and application of heating as the most energy-efficient solution in the field of heat supply, this problem has been studied in the conditions of Belarus. It is shown that the electric capacity of mini-thermal power plants using traditional LF connected to the unified system of the country is less than 100 MW, and the main technologies implemented at mini-thermal power plants using LF in the Republic of Belarus are traditional steam power plants with water steam as the working fluid (11 power plants) and steam power plant with organic Rankine cycle (ORC) (3 power plants). Geographically, mini-thermal power plants operating on LF are located evenly throughout the entire territory of the Republic of Belarus. The number of hours of use of the installed capacity of renewable energy sources (RES) of the Republic of Belarus has been determined. Energy sources based on organic waste and biomass (over 4,000 hours per year) and on hydro resources (about 3,500 hours per year) have a clear advantage, for which indicator of the number of hours of installed capacity use is much higher than for solar and wind power installations. In addition, biomass generating capacities have the lowest coefficient of electricity supply to the combined energy system. Based on the analysis of modern trends in the development of energy, technical and economic “attractiveness factors” for the construction of heating systems for heat supply on LF in the conditions of Belarus have been formulated, which, in addition to traditional factors (substitution of imported fuel – natural gas and oil), include improvement of the quality and reliability of energy supply to consumers in remote locations, development of polygeneration, reduction of losses of electric energy for its transport, participation in covering the electric load schedule of the unified power system, and also indicated the possibility of creating an energy hub on the basis of a mini-thermal power plant, structured for the integration of energy sub-sectors, distributed generation sources and the option of generating “green” energy carriers.

Keywords: energy security, renewable energy sources, decarbonization, local fuels, mini-thermal power plants, multi-energy system, energy hub, fuel and energy resources, attractiveness factors

For citation: Sednin V. A., Ignatovich R. S., Iokova I. L. (2023) On the Feasibility of Building Mini-Thermal Power Plant Using Local Fuels in the Conditions of the Republic of Belarus. Part 2: Role of Mini-Thermal Power Plant in Heat Supply Systems of Cities and Settlements in Belarus. *Science and Technique*. 22 (6), 508–518. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-508-518> (in Russian)

Введение

Развитие атомной энергетики в Беларуси в последние десятилетия привело к вводу в 2023 г. в эксплуатацию двух энергоблоков общей мощностью 2,4 ГВт, что в корне меняет структуру энергетического баланса страны и позволяет сократить долю природного газа в нем с 90 до 60 % [4]. В то же время, для достижения целей обеспечения энергетической безопасности страны по индикатору «доля доминирующего вида топлива в валовом потреблении ТЭР» к 2035 г. удельный вес природного газа необходимо снизить до 50 % [2]. В работе [3] для достижения требуемой диверсифика-

ции топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) предлагается большое внимание уделить развитию теплофикации на местных видах топлива (МВТ), что в целом соответствует концепции развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей на период до 2030 г. [4], согласно которой при разработке систем теплоснабжения, удаленных от системы централизованного теплоснабжения населенных пунктов и районов, а также сельской местности необходимо производить оценку целесообразности использования МВТ. При этом нужно учитывать результаты инновационных тенденций развития экономики и, в первую очередь, изменения, которые несут цифровизация, а так-

же интеграция энергетики со смежными подотраслями. Следует также отметить, что тренд развития энергоисточников на МВТ в Беларуси совпадает с целями мирового сообщества по декарбонизации экономики и сокращению выбросов вредных веществ в атмосферу [5, 6].

В [3, 7] отмечено, что за последнее десятилетие в Республике Беларусь проведен комплекс мероприятий по повышению вовлеченности МВТ в структуру ТЭР, но актуальным для исследований остается вопрос эффективности строительства и эксплуатации мини-ТЭЦ, работающих на МВТ, с учетом профицита электрогенерирующих мощностей в объединенной энергосистеме страны [8].

Основная часть

Согласно [9], по состоянию на 1 сентября 2020 г., суммарная электрическая мощность установок ВИЭ в Республике Беларусь составляла 491 МВт, из которых порядка 89 МВт вырабатывалось на 10 мини-ТЭЦ, использующих древесное топливо. Вместе с этим в отчете МЭА по энергетическому профилю Республики Беларусь [10] на декабрь 2018 г. показано, что всего в стране эксплуатировалось 22 мини-ТЭЦ, использующих местные ТЭР, к которым помимо традиционной биомас-

сы отнесены попутный нефтяной газ, а также твердые бытовые отходы (ТБО), с установленной электрической мощностью 130 МВт и тепловой мощностью 345 МВт.

Информация об основных мини-ТЭЦ Республики Беларусь, работающих на традиционных для страны МВТ, а именно биомассе, представлена в табл. 1. Энергоисточники, использующие в качестве топлива биогаз, в сводную таблицу не вносились.

Из анализа табл. 1 следует, что основными технологиями, реализованными на мини-ТЭЦ на МВТ в Республике Беларусь, являются традиционные ПСУ с водяным паром в качестве рабочего тела (11 электростанций) и ПСУ с органическим циклом Ренкина (ОРЦ) (на мини-ТЭЦ в г. Речице (Гомельская область), п. Сосны (Минской области) и г. п. Барань (Витебская область)). На рис. 1 приведена информация по расположению мини-ТЭЦ, работающих на МВТ, на территории Республики Беларусь. По результатам установления квот на строительство возобновляемых источников энергии на период 2021–2023 гг. [25] в Республике Беларусь планировалось строительство 5,6 МВт новых электрических мощностей с использованием энергии биомассы.

Таблица 1

Общая информация о мини-ТЭЦ на МВТ в Республике Беларусь
General information about mini-thermal power plants on local fuels in the Republic of Belarus

Наименование объекта	Электрическая мощность, МВт	Тепловая мощность, МВт	Топливо	Технология выработки электроэнергии	Источник
Мини-ТЭЦ, г. Лунинец	4,7	72,6	Щепа	ПСУ	[11, 12]
Мини-ТЭЦ, г. п. Барань	3,25	16,5	Щепа / торф	ORC	[11, 13]
Мини-ТЭЦ, г. Речица	4,2	19,6	Торф	ORC	[11, 14]
Мини-ТЭЦ, г. Петриков	1,2	7,5	Щепа	ПСУ	[15]
Мини-ТЭЦ, г. Пружаны	3,7	13,8	Щепа / торф	ПСУ	[11, 16]
Мини-ТЭЦ Вилейка	2,4	16	Щепа	ПСУ	[16, 17]
Мини-ТЭЦ, г. Калинковичи	1,39	6,5	Щепа	ПСУ	[15, 18]
Мини-ТЭЦ, г. Волковыск	1,3	8	Щепа	ПСУ	[15]
Мини-ТЭЦ, Сосны	1,3	5,5	Щепа	ORC	–
Осиповическая мини-ТЭЦ	1,2	н/д	Древесина / торф	ПСУ	[11, 19]
Мини-ТЭЦ ОАО «ФандОК», г. Бобруйск	1,6	н/д	Отходы производства	ПСУ	[20]
Мини-ТЭЦ, г. Пинск	2,7	4	Древесина	ПСУ	[20–22]
Мини-ТЭЦ, г. Ореховск	1,5	н/д	Древесина / торф	ПСУ	[20, 23]
Мини-ТЭЦ ОАО «Мостодрев»	2,4	н/д	Древесина	ПСУ	[20, 24]

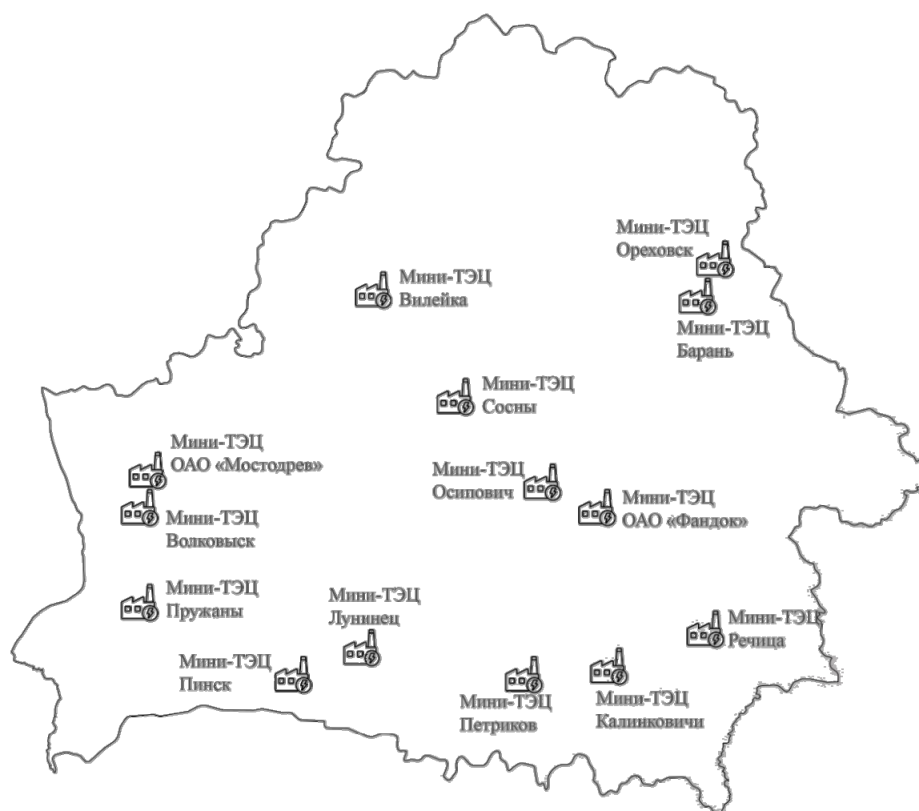


Рис. 1. Распределение мини-ТЭР на МВТ на карте Республики Беларусь

Fig. 1. Distribution of mini-thermal power plants on local fuels on the map of the Republic of Belarus

Интерес также представляют данные ГПО «Белэнерго» [26], отражающие генерацию электроэнергии за период 2020–2022 гг. энер-

гоисточниками на ВИЭ, подключенными к электрическим сетям объединенной энергосистемы (табл. 2).

Таблица 2

Изменение мощности и выработки электроэнергии блок-станциями, работающими на ВИЭ и подключенными к электросетям энергоснабжающих организаций ГПО «Белэнерго» за период 2020–2022 гг.

Changes in power and electricity production of block stations operating on renewable energy sources and connected to the power grids of energy supply organizations of the State Production Association “Belenergo” for the period 2020–2022

Блок-станция, работающая на ВИЭ	Показатель блок-станции, единица измерения	Период времени			Изменение (рост, падение) 2022 г./2021 г.	
		2020 г.	2021 г.	2022 г.	нат. ед.	%
1	2	3	4	5	6	7
Солнечная энергия	$W_{уст}^1$, МВт	160,3	163,4	272,8	109,40	66,95
	$T_{уст}^2$, ч/год	1093	1064	765	–298,62	–28,07
	$E_{год}^3$, ГВт·ч	175,2	173,8	208,7	34,90	20,08
	$E_{отп}^4$, $\frac{ГВт \cdot ч}{\%}$	174,7	173,3	204,1	30,80	17,77
		99,7	99,7	97,8	–1,92	–1,92
Ветроэнергетика	$W_{уст}^1$, МВт	102,7	104,2	109,3	5,10	4,89
	$T_{уст}^2$, ч/год	1668	1465	1453	–12,57	–0,86
	$E_{год}^3$, ГВт·ч	171,3	152,7	158,8	6,10	3,99
	$E_{отп}^4$, $\frac{ГВт \cdot ч}{\%}$	165,7	148,2	154,2	6,00	4,05
		96,7	97,05	97,10	0,05	0,05

1	2	3	4	5	6	7
Гидроэнергетика	$W_{уст}^1$, МВт	7,7	7,7	7,6	–0,10	–1,30
	$T_{уст}^2$, ч/год	3494	3390	3474	84,07	2,48
	$E_{год}^3$, ГВт·ч	26,9	26,1	26,4	0,30	1,15
	$E_{отп}^4$, $\frac{\text{ГВт} \cdot \text{ч}}{\%}$	26,6	25,8	26,1	0,30	1,16
		96,7	97,1	97,1	0,05	0,05
Древесное топливо	$W_{уст}^1$, МВт	3,1	3,2	3,5	0,30	9,37
	$T_{уст}^2$, ч/год	1903	1656	1086	–570,54	–34,45
	$E_{год}^3$, ГВт·ч	5,9	5,3	3,8	–1,50	–28,30
	$E_{отп}^4$, $\frac{\text{ГВт} \cdot \text{ч}}{\%}$	4,8	4,2	2,9	–1,30	–30,95
		96,7	97,1	97,1	0,05	0,05
Биогаз	$W_{уст}^1$, МВт	37,3	37	41,4	4,40	11,89
	$T_{уст}^2$, ч/год	5501	5535	4744	–791,17	–14,29
	$E_{год}^3$, ГВт·ч	205,2	204,8	196,4	–8,40	–4,10
	$E_{отп}^4$, $\frac{\text{ГВт} \cdot \text{ч}}{\%}$	190,6	193,3	182,9	–10,40	–5,38
		96,7	97,1	97,1	0,05	0,05
Биомасса	$W_{уст}^1$, МВт	80	76	76	0,00	0,00
	$T_{уст}^2$, ч/год	3286	4364	4192	–172,37	–3,95
	$E_{год}^3$, ГВт·ч	262,9	331,7	318,6	–13,10	–3,95
	$E_{отп}^4$, $\frac{\text{ГВт} \cdot \text{ч}}{\%}$	51,9	68,4	73,9	5,50	8,04
		1,9	2	2	0,00	0,00
Иные возобновляемые источники	$W_{уст}^1$, МВт	0,5	0,5	0,5	0,00	0,00
	$T_{уст}^2$, ч/год	4000	4200	4000	–200,00	–4,76
	$E_{год}^3$, ГВт·ч	2	2,1	2	–0,10	–4,76
	$E_{отп}^4$, $\frac{\text{ГВт} \cdot \text{ч}}{\%}$	1,9	2	2	0,00	0,00
		95,0	95,2	100,0	4,76	5,00
Всего	$W_{уст}^1$, МВт	391,6	392	511,1	119,10	30,38
	$T_{уст}^2$, ч/год	2169	2287	1790	–497,32	–21,75
	$E_{год}^3$, ГВт·ч	849,4	896,5	914,7	18,20	2,03
	$E_{отп}^4$, ГВт·ч	616,3	615,2	646,1	30,90	5,02

Примечания: $W_{уст}$ – установленная мощность, МВт; $T_{уст}$ – число часов использования установленной мощности, ч/год; $E_{год}$ – выработка электроэнергии, всего, ГВт·ч; $E_{отп}$ – поставка электроэнергии в сеть РУП-облэнерго, ГВт·ч.

Следует иметь в виду, что представленные данные не учитывают генерирующие мощности на ВИЭ по объектам организаций Министерства энергетики Республики Беларусь, в составе 24 ГЭС установленной мощностью 88,105 МВт и одной ветроэнергетической станции установ-

ленной мощностью 9 МВт (6 ветрогенераторов по 1,5 МВт каждый). Особое внимание нужно обратить на число часов использования установленной мощности, определенных авторами при анализе вышеуказанных данных. Явное преимущество имеют энергоисточники на ор-

ганических отходах, биомассе и гидроресурсах, для которых этот показатель значительно выше, чем для установок солнечной и ветровой энергетики. Кроме того, генерирующие мощности на биомассе имеют наименьший коэффициент поставки электроэнергии в объединенную энергетическую систему.

В [3] приведена информация об энергетической стратегии и динамике структуры ТЭР Эстонии, Финляндии и Дании. Можно отметить, что общим для энергетических систем данных стран является то, что в условиях отсутствия значительных запасов нефти, природного газа, а также высокого потенциала для развития гидроэнергетики свое развитие в области теплоснабжения получила централизованная система теплоснабжения и теплофикация с генерацией энергии из твердой биомассы. И с этой точки зрения наиболее интересным для нас является опыт энергетики Финляндии, чья энергетическая стратегия подразумевает увеличение доли ТЭЦ на МВТ. Во-первых, в этой стране доля ядерной энергии в структуре выработки электрической энергии в 2021 г. составляла 33 % и, как ожидается, вырастет до 40 % [27]. В Беларуси, как отмечалось ранее в [3], планируется примерно такая же доля выработки электрической энергии на АЭС. Во-вторых, в Финляндии, так же как в Республике Беларусь, имеются большие запасы древесины, а также хорошо развитая деревообрабатывающая промышленность. Обе страны стремятся к сокращению доли природного газа в структуре ТЭР: Финляндия для достижения поставленных целей по декарбонизации экономики, а Республика Беларусь в целях повышения энергетической безопасности и диверсификации структуры ТЭР. В то же время, рассмотренные в [3] страны отличаются своими возможностями по использованию солнечной и ветровой энергетики. Беларусь из-за своего географического расположения не имеет значительного потенциала по использованию этих видов энергии. Следовательно, в рамках выбора возобновляемых видов энергии (солнечной, гидро-, ветровой, геотермальной и биомассы) для нас наиболее перспективной является биомасса, что подтверждается анализом данных табл. 2. Явное преимущество по критерию использования установленной мощности имеют энергоисточ-

ники на биогазе (около 5000 ч/год), органических отходах и биомассе (свыше 4000 ч/год) и гидроресурсах (около 3500 ч/год), для которых этот показатель значительно выше, чем для установок солнечной и ветровой энергетики.

После ввода в эксплуатацию двух блоков АЭС в Республике Беларусь возникнет профицит электрической энергии в структуре энергетического баланса страны [8]. В связи с этим строительство новых мини-ТЭЦ кажется слишком дорогим и нецелесообразным. Вместе с тем в [28] указывается, что удельный расход условного топлива на производство электрической энергии на существующих мини-ТЭЦ составляет 164,2–189,1 г у. т./(кВт·ч), что на 20 % ниже общего значения по энергосистеме. При этом стоимость капитальных вложений при строительстве мини-ТЭЦ на МВТ зависит от выбранной технологии выработки электрической энергии, а также установленной электрической мощности и, согласно различным источникам, варьируется в диапазоне от 1500 евро/кВт [29] до 3000 евро/кВт электрической мощности (при газификации биомассы) [29, 30]. Важным фактором, влияющим на результаты расчета экономической эффективности, является соотношение стоимости природного газа к стоимости биомассы, изменение которого непостоянно и, как следствие, достаточно трудно прогнозируемо в долгосрочной перспективе. При этом следует помнить, что деньги, на которые закупается биомасса, работают на поддержание внутреннего рынка, а не уходят за границу в виде иностранной валюты, как, например, это происходит при закупке импортного природного газа. Таким образом, капитальные вложения в строительство мини-ТЭЦ могут оказаться оправданными даже без введения существенных дополнительных повышенных тарифов на генерацию ВИЭ, которые могли бы отразиться на тарифах для потребителей.

При этом одним из главных преимуществ при обосновании целесообразности строительства мини-ТЭЦ в Финляндии [3] является наличие в стране собственного производства необходимого оборудования. Например, мини-ТЭЦ в Пружанах построена в основном с использованием оборудования, поставляемого из данной страны. Однако за последние годы в Республике Беларусь также было налажено произ-

водство части необходимого оборудования. Это касается, в первую очередь, котельного оборудования. Увеличение доли собственного производства необходимого оборудования значительно снижает капитальные затраты при строительстве мини-ТЭЦ на МВТ, способствует созданию новых рабочих мест, развитию в стране новых технологий, а также сокращает затраты на транспортировку оборудования, в результате чего привлекательность инвестиций в мини-ТЭЦ значительно увеличится.

Помимо этого, в районах, отдаленных от АЭС и других крупных энергоисточников, возможно возникновение так называемых «узких мест», где потери при транспорте электроэнергии слишком велики, а степень надежности и качества энергоснабжения недостаточна, особенно при чрезвычайных обстоятельствах. Исследование электрических сетей Республики Беларусь на предмет идентификации таких мест – предмет отдельной работы, подразумевающий проведение анализа существующих сетей, а также пространственного анализа (GIS-анализа) существующих генерирующих мощностей и доступных видов топлива. Аналогично следует выполнить оценку пропускной способности тепловых сетей в определенных ранее «узких» местах, исходя из которой можно осуществлять определение плотности распределения и мощности мини-ТЭЦ, например по методологии, приведенной в работе [31] на примере китайского региона Фуцзинь.

В дополнение ко всему изложенному выше можно отметить, что на сегодняшний день в мире наблюдается повышенный интерес к ВИЭ, который проявляется в том, что инвестиции в ВИЭ в 2022 г. значительно превышают инвестиции в традиционные источники энергии, использующие ископаемые виды топлива [32], а вместе с этим наблюдается тренд к электрификации промышленности, транспорта и других отраслей экономики. При этом неизбежно возникают проблемы в балансировке производства и потребления электрической энергии в течение суток, а также в поддержании максимальной энергетической эффективности генерации. Мини-ТЭЦ, работающие на МВТ, могут участвовать в решении обозначенных проблем. Комбинированная выработка сама по себе является наиболее эффективной

технологией выработки энергии. А при интеграции на них аккумуляторов теплоты могут участвовать в сглаживании неравномерности суточного графика потребления энергии. В качестве альтернативы аккумуляторам теплоты электрическая энергия, вырабатываемая на мини-ТЭЦ, может быть использована для производства «зеленого» водорода, рассматриваемого большим количеством стран в качестве промежуточного энергоносителя в промышленности и энергетике [33], или «зеленого» синтетического природного газа, получаемого путем реализации реакции водорода и углекислого газа, извлекаемого из продуктов сгорания. Производство водорода на мини-ТЭЦ на МВТ возможно при интеграции в схему энергоисточника блока электролизеров или путем интеграции технологий термохимического производства водорода. Возможные варианты схем мини-ТЭЦ на МВТ с опцией производства водорода термохимическим методом представлены в работе [34]. Углекислый газ, необходимый для производства «зеленого» природного газа, может быть получен путем улавливания CO_2 из продуктов сгорания. Сравнительный анализ коммерчески доступных технологий улавливания углекислоты приведен в [35]. Таким образом, мини-ТЭЦ на МВТ будет являться предприятием с отрицательными выбросами загрязняющих веществ в атмосферу, работающим по энергетически более эффективной схеме комбинированной выработки энергии, способствующим сокращению использования импортного природного газа, а также участвующим в балансировке графиков производства и потребления энергии. Кроме того, сегодня в экономике возникают интеграционные тенденции в рамках смежных отраслей и, как следствие, возникает потребность в более гибких энергетических системах. В этих условиях мини-ТЭЦ на МВТ может выступить как центр локальной мультэнергетической системы (энергетического хаба) [36, 37].

Подводя итог, сформулируем технико-экономические «факторы привлекательности» строительства теплофикационных систем теплоснабжения на МВТ в условиях Беларуси:

- замещение импортируемого топлива (природного газа и нефти);
- повышение качества и надежности энергообеспечения потребителей в удаленных точках объединенной энергетической системы;

– развитие теплофикации и полигенерации (дополнительное производство таких продуктов, как холод, диоксид углерода, водород, синтетический природный газ);

– снижение потерь электрической энергии на ее транспорт;

– возможность генерации и выдачи электроэнергии в электрическую сеть по графику, задаваемому энергосистемой;

– возможность создания на базе мини-ТЭЦ энергетического хаба, структурированного под интеграцию энергетических подотраслей, источников распределенной генерации и опцию генерации «зеленых» энергоносителей.

ВЫВОДЫ

1. В статье на основе анализа открытых источников представлена информация по состоянию применения местных видов топлива в системах централизованного теплоснабжения Республики Беларусь и ряда европейских стран, имеющих опыт в широком использовании твердой биомассы. Систематизирована информация о функционирующих в нашей стране мини-ТЭЦ на МВТ с указанием мест их расположения, электрической и тепловой мощности, технологий выработки электрической энергии, часов использования установленной мощности.

2. Показано, что строительство новых мини-ТЭЦ на МВТ в Республике Беларусь целесообразно в рамках создания новых и модернизации существующих систем централизованного теплоснабжения, но эффективность строительства в каждом конкретном случае должна подтверждаться результатами комплексного технико-экономического обоснования, выполняемого с учетом как прямых, так и косвенных факторов, включающих анализ потерь в электрических сетях, возможностей топливной инфраструктуры, топологии и параметры существующих тепловых сетей, возможности работы по графику электрических нагрузок, складывающемуся в энергосистеме. Отмечено, что для снижения капитальных затрат при строительстве мини-ТЭЦ на МВТ необходимо продолжить локализацию производства нужного для их строительства оборудования на территории Республики Беларусь и создания на базе мини-ТЭЦ локальных интеграционных энерге-

тических хабов с опцией производства «зеленых» энергоносителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виктор Каранкевич: «С вводом АЭС доля природного газа в энергобалансе Беларуси снизится до 60 %» [Электронный ресурс] // Министерство энергетики Респ. Беларусь. 2022. Режим доступа: https://min.energo.gov.by/press/glavnye-novosti/viktor-karankevich-s-vvodom-aes-dolya-prirodnogo-gaza-v-energobalanse-belarusi-snizitsya-do-60-/?sphrase_id=52175. Дата доступа: 01.06.2023.
2. Об утверждении концепции энергетической безопасности Республики Беларусь [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 23 дек. 2015 г., № 1084. Режим доступа: https://minenergo.gov.by/dfiles/000608_512413_Kontseptsija.pdf.
3. Седнин, В. А. О целесообразности строительства мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях Республики Беларусь. Ч. 1: Состояние использования местных видов топлива в системах теплоснабжения / В. А. Седнин, Р. С. Игнатович, И. Л. Иокова // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 5. С. 418–427. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-418-427>.
4. Об одобрении Концепции энергетического развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей на период до 2030 года [Электронный ресурс]: постановление Министерства энергетики Респ. Беларусь, 25 фев. 2020 г., № 7. Режим доступа: <https://min.energo.gov.by/wp-content/uploads/Postanovlenie-7.pdf>.
5. Парижское климатическое соглашение [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://minpriroda.gov.by/ru/paris-ru/>. Дата доступа: 10.06.2023.
6. Иванов, Д. Л. Экстремально высокие темпы роста температуры воздуха как характерная черта и особенность климата территории Беларуси в условиях глобального потепления. / Д. Л. Иванов, Е. А. Ивашко // Развитие географических исследований в Беларуси в XX–XXI веках. Минск: БГУ, 2021. С. 329–332.
7. Войтов, И. В. Современное состояние и перспективы использования древесного топлива в Республике Беларусь / И. В. Войтов, А. В. Ледницкий // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–28 апреля 2017 г. Минск: БГТУ, 2017. С. 9–14.
8. Романюк В. Н. К вопросу о диверсификации вариантов регулирования мощности генерации Белорусской энергосистемы / В. Н. Романюк, А. А. Бобич // Энергия и менеджмент. 2015. № 6 (87). С. 3–7.
9. О Государственной программе «Энергосбережение» на 2021–2025 годы [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 24 фев. 2021 г., № 103. Pravo.by. Режим доступа: <https://pravo.by/docu ment/?guid=3871&p0=C22100103>.
10. Belarus energy profile [Electronic Resource]. IEA. Mode of access: <https://www.iea.org/reports/belarus-energy-profile>. Date of access: 20.05.2023.
11. Установленная мощность [Электронный ресурс] // Белэнерго. 2023. Режим доступа: <https://www.energo.>

- by/content/deyatelnost-obedineniya/osnovnye-pokazateli/ustanovlennaya-moshchnost/index11.php. Дата доступа: 26.05.2023.
12. Писарев, В. Лунинацкая ТЭЦ: тепло, еще теплее! / В. Писарев // Энергетика Беларуси. 2015. № 25 (331). 28 дек. С. 1.
13. Турченко, А. Мини-ТЭЦ «Барань» работает без сбоев / А. Турченко // Энергетика Беларуси. 2014. № 3 (285). 14 фев. С. 2.
14. Мини-ТЭЦ в Речице: опыт, достойный подражания // Энергетика Беларуси. 2016. № 20 (351). 27 окт. С. 1.
15. Об утверждении Государственной программы строительства энергоисточников на местных видах топлива в 2010–2015 годах: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 19 июля 2010 г., № 1076 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. 2010. № 5/32215.
16. Малая энергетика в ближайшие годы в Беларуси получит более широкое развитие [Электронный ресурс]. 2009. Режим доступа: <http://government.by/ru/content/341/print>. Дата доступа: 26.05.2023.
17. Оганезов, И. А. Перспективы использования древесных видов топлива в аграрных районах Республики Беларусь / И. А. Оганезов, В. В. Шишова // Научно-инновационная деятельность в агропромышленном комплексе: сб. науч. ст. 4-й Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 20–21 мая 2010 г.: в 2 ч. Минск: БГАТУ, 2010. Ч. 2. С. 74–77.
18. Мини-ТЭЦ на местных видах топлива открылась в Калинковичах [Электронный ресурс]. 2019. Режим доступа: <https://www.belta.by/regions/view/mini-tets-na-mestnyh-vidah-topliva-otkrylas-v-kalinkovichah-334689-2019>. Дата доступа: 15.05.2023.
19. Могилевское республиканское унитарное предприятие электроэнергетики «Могилевэнерго» – партнер МОФФ [Электронный ресурс]. 2021. Режим доступа: <http://www.moff.by/mogilevskoe-respublikanskoe-unitarnoe-predpriyatie-elektroenergetikimo-gilevenego-partner-moff-3/#:~:text=>. Дата доступа: 20.05.2023.
20. Возобновляемая энергетика [Электронный ресурс]. 2015. Режим доступа: <https://investinbelarus.by/docs/Renueable.pdf>. Дата доступа: 18.04.2023.
21. Об утверждении Государственной комплексной программы модернизации основных производственных фондов белорусской энергетической системы, энергосбережения и увеличения доли использования в республике собственных топливно-энергетических ресурсов на период до 2011 года: Указ Президента Республики Беларусь, 15 ноября 2007 г., № 575. // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. 2017. № 1/9095.
22. Богдан, Е. В. Мини-ТЭЦ на местных видах топлива в Беларуси / Е. В. Богдан, Н. Б. Карницкий // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: сб. материалов I Всероссийской науч.-практ. конф. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2014. С. 12.
23. Первенец отечественной энергетики [Электронный ресурс]. 2008. Режим доступа: <https://www.sb.by/articles/pervenets-otechestvennoy-energetiki.html>. Дата доступа: 20.05.2023.
24. Проекты [Электронный ресурс] // Возобновляемая энергетика и ресурсы. Режим доступа: <https://energy-aven.org/projects>. Дата доступа: 11.06.2023.
25. Установлены объемы квот на создание установок по использованию ВИЭ на 2021–2023 годы [Электронный ресурс]. 2020. Режим доступа: <https://minenergo.gov.by/press/novosti/ustanovleny-obemy-kvot-na-sozdanie-ustanovok-po-ispolzovaniyu-vie-na-2021-2023-gody/>. Дата доступа: 09.06.2023.
26. Возобновляемая энергетика. [Электронный ресурс] // Белэнерго. Режим доступа: <https://energo.by/content/investoram/vozobnovlyаемая-energetika/>. Дата доступа: 02.08.2023.
27. Finland 2023. Energy Policy Review [Electronic Resource] / IEA. 2023. Mode of access: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/07c88e41-c17b-4ea1-b35d-85dffd665de4/Finland2023-EnergyPolicyReview.pdf>. Date of access: 07.07.2023.
28. Короткевич, М. А., Старжинский А. Л. Анализ технических параметров, количества и места подключения генерирующих устройств малой мощности, работающих на местных видах топлива [Электронный ресурс] / М. А. Короткевич, А. Л. Старжинский // Энергетика Беларуси-2022: материалы респ. науч.-практ. конф., 25–26 мая 2022 г. / сост. И. Н. Прокопеня. Минск: БНТУ, 2022. С. 18–25.
29. IEA. Biomass for Power Generation and CHP [Electronic Resource] // IEA Energy Technology Essentials. 2007. Mode of access: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/1028bee0-2da1-4d68-8b0a-9e5e03e93690/essentials3.pdf>. Date of access: 18.07.2023.
30. Techno-Economic Assessment of an Off-Grid Biomass Gasification CHP Plant for an Olive Oil Mill in the Region of Marrakech-Safi, Morocco / D. Sánchez-Lozano [et al.] // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. No 10. P. 5965. <https://doi.org/10.3390/app13105965>.
31. Zhang, Y. Effects of the Distribution Density of a Biomass Combined heat and Power Plant Network on Heat Utilisation Efficiency in Village–Town Systems / Y. Zhang, J. Kang // Journal of Environmental Management. 2017. Vol. 202, Part. 1. P. 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.019>.
32. World Energy Investment 2023 [Electronic Resource] / IEA. 2023. Mode of access: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/8834d3af-af60-4df0-9643-72e2684f7221/WorldEnergyInvestment2023.pdf>. Date of access: 11.07.2023.
33. Место водорода в современных энерготехнологических метасистемах. Ч. 3: Водород в качестве топлива для энергетических систем / В. А. Седнин [и др.] // Энергоэффективность. 2021. № 5. С. 16–21.
34. Седнин, В. А. Анализ эффективности технологии производства водорода на мини-ТЭЦ на местных видах топлива термохимическим методом / В. А. Седнин, Р. С. Игнатович // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 4. С. 354–373. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-354-373>.
35. Седнин, В. А. Анализ эффективности технологий извлечения диоксида углерода из продуктов сгорания / В. А. Седнин, Р. С. Игнатович // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 6. С. 524–538. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-524-538>.

36. Герасимов, Д. О. Системы имитационного моделирования мультиэнергетических объектов / Д. О. Герасимов, К. В. Суслов // Вестник КГЭУ. 2020. Т. 12, № 4 (48). С. 11–19.
37. Klemm, K. Modeling and Optimization of Multi-Energy Systems in Mixed-Use Districts: A Review of Existing Methods and Approaches / C. Klemm, P. Vennemann // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 135. Art. 110206. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110206>.

Поступила 20.06.2023

Подписана в печать 25.08.2023

Опубликована онлайн 30.11.2023

REFERENCES

1. Victor Karankevich: “With the Commissioning of the Nuclear Power Plant the Share of Natural gas in the Energy Balance of Belarus Will Decrease to 60 %”. *Ministry of Energy of the Republic of Belarus* 2022. Available at: https://minenergo.gov.by/press/glavnye-novosti/viktor-karankevich-s-vvodom-aes-dolya-prirodnogo-gaza-v-energo-balanse-belarusi-snizitsya-do-60-/?sphrase_id=52175 (accessed 01 Juny 2023) (in Russian).
2. *On Approval of the Concept of Energy Security of the Republic of Belarus: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, December 23, 2015, No 1084*. Available at: https://minenergo.gov.by/dfiles/000608_512413_Kontseptsija.pdf. (in Russian).
3. Sednin V. A., Ignatovich R. S., Iokova I. L. (2023) On the Feasibility of Building Mini-Thermal Power Plant Using Local Fuels in the Conditions of the Republic of Belarus. Part 1: State of Use of Local Fuels in Heat Supply Systems. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 22 (5), 418–427. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-418-427> (in Russian).
4. *On Approval of the Concept of Energy Development of Electricity Generating Capacities and Electrical Networks for the Period until 2030: Resolution of the Ministry of Energy, February 25, 2020, No 7*. Available at: <https://minenergo.gov.by/wp-content/uploads/Postanovlenie-7.pdf> (in Russian).
5. Paris Climate Agreement Available at: <http://minpriroda.gov.by/ru/paris-ru/> (accessed 10 Juny 2023) (in Russian).
6. Ivanov D. L., Ivashko E. A. (2021) Extremely High Growth Rates of Air Temperature as a Characteristic Feature and Peculiarity of the Climate of the Territory of Belarus in the Context of Global Warming. *Razvitie Geograficheskikh Issledovaniy v Belarusi v XX–XXI Vekakh* [Development of Geographical Research in Belarus in the 20th–21st Centuries]. Minsk, Belarusian State University, 329–332 (in Russian).
7. Voytov I. V., Lednitsky A. V. (2017) Current state and Prospects for the Use of Wood Fuel in the Republic of Belarus. *Lesozagotovitel'noe Proizvodstvo: Problemy i Resheniya: Mat. Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Minsk, 26–28 Aprelya 2017* [Logging Production: Problems and Solutions: Proceedings of International Scientific and Technical Conference, Minsk, April 26–28, 2017]. Minsk, Belarusian State Technological University, 9–14 (in Russian).
8. Romanyuk V. N., Bobich A. A. (2015) On the Issue of Diversifying Options for Regulating the Generation Capacity of the Belarusian Energy System. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (6), 3–7 (in Russian).
9. About the State Program “Energy Saving” for 2021–2025: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, February 24, 2021, No. 103. *Pravo.by*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100103> (in Russian).
10. IEA (2020). *Belarus Energy Profile*. Available at: <https://www.iea.org/reports/belarus-energy-profile> (accessed 20 May 2023).
11. Installed Power. *Belenergo*. 2023. Available at: https://www.energo.by/content/deyatelnost-obedineniya/osnovnye-pokazатели/ustano-vlennaya-moshchnost/index_11.php (accessed 26 May 2023) (in Russian).
12. Pisarev V. (2015, December 28) Luninetskaya Thermal Power Plant: Warm, Even Warmer! *Energetika Belarusi* [Energy of Belarus], (25), 1 (in Russian).
13. Turchenko A. (2014, February 14) Mini-Thermal Power Plant “Baran” Operates Without Failures. *Energetika Belarusi* [Energy of Belarus], (3), 2 (in Russian).
14. Mini-Thermal Power Plant in Rechitsa: Experience Worthy of Imitation. (2016, October 27) *Energetika Belarusi* [Energy of Belarus], (20), 1 (in Russian).
15. On Approval of the State Program for the Construction of Energy Sources Using Local Fuels in 2010–2015: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, July 19, 2010, No. 1076. (2010) *National Register of Legal Acts of the Republic of Belarus*, (5/32215) (in Russian).
16. *Small-Scale Energy Will Receive Wider Development in Belarus in the Coming Years*. (2009). Available at: <http://government.by/ru/content/341/print> (accessed 26 May 2023) (in Russian).
17. Oganezov I. A., Shirshova V. V. (2010) Prospects for the Use of Wood Fuels in Agricultural Areas of the Republic of Belarus. *Nauchno-Innovatsionnaya Deyatel'nost' v Agropromyshlennom Komplekse: Sb. Nauch. St. 4-i Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., Minsk, 20–21 Maya 2010 g. Ch. 2* [Scientific and Innovative Activities in the Agro-Industrial Complex: Collection of Scientific Papers of the 4th International. Scientific and Practical Conference, Minsk, 20–21 may 2010. Part 2]. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University, 74–77 (in Russian).
18. *Mini-Thermal Power Plant Using Local Fuels Has Been Opened in Kalinkovichi*. (2019). Available at: <https://www.belta.by/regions/view/mini-tets-na-mestnyh-vidah-topliva-otkrylas-v-kalinkovichah-334689-2019> (accessed 15 May 2023) (in Russian).
19. *Mogilev Republican Unitary Enterprise of Electric Power “Mogilevenergo” is a Partner of Mogilev Regional Football Federation*. (2021). Available at: [Наука
и техника. Т. 22, № 6 \(2023\)
Science and Technique. V. 22, No 6 \(2023\)](http://www.moff.by/mogilevskoe-respublikanskoe-unitarnoe-predpriyatie-elektroenergetikimo-gilevenergo-partner-moff-3/#:~:text=(accessed 20 May 2023) (in Russian).
</div>
<div data-bbox=)

20. *Renewable Energy*. (2015). Available at: <https://investinbelarus.by/docs/Renuable.pdf>. (accessed 18 April 2023) (in Russian).
21. On the Approval of the State Comprehensive Program for the Modernization of Main Production Assets of the Belarusian Energy Conservation and Increasing the Share of Use of the Republic's Own Fuel and Energy Resources for the Period Until 2011: Decree of the President of the Republic of Belarus, November 15, 2007, No 575. (2017) *National Register of Legal Acts of the Republic of Belarus*, (1/9095) (in Russian).
22. Bogdan E. V., Karnitsky N. B. (2014) Mini-Thermal Power Plant Using Local Fuels in Belarus. *Energetika i Energoberezhenie: Teoriya i Praktika: Sb. Materialov I Vserossiiskoi Nauch.-Prakt. Konf.* [Energy and Energy Saving: Theory and Practice. Collection of Materials of the I All-Russian Scientific and Practical Conference]. Kemerovo, T. F. Gorbachev State Technical University, 12 (in Russian).
23. *The First-Born of Domestic Energy*. (2008). Available at: <https://www.sb.by/articles/pervenets-otechestvennoy-energetiki.html> (accessed 20 May 2023) (in Russian).
24. Projects. *Renewable Energy and Resources*. Available at: <https://energy-aven.org/projects> (accessed 11 Juny 2023) (in Russian).
25. *The Volume of Quotas for the Creation of Installations for the use of Renewable Energy Sources Has Been Established for 2021–2023*. (2020). Available at: <https://minenergo.gov.by/press/novosti/ustanovleny-obemy-kvot-na-sozдание-ustanovok-po-ispolzovaniyu-vie-na-2021-2023-gody/> (accessed 09 Juny 2023) (in Russian).
26. *Renewable Energy. Belenergo*. Available at: <https://energo.by/content/investoram/vozobnovlyamaya-energetika/> (accessed 02 August 2023) (in Russian).
27. IEA (2023). *Finland 2023. Energy Policy Review* Available at: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/07c88e41-c17b-4ea1-b35d-85dff665de4/Finland2023-EnergyPolicyReview.pdf> (accessed 07 July 2023).
28. Korotkevich M. A., Starzhinsky A. L. (2022) Analysis of Technical Parameters, Number and Location of Connection of Low-Power Generating Devices Operating on Local Fuels. *Energetika Belarusi-2022: Mat. Resp. Nauch.-Prakt. Konf., 25–26 Maya 2022 g.* [Energy of Belarus-2022: Proceedings of Republican Scientific and Practical Conference, May 25–26, 2022] J. Minsk, Belarusian National Technical University] Publishing House, 18–25 (in Russian).
29. IEA (2007) *Biomass for Power Generation and CHP*. Available at: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/1028bee0-2da1-4d68-8b0a-9e5e03e93690/essentials3.pdf> (accessed 18 July 2023) (in Russian).
30. Sánchez-Lozano D., Escámez A., Aguado R., Oul-bi S., Hadria R., Vera D. (2023) Techno-Economic Assessment of an Off-Grid Biomass Gasification CHP Plant for an Olive Oil Mill in the Region of Marrakech-Safi, Morocco. *Applied Sciences*, 13 (10), 5965. <https://doi.org/10.3390/app13105965>.
31. Zhang Y., Kang J. (2017) Effects of the Distribution Density of a Biomass Combined Heat and Power Plant Network on Heat Utilisation Efficiency in Village–Town Systems. *Journal of Environmental Management*, 202 (Part. 1), 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.019>.
32. IEA (2023) *World Energy Investment 2023*. Available at: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/8834d3af-af60-4df0-9643-72e2684f7221/WorldEnergyInvestment2023.pdf> (accessed 11 July 2023).
33. Sednin V. A., Abrazovskii A. A., Kuz'mich K. A., Ivanchikov E. O. (2021) The Place of Hydrogen in Modern Energy Technology Metasystems. Part 3. Hydrogen as a Fuel for Energy Systems. *Energoeffektivnost* [Energy Efficiency], (5), 16–21 (in Russian).
34. Sednin V. A., Ignatovich R. S. (2023) Analysis of the Efficiency of Hydrogen Production Technology at Mini-CHP Plants Using Local Fuels by Thermochemical Method. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (4), 354–373 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-354-373>.
35. Sednin V. A., Ignatovich R. S. (2022) Analysis of the Efficiency of Technologies for Extraction Carbon Dioxide from Combustion Products. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (6), 524–538. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-524-538>.
36. Gerasimov D. O., Suslov K. V. (2020) Simulation systems for Multi-Energy Facilities. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta = Kazan State Power Engineering University Bulletin*, 12 (4), 11–19 (in Russian).
37. Klemm K., Vennemann P. (2021). Modeling and Optimization of Multi-Energy Systems in Mixed-Use Districts: A Review of Existing Methods and Approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110206. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110206>.

Received: 20.06.2023

Accepted: 25.08.2023

Published online: 30.11.2023

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-519-529>

УДК 621.644.07: 004.052.3

Алгоритм расчета надежности единичного линейного участка стального подземного трубопровода

Струцкий Н. В.¹⁾, докт. техн. наук, проф. Романюк В. Н.²⁾

¹⁾ГПО «Белтопгаз» (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

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

Реферат. Наиболее распространенные технические системы в мире – стальные трубопроводные коммуникации в подземном исполнении (теплопроводы, магистральные и распределительные нефте- и газопроводы и пр.). Соответственно оценка надежности таких технических систем и их составных частей представляет большой теоретический и практический интерес. На современном уровне развития расчет надежности стал обязательным этапом при проектировании и диагностировании (в процессе эксплуатации) ответственных технических систем и в частности трубопроводных. В основе надежного расчета, в явном или неявном виде, всегда лежит модель рассчитываемого объекта. Именно от адекватности модели реальным физическим связям и процессам внутри технического объекта зависят точность и практическая ценность расчетных методик. Предлагается рассматривать единичный линейный участок стального подземного трубопровода как сложную техническую систему из неравноценных с точки зрения надежности элементов – основного элемента (стальной трубы) и вспомогательных защитных элементов, объединенных в подсистемы (блоки). Алгоритм расчета надежности объекта построен на основе метода структурных схем (блок-схем) с учетом влияния эффекта последствия отказа вспомогательного элемента (элементов) на параметры надежности основного элемента, что более адекватно отражает специфические особенности устройства и функционирования стальных трубопроводов по сравнению с применяемыми статическими моделями. Рассмотрены варианты конструктивного исполнения стального подземного трубопровода с защитным изоляционным покрытием и с комплексной защитой от коррозии (изоляция и электрохимическая защита), для которых получены уточненные формулы для расчета основных показателей надежности (безотказности).

Ключевые слова: подземный стальной трубопровод, сложная техническая система, модель надежности, последствие отказа, изоляция, электрохимическая защита, балластировка

Для цитирования: Струцкий, Н. В. Алгоритм расчета надежности единичного линейного участка стального подземного трубопровода / Н. В. Струцкий, В. Н. Романюк // *Наука и техника*. 2023. № 6. С. 519–529. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-519-529>

Algorithm for Calculating Reliability of Single Linear Section of Steel Underground Pipeline

N. V. Strutsky¹⁾, V. N. Romaniuk²⁾

¹⁾Beltopgaz SPA (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. One of the most widespread technical systems in the world is underground steel pipeline communications (heat pipelines, main and distribution oil and gas pipelines, etc.). Accordingly, reliability assessment of such technical systems

Адрес для переписки

Романюк Владимир Никанорович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Address for correspondence

Romaniuk Vladimir N.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

and their components is of great theoretical and practical interest. At the modern level of development, reliability calculation has become a mandatory stage in the design and diagnostics (during operation) of any technical systems in general, and in particular pipeline systems. A reliable calculation, either explicitly or implicitly, is always based on the model of the object being calculated. It is the adequacy of the model to the real physical relations and processes inside the technical object that determines the accuracy and practical value of calculation methods. It is proposed to consider a single linear section of an underground steel pipeline as a complex technical system of unequal elements from the point of view of reliability – the main element (steel pipe) and auxiliary protective elements combined into subsystems (blocks). The algorithm for calculating the reliability of the object is based on the method of block diagrams, taking into account the influence of the aftereffect of the failure of an auxiliary element (elements) on the reliability parameters of the main element, which more adequately reflects the specific features of the design and operation of steel pipelines compared with the applied static models. The variants of structural design of a steel underground gas pipeline with a protective insulation coating and with complex corrosion protection (insulation and electrochemical protection) are considered, for which refined formulas are obtained for calculating the main reliability (failure-free) indicators.

Keywords: underground steel pipeline, complex technical system, reliability model, failure aftereffect, insulation, electrochemical protection, ballastin

For citation: Strutsky N. V., Romaniuk V. N. (2023) Algorithm for Calculating Reliability of Single Linear Section of Steel Underground Pipeline. *Science and Technique*. 22 (6), 519–529. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-519-529> (in Russian)

Введение

В общем приближении любую трубопроводную коммуникацию можно смоделировать как совокупность типовых элементов – участков трубопроводов, объединенных в локальные сети различных мощностей и масштабов.

Определим, что этот типовой элемент – линейный участок стального подземного трубопровода, включающий некоторое ограниченное количество стандартных заводских труб с монтажными сварными соединениями. Условимся, что данный участок однороден по конструктивным характеристикам, технологическим параметрам и условиям эксплуатации.

Являясь элементом для построения сложных пространственных структур (сетей), такой единичный трубопровод в рамках системного подхода, в свою очередь, также должен рассматриваться как техническая система (ТС). Более того, его необходимо отнести к сложным техническим системам, то есть системам, поведение которых нелегко моделировать из-за сложных зависимостей между их частями или из-за сложных взаимодействий между данной системой и окружающей средой [1].

Действительно, внешней средой для стального подземного трубопровода служит почва (грунт), сама по себе являющаяся очень сложной и изменчивой (динамической) физико- и химико-биологической системой [2], оказывающей на трубопровод целый комплекс воздействий. Соответственно необходимость компенсации этих воздействий в их различных сочета-

ниях влечет усложнение конструктива трубопровода.

Так, стальные подземные трубопроводы должны быть защищены от коррозии. Как правило, это комплексная защита: антикоррозийное изоляционное покрытие отделяет поверхность трубы от агрессивной внешней среды, а электрохимическая защита (ЭХЗ) максимально подавляет коррозионный процесс в местах, где электрический контакт между трубой и грунтом все же возник.

Как вариант, подземные трубопроводы (например, теплопроводы) могут изолироваться от внешней среды с помощью прокладки в каналах (лотках). Также теплопроводы во избежание потерь теплоты обеспечиваются тепловой изоляцией.

На обводненных участках и участках подводных переходов трубопроводы, в которых транспортируемая среда легче воды (газ, нефть), могут оборудоваться пригрузами (утяжелителями) для закрепления в проектном положении.

В местах пересечения с транспортными и некоторыми смежными коммуникациями на трубопроводах устанавливаются защитные футляры.

Таким образом, стальной трубопровод, как правило, включает в себя целый ряд различных элементов, каждый из которых выполняет самостоятельную функцию, имеет свои специфические физические свойства и конструкцию, а также отыгрывает свою собственную роль с точки зрения надежности.

Структурная схема надежности единичного линейного участка газопровода

Проанализируем характер влияния перечисленных выше элементов стального подземного трубопровода на общую надежность, а также целесообразность их выделения и включения в надежность модель.

По определению, трубопровод состоит из труб и соединений между ними. Принимая за условие равнопрочность и близкую коррозионную стойкость металла сварного соединения и основного металла трубы, на данном уровне рассмотрения допустимо считать их за один элемент (не выделять стык).

Коррозионный фактор несет основную опасность для стального подземного сооружения. Соответственно состояние и работа элементов антикоррозийной защиты стального трубопровода оказывают существенное влияние на его надежность. Таким образом, данные элементы должны присутствовать в модели в обязательном порядке.

Затопление или занос канала (лотка) грунтом значительно ухудшает коррозионную ситуацию, что также должно учитываться. В свою очередь, состояние теплоизоляции (выполняемой, как правило, из гидрофильных материалов) на коррозионные процессы влияния не оказывает, функция данного элемента – исключительно энергосберегающая.

Функциональный отказ балластировки повлечет за собой изменение пространственного положения трубопровода и возникновение напряженно-деформированного состояния, поэтому данный элемент (при наличии) должен включаться в модель надежности.

Футляры на трубопроводах в большей степени предназначены для защиты пересекаемых транспортных и инженерных коммуникаций от вредного или даже опасного (например, в случае выхода горючего газа) воздействия транспортируемой среды. Вместе с тем участки переходов под железнодорожными путями, магистральными автомобильными трассами могут подвергаться повышенным механическим нагрузкам. В таком случае футляр будет необходим для придания конструкции дополнительной прочности и также должен учитываться при моделировании.

Сгруппировав элементы трубопровода по роли и степени важности в обеспечении общей надежности, получим структурированный набор элементов трубопровода, включающий в себя трубу в качестве основного элемента (ОЭ) и два блока (подсистемы) вспомогательных элементов (ВЭ) для защиты ОЭ от коррозии и механических напряжений:

- 1) основной элемент – труба;
- 2) защитный блок ВЭ I:
 - антикоррозийная изоляция (гидроизоляция);
 - электрохимзащита (ЭХЗ);
 - канал (лоток);
- 3) защитный блок ВЭ II:
 - футляр;
 - балластировка.

Следует отметить, что такой элемент, как канал, защищает трубопровод одновременно от коррозионного и механического воздействия внешней среды, поэтому может быть включен в оба защитных блока элементов с одинаковым основанием.

Соединим элементы единичного участка трубопровода в логическую схему, на основании которой в дальнейшем будет возможно построить математическую модель и выполнить количественную оценку надежности системы.

Наиболее распространенным способом визуального представления надежностной модели технической системы является построение структурной схемы надежности (или блок-схемы надежности – reliability block diagram, RBD).

Блок-схемы относятся к статическим моделям, в рамках которых состояния системы определяются наборами работоспособных и неработоспособных элементов в определенный момент времени. Те элементы, отказ которых вызывает отказ системы, имеют в схеме последовательное соединение, элементы, отказ которых приводит лишь к увеличению вероятности отказа, соединяются параллельно. При параллельном соединении элементов отказ системы происходит лишь при совмещении отказов частей системы. По сути, блок-схема надежности представляет собой наглядную интерпретацию вероятностной задачи [3].

Приняв связи между ОЭ и блоками ВЭ последовательными, а связи между ВЭ внутри защитных блоков параллельными, возможно получить варианты блок-схем для стальных подземных трубопроводов различного назначения и конструктивного исполнения (рис. 1).

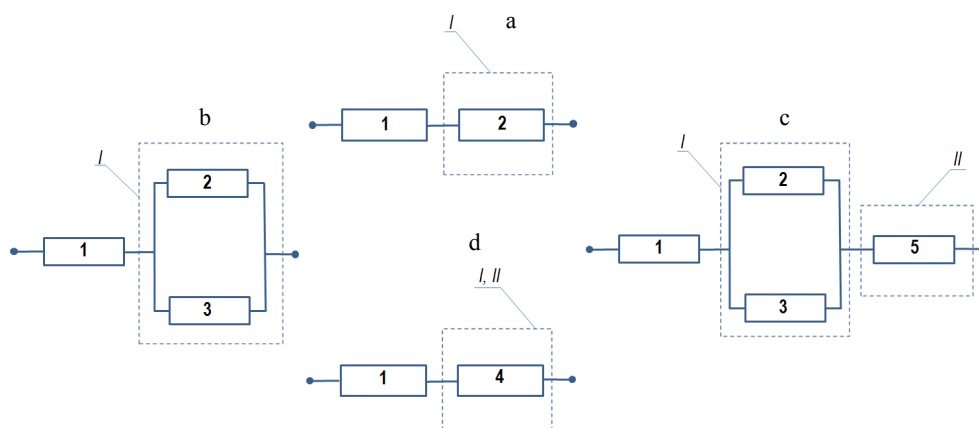


Рис. 1. Варианты блок-схем надежности стального подземного трубопровода: а – с изоляцией; б – с изоляцией и электрохимической защитой; в – то же, что и б, но с балластировкой; д – в канале; 1 – труба; 2 – изоляционное покрытие; 3 – электрохимическая защита; 4 – канал; 5 – балластировка

Fig. 1. Options for block diagrams of the reliability of a steel underground pipeline: а – with insulation; б – with insulation and electrochemical protection; в – the same as б, but with ballasting; д – in the channel; 1 – pipe; 2 – insulating coating; 3 – electrochemical protection; 4 – channel; 5 – ballasting

На практике, учитывая набор и специфику связей составляющих элементов, для стальных подземных трубопроводов чаще будет характерна последовательно-параллельная структура.

Вопросам моделирования надежности трубопроводов посвящено достаточное количество исследований, предлагающих собственные принципы обоснования и построения соответствующих структурных схем. Для нефте- и газопроводов (в основном магистральных), например, в этой области можно указать работы [4–8].

Представленные в настоящей статье структурные схемы принципиально наиболее близки к варианту, предложенному А. М. Зиневичем в работе [4] для линейной части магистральных газопроводов. Вместе с тем характерный для данной работы подход, предполагающий непосредственное включение в модель трубопровода в качестве его элементов траншеи и грунт, достаточно спорен – они все же являются частью эксплуатационной среды. На наш взгляд, внешнюю среду при рассмотрении подземной коммуникации продуктивнее моделировать как отдельную сложную систему, однако этот вопрос выходит за рамки данной статьи.

Представляется, что предлагаемые в настоящей статье блок-схемы единичного стального подземного трубопровода адекватны реальной структуре моделируемого объекта на своем

уровне рассмотрения, а также позволяют учесть конструктивные особенности трубопроводных коммуникаций различного назначения.

Так, например, варианты на рис. 1а, б отражают структуру участка стального нефте- и газопровода, теплотрасса бесканальной прокладки с антикоррозийной защитой, вариант рис. 1с – нефте- и газопровода с балластировкой, рис. 1д – теплотрасса канальной прокладки.

Алгоритм расчета основных показателей надежности

Конечным результатом надежностного расчета ТС является определение ее количественных показателей надежности. Номенклатура показателей надежности технических объектов регламентируется межгосударственным стандартом [9]. Для трубопроводных коммуникаций, как высоконадежных систем (как правило, связанных с жизнеобеспечением населения и зачастую транспортирующих взрыво- и пожароопасный продукт), это, в первую очередь, показатели безотказности.

Поскольку возникновение отказов для высоконадежных систем по возможности должно исключаться, будем условно рассматривать трубопровод как невосстанавливаемую систему, что одновременно упростит расчеты.

Основной показатель безотказности – вероятность безотказной работы (ВБР) $P(t)$, то есть

вероятность того, что в пределах заданной наработки отказа объекта не возникнет.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ связана с функцией распределения $F(t)$ и функцией плотности распределения $f(t)$ наработки до отказа следующими дифференциальными соотношениями:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (1)$$

На практике иногда удобно использовать показатель вероятности отказа $Q(t)$, определяемый как вероятность того, что объект откажет хотя бы один раз в течение заданной наработки, будучи работоспособным в начальный момент времени. Вероятность наступления хотя бы одного отказа на отрезке $[0, t]$ определяют по формуле

$$Q(t) = 1 - P(t) = F(t). \quad (2)$$

Если известна функция плотности распределения времени до отказа $f(t)$, то ВБР можно рассчитать по выражению

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt, \quad (3)$$

а вероятность отказа $Q(t)$ по формуле

$$Q(t) = \int_0^t f(t)dt. \quad (4)$$

Как видно из графической интерпретации на рис. 2а, вероятность безотказной работы $P(t)$ и вероятность отказа $Q(t)$ равны соответственно площадям криволинейных трапеций под функцией плотности распределения $f(t)$ на интерва-

лах $[0, t]$ и $[t, \infty]$. По определению, в начальный момент $t = 0$ объект находится в работоспособном состоянии. С ростом наработки ВБР невозстанавливаемого объекта $P(t)$ монотонно уменьшается от 1, асимптотически приближаясь к 0 при $t \rightarrow \infty$, а вероятность отказа $Q(t)$ растет от 0 до 1 [10].

Среднее время безотказной работы T_o (математическое ожидание времени работы объекта до отказа) равно площади под кривой зависимости ВБР от наработки объекта (рис. 2б) и может быть получено с помощью выражения

$$T_o = \int_0^{\infty} P(t)dt. \quad (5)$$

При расчетах надежности широко используется показатель интенсивности отказов (ИО) $\lambda(t)$, представляющий собой условную плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемую при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{P(t)} = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt}. \quad (6)$$

Интенсивность отказов удобна тем, что через нее можно выразить ВБР объекта:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}, \quad (7)$$

где $\lambda(t)dt$ – вероятность того, что элемент, безотказно проработавший в интервале наработки $[0, t]$, откажет в интервале $[t, t + dt]$.

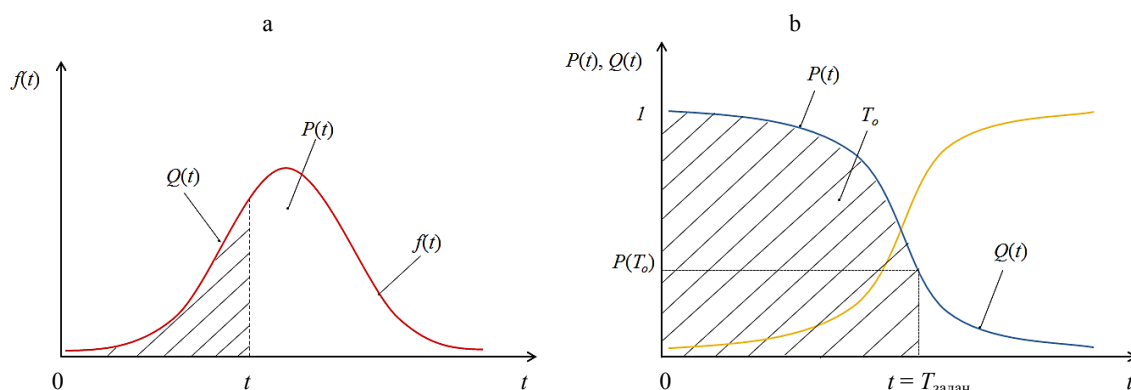


Рис. 2. Графическая интерпретация основных показателей безотказности: а – вероятностей безотказной работы и отказа; б – среднего времени безотказной работы

Fig. 2. Graphical representation of main reliability indicators:

a – probabilities of failure-free operation and failure; б – average time of failure-free operation

При $\lambda(t) = \text{const}$ получаем экспоненциальное распределение вероятности безотказной работы

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (8)$$

Расчет надежности единичного участка трубопровода, как ТС, имеющей различные варианты конструктивного исполнения, будет включать две основные операции:

- определение надежности элементов, составляющих систему;
- определение надежности различных комбинаций этих элементов.

Существует точная математическая связь между надежностью системы и надежностью ее элементов. Точность результатов расчета не будет зависеть от аппарата теории вероятностей, так как вероятностные соотношения сами по себе совершенно точны [11].

Условимся, что для каждого из элементов имеет место экспоненциальное распределение вероятности безотказной работы, а также для каждого из них определены (статистическим методом, экспериментально, либо рассчитаны с учетом конструкции элемента и данных о свойствах материалов) интенсивности отказов $\lambda_j(t)$.

Тогда все представленные на рис. 1 последовательные и параллельно-последовательные структуры позволяют, используя основные теоремы теории вероятности случайных событий и логико-вероятностные методы, осуществить прямой (непосредственный) расчет общей надежности ТС по параметрам надежности элементов.

Так, в самом общем случае формула для расчета ВБР единичного участка трубопровода будет иметь вид

$$P(t) = P_{\text{оз}}(t)P_{\text{вбI}}(t)P_{\text{вбII}}(t), \quad (9)$$

где $P_{\text{оз}}(t)$, $P_{\text{вбI}}(t)$, $P_{\text{вбII}}(t)$ – ВБР основного элемента, защитных блоков I и II соответственно.

Определим ВБР системы при различных конфигурациях элементов. Для наиболее простых вариантов схемы рис. 1a, d выражение (5) преобразуется к виду

$$P(t) = P_{\text{тр}}(t)P_{\text{из}}(t) \text{ или } P(t) = P_{\text{тр}}(t)P_{\text{кан}}(t); \quad (10)$$

для варианта рис. 1b

$$P(t) = P_{\text{тр}}(t)(P_{\text{из}}(t) + P_{\text{эхз}}(t) - P_{\text{из}}(t)P_{\text{эхз}}(t)), \quad (11)$$

для варианта рис. 1c:

$$P(t) = P_{\text{тр}}(t)(P_{\text{из}}(t) + P_{\text{эхз}}(t) - P_{\text{из}}(t)P_{\text{эхз}}(t))P_{\text{балл}}(t), \quad (12)$$

где $P_{\text{тр}}(t)$, $P_{\text{из}}(t)$, $P_{\text{эхз}}(t)$, $P_{\text{балл}}(t)$ – ВБР стальной трубы, изоляции, ЭХЗ и балластировки, рассчитываемые по значениям их ИО соответственно.

Подобные алгоритмы позволяют определять показатели надежности технических систем различного функционального назначения и уровня сложности, они хорошо документированы [12, 13] и нашли широкое применение на практике. Вместе с тем здесь необходимо отметить следующий принципиальный момент.

В действительности, находясь в работоспособном состоянии, труба сама по себе полностью обеспечивает нормальное функционирование системы (транспортировка продукта с заданными параметрами) с некоторым уровнем надежности. Это согласуется с известным определением основного элемента [14, 15], в соответствии с которым ОЭ – элемент основной физической структуры системы, минимально необходимый для выполнения возложенных на нее задач.

Тогда, вне зависимости от количества и работоспособности ВЭ, а также конфигурации их связей, немедленным и безусловным отказом ТС в нашем и подобных ему случаях будет являться только отказ ОЭ.

Следовательно, если производить расчет без учета данной особенности трубопроводов, то полученная оценка надежности системы будет включать в себя допущение о моментальном выходе из строя ОЭ вслед за ВЭ, либо искусственное расширение понятия отказа системы за счет включения в него отказа ВЭ, что противоречит физическим связям и ролям элементов в системе. Другими словами, при расчете ВБР в предположении независимости отказов элементов системы будет получаться заниженное значение [16, 17].

Как правило, при осуществлении инженерных расчетов так и поступают, однако при этом модель теряет адекватность реальному объекту,

и сами расчеты приобретают преимущественно теоретический характер. В этой связи возникает задача найти необходимый баланс между требуемым уровнем адекватности модели и ее простотой. То есть необходимо адаптировать расчет надежности с использованием структурных схем к специфике трубопроводных систем, сохранив присущие данному методу преимущества: удобство использования и наглядность.

Расчет с учетом эффекта последствия отказа ВЭ

Существуют различные подходы к соответствующей адаптации метода структурных схем для расчета надежности сложных систем. В контексте рассматриваемого нами случая можно выделить два из них.

Так, зачастую в режиме технического объекта можно выделить несколько отдельных фаз, в каждой из которых система будет иметь различные характеристики надежности. В качестве примера такой ТС в [15] приводится бортовая вычислительная система самолета, работающая в двухфазном режиме, – управление взлетом/управление полетом. Вибрация при взлете приводит к повышению интенсивностей отказов электронных элементов, вследствие чего ИО составляющих систему компьютеров на первой фазе выше, чем на второй.

Тогда каждую фазу логично рассматривать независимо, используя свои структурные схемы для каждой фазы либо одну схему с различными значениями ИО, в зависимости от ситуации. Такая опция реализована, например, в специализированном программном продукте Windchill Quality Solutions в виде так называемых «фазовых диаграмм».

Для построения фазовых диаграмм задается количество, длительность и очередность фаз, а также конфигурация системы, вид и параметры функций распределения наработок до отказа элементов для каждой фазы. При этом вектор распределения вероятностей состояний системы на конец i -й фазы является вектором начальных состояний для $i + 1$ -й фазы [15].

Другой подход основан на выделении технических систем с «последствием отказов».

Под последствием отказа понимается ситуация, при которой отказ некоторого элемента влечет возрастание нагрузки на другой элемент системы, вследствие чего распределение времени до отказа второго элемента изменяется [18, 19].

Соответственно математическая модель расчета такой системы должна учитывать этот эффект, при этом построения отдельных структурных схем для периодов наработки с различными параметрами надежности может не потребоваться. Исходя из данной логики, в частности в работе [20], решается задача расчета надежности радиоэлектронных комплексов, обладающих вспомогательными элементами (сервисными устройствами), снижающими диапазон внешних воздействий на основную аппаратуру.

Хотя стальной подземный трубопровод до настоящего времени не рассматривался как система с последствием отказов, однако отнесение его к таким системам абсолютно логично вытекает из его физической структуры.

Проанализируем в данном ключе представленные на рис. 1 простейшие варианты структурных схем рис. 1а, d. Это может быть участок теплопровода канальной прокладки либо бесканальная коммуникация (нефте- и газопровод, теплопровод) с антикоррозийным изоляционным покрытием, не оборудованная средствами электрохимзащиты (данный вариант характерен, например, для распределительных сетей [21], прокладываемых в низкоагрессивных, высокоомных грунтах).

Итак, мы имеем систему из двух элементов: ОЭ и ВЭ. При этом роль ВЭ (будь то канал, или изоляция) состоит, по сути, в приведении уровня влияния на ОЭ внешних воздействующих факторов (механического, коррозионного) до приемлемого с точки зрения достижения необходимой долговечности технической системы.

Когда в некоторый момент времени τ ВЭ отказывает, то ОЭ, будучи исправным до момента τ , проработает еще время $(t - \tau)$ со скачкообразным переходом на новый, более низкий уровень надежности. Таким образом, в системе действительно возникает последствие, выражающееся в существенном (изменяющем ха-

раक्टर процесса) запаздывании наступления ее конечного (неработоспособного) состояния.

Вместе с тем, поскольку данная особенность системы обусловлена кардинально различающимися ролями основного и вспомогательных элементов, с точки зрения надежности, возможно, более точно определить ее как «систему с неравноценными элементами».

Такая система будет иметь два работоспособных состояния (с работоспособным ВЭ, и неработоспособным ВЭ), каждое из которых характеризуется собственными показателями надежности – $P_1(t)$ и $P_2(t)$. Поскольку указанные состояния ТС представляют собой несовместимые события, полная вероятность безотказной работы системы будет равна

$$P(t) = P_1(t) + P_2(t). \quad (13)$$

ВБР системы при исправности обоих элементов составит

$$P_1(t) = P_{оэ}(t)P_{вэ}(t). \quad (14)$$

Вероятность безотказной работы ТС при исправном ОЭ и неисправном ВЭ определяется усреднением по τ условной ВБР $P_{оэ}(\tau)$ по формуле

$$P_2(t) = \int_0^t P_{оэ}(\tau, t) d(Q_{вэ}(\tau)), \quad (15)$$

где $P_{оэ}(\tau, t)$ – вероятность того, что ОЭ исправно проработает время τ при исходном уровне надежности ТС, а затем еще время $(t - \tau)$, но уже при остаточном, сниженном уровне надежности; $d(Q_{вэ}(\tau)) = -d(P_{вэ}(\tau)) = -P'_{вэ}(\tau) \cdot d\tau$ – вероятность того, что ВЭ исправно проработает время τ и откажет на малом промежутке времени $d\tau$, примыкающем к τ справа (плотность $f_{вэ}(\tau)$ распределения времени безотказной работы ВЭ, умноженная на $d\tau$).

Используя формулу полной вероятности, получаем следующее выражение для ВБР системы:

$$P(t) = P_1(t) + P_2(t) = P_{оэ}(t)P_{вэ}(t) + \int_0^t P_{оэ}(\tau, t) d(Q_{вэ}(\tau)). \quad (16)$$

Оценку уровня влияния последствия отказа ВЭ на надежность ОЭ целесообразно про-

изводить с помощью безразмерного коэффициента влияния $K_{вп}$ [20]

$$K_{вп} = \frac{\text{Уровень 2 параметра ОЭ (после момента } \tau)}{\text{Уровень 1 параметра ОЭ (до момента } \tau)}. \quad (17)$$

Если параметром является ИО (λ), то имеем

$$K_{вп} = \frac{\lambda_{оэ2}}{\lambda_{оэ1}}. \quad (18)$$

При экспоненциальном распределении безотказной работы для варианта рис. 1а (стальной трубопровод с антикоррозийной изоляцией) получаем

$$P_1(t) = e^{-(\lambda_{тр} + \lambda_{из}t)}, \quad (19)$$

где $\lambda_{из}$ – интенсивность отказов защитного покрытия; $\lambda_{тр}$ – ИО трубы (без привязки к изоляции).

Плотность $f_{из}(\tau)$ распределения времени безотказной работы изоляционного покрытия

$$f_{из}(\tau) = -P'_{из}(\tau) = \lambda_{из} e^{-\lambda_{из}\tau}. \quad (20)$$

Точный вид функции условной вероятности $P_{тр}(\tau, t)$:

$$P_{тр}(\tau, t) = e^{-\int_0^t \lambda_{тр}(\tau) d\tau} = e^{-\left(\int_0^\tau \lambda_{тр1}(\tau) d\tau + \int_\tau^t \lambda_{тр2}(\tau) d\tau\right)} = e^{-(\lambda_{тр1}\tau + \lambda_{тр2}(t-\tau))}, \quad (21)$$

где $(\lambda_{тр1}\tau + \lambda_{тр2}(t - \tau))$ – поток отказов основного элемента (трубы) за время t , зависящий от момента времени τ .

Возможны два крайних случая наступления отказа изоляционного покрытия. Если оно откажет непосредственно в начале интервала $[\tau, t]$, т. е. при $\tau = 0$, тогда $P_{тр}(\tau, t)$ на всем оставшемся интервале перейдет в функцию

$$P_1(t) = e^{-\lambda_{тр2}t}. \quad (22)$$

В случае отказа ВЭ в момент t в конце интервала $[0, t]$

$$P_1(t) = e^{-\lambda_{тр1}t}. \quad (23)$$

Условная вероятность $P_2(t)$ составит

$$P_2(t) = \int_0^t \lambda_{из} e^{-\lambda_{из}\tau} e^{-(\lambda_{тр1}\tau + \lambda_{тр2}(t-\tau))} d\tau = \left(\frac{\lambda_{из}}{\lambda_{из} + \lambda_{тр1} - \lambda_{тр2}} \right) \left(e^{-\lambda_{тр2}t} - e^{-(\lambda_{из} + \lambda_{тр1})t} \right). \quad (24)$$

Тогда формула для расчета ВБР участка стального трубопровода с антикоррозийным изоляционным покрытием примет следующий вид:

$$P(t) = e^{-(\lambda_{из} + \lambda_{тр1})t} + \left(\frac{\lambda_{из}}{\lambda_{из} + \lambda_{тр1} - \lambda_{тр2}} \right) \left(e^{-\lambda_{тр2}t} - e^{-(\lambda_{из} + \lambda_{тр1})t} \right). \quad (25)$$

Среднее время безотказной работы T_o определяется по соотношению

$$T_o = \int_0^\infty P(t) dt = \left(\frac{1}{\lambda_{из} + \lambda_{тр1}} \right) + \left(\frac{\lambda_{из}}{(\lambda_{из} + \lambda_{тр1} - \lambda_{тр2}) \left((1/\lambda_{тр1}) - (1/(\lambda_{из} + \lambda_{тр1})) \right)} \right). \quad (26)$$

Формулы для варианта рис. 1д (теплопровод канальной прокладки) будут аналогичны приведенным выше, с заменой ИО изоляции $\lambda_{из}$ на ИО канала $\lambda_{кан}$.

Теперь подробнее рассмотрим как наиболее распространенный в инженерной практике вариант, представленный на рис. 1б. Это участок стального трубопровода подземной бесканальной прокладки, обеспеченный комплексной защитой от коррозии. Данный вариант характерен для большинства распределительных и практически всех магистральных стальных трубопроводов [21, 22].

В такой конфигурации системы ЭХЗ и изоляцию можно представить как взаимно резервирующие (дублирующие) элементы, выполняющие одну и ту же функцию различными способами. Теоретически, абстрагируясь от во-

проса экономической эффективности активной защиты неизолированной трубы, находясь в состоянии полной работоспособности, каждый из этих элементов в отдельности может обеспечить защиту трубопровода от коррозии.

Потеря целостности изоляции является необходимым условием образования коррозионного повреждения. Вместе с тем даже одновременный отказ активной и пассивной составляющих антикоррозийной защиты не означает немедленного и безусловного отказа системы. Коррозионное повреждение не наступает непосредственно в момент контакта не защищенного катодно металла трубы с грунтом, ему предшествует инкубационный период, зависящий от ряда факторов.

Однако в любом случае отказ средств антикоррозийной защиты существенно ухудшит надежность стального трубопровода: его ВБР снизится, а интенсивность отказов вырастет.

Поскольку в защитной подсистеме имеет место дублированное соединение элементов, ВБР вспомогательного блока может быть рассчитана по формуле

$$P_{вб1}(t) = e^{-\lambda_{из}t} + e^{-\lambda_{эхз}t} - e^{-(\lambda_{из} + \lambda_{эхз})t}. \quad (27)$$

ВБР системы при исправности всех элементов $P_1(t)$, выраженная через интенсивность отказов ВЭ, будет равна

$$P_1(t) = e^{-\lambda_{тр1}t} \left(e^{-\lambda_{из}t} + e^{-\lambda_{эхз}t} - e^{-(\lambda_{из} + \lambda_{эхз})t} \right). \quad (28)$$

Плотность $f_{вб1}(t)$ распределения времени безотказной работы антикоррозийного вспомогательного блока составит

$$f_{вб1}(\tau) = -d \left(e^{-\lambda_{из}\tau} + e^{-\lambda_{эхз}\tau} - e^{-(\lambda_{из} + \lambda_{эхз})\tau} \right) d\tau = (\lambda_{из} e^{-\lambda_{эхз}\tau} + \lambda_{эхз} e^{-\lambda_{из}\tau} - \lambda_{эхз} - \lambda_{из}) e^{-(\lambda_{из} + \lambda_{эхз})\tau}. \quad (29)$$

Тогда выражение для $P_2(t)$ примет вид

$$P_2(t) = \int_0^t e^{-(\lambda_{тр1}\tau + \lambda_{тр2}(t-\tau))} (\lambda_{из} e^{-\lambda_{эхз}\tau} + \lambda_{эхз} e^{-\lambda_{из}\tau} - \lambda_{из} - \lambda_{эхз}) e^{-(\lambda_{эхз} + \lambda_{из})\tau} d\tau = e^{-\lambda_{тр2}t} e^{-(\lambda_{тр1} - \lambda_{тр2})t} \times \left(\left(\frac{\lambda_{из} + \lambda_{эхз}}{\lambda_{из} + \lambda_{эхз} + \lambda_{тр1} - \lambda_{тр2}} \right) \cdot e^{-(\lambda_{из} + \lambda_{эхз})t} - \left(\frac{\lambda_{из}}{\lambda_{из} + \lambda_{тр1} - \lambda_{тр2}} \right) e^{-\lambda_{из}t} - \left(\frac{\lambda_{эхз}}{\lambda_{эхз} + \lambda_{тр1} - \lambda_{тр2}} \right) e^{-\lambda_{эхз}t} \right). \quad (30)$$

Далее, в соответствии с выражениями (13) и (5) получаем формулы для расчета ВБР $P(t)$ и среднего времени безотказной работы T_0 единичного участка стального трубопровода, обеспеченного комплексной защитой от коррозии.

Окончательные выражения не приводятся из-за своей внешней сложности, однако на практике они легко могут быть рассчитаны с помощью широко распространенных в настоящее время программ автоматизации математических расчетов (MathLab, Mathematica, Maple и другие).

ВЫВОДЫ

1. В статье на основе анализа конструктивного устройства и особенностей функционирования трубопроводных систем определены элементы, требующие включения в надежность-ную модель единичного линейного участка стального подземного трубопровода. Построены оригинальные структурные схемы надежности для различных вариантов конструктивного исполнения трубопроводов.

2. Впервые показано, что линейный участок стального подземного трубопровода с точки зрения надежности может рассматриваться как сложная техническая система с неравноценными элементами (основным элементом, определяющим работоспособное/неработоспособное состояние системы, и вспомогательными, защитными элементами, снижающими уровень воздействия внешних влияющих факторов), что позволяет повысить адекватность надежностного моделирования. Предложен усовершенствованный алгоритм расчета надежности трубопровода, учитывающий влияние эффекта последствий отказа вспомогательного элемента (элементов) на общую надежность системы.

3. Представлены математические модели надежности линейного участка трубопровода для вариантов конструктивного исполнения «труба – изоляция» («труба – канал») и «труба – изоляция – электрохимическая защита», наиболее распространенных в трубопроводных системах. Для данных вариантов получены формулы для расчета основных показателей надежности (безотказности), применение которых может повысить точность оценки (прогноза) надежности таких трубопроводных ком-

муникаций, как газопроводы, теплопроводы, нефтепроводы, на стадии проектирования и в процессе эксплуатации (на этапе технического диагностирования).

ЛИТЕРАТУРА

1. Цветков, В. Я. Сложные технические системы / В. Я. Цветков // Образовательные ресурсы и технологии. 2017. № 3 (20). С. 86–92.
2. Розанов, Б. Г. Живой покров Земли / Б. Г. Розанов. М.: Педагогика, 1989. 128 с.
3. Справочник по надежности / В. Херд [и др.]; пер. Ф. С. Соловейчика; под ред. Б. Е. Бердичевского. М.: Мир, 1970. Т. 3. 376 с.
4. Зиневич, А. М. Научно-техническое обеспечение надежности сооружения линейной части магистральных трубопроводов / А. М. Зиневич. М.: Информ-нефтегазстрой, 1984. 132 с.
5. Кац, Л. Некоторые вопросы исследования надежности трубопроводов ВНИИГазпром / Л. Кац, Ж. Линковский. М.: Экспресс-информация. 1970. № 23. С. 15–28.
6. Харионовский, В. В. Вопросы надежности и живучести магистральных трубопроводов как линейных систем / В. В. Харионовский, В. П. Родин // Вопросы надежности газопроводных конструкций: сб. науч. трудов. М.: ВНИИгаз, 1993. 125 с.
7. Рудаченко, А. В. Эксплуатационная надежность трубопроводных систем: учеб. пособие / А. В. Рудаченко, С. С. Байкин. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2008. 118 с.
8. Дейнеко, С. В. Обеспечение надежности систем трубопроводного транспорта нефти и газа / С. В. Дейнеко. М.: Техника, 2011. 176 с.
9. ГОСТ 27.002–2015 Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 23 с.
10. Михайлов, М. И. Надежность и диагностика технологических систем: учеб. пособие / М. И. Михайлов. Минск: РИВШ, 2022. 360 с.
11. Дерюшев, Л. Г. Нормирование требований надежности систем водоснабжения Вьетнама / Л. Г. Дерюшев, Фам Ха Хай // Вестник МГСУ. 2014. № 9. С. 7–21.
12. ГОСТ 27.301–95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. Минск, 1995. 10 с.
13. ГОСТ Р 51901.14–2007. Менеджмент риска. Структурная схема надежности и Булевы методы. М.: Стандартинформ, 2008. 23 с.
14. Надежность технических систем: справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин [и др.]; под ред. И. А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985. 608 с.
15. Викторова, В. С. Модели и методы расчета надежности технических систем / В. С. Викторова, А. С. Степанянц. М.: ЛЕНАНД, 2014. 256 с.
16. Альгин, В. Б. Расчет реальной надежности машин. Подходы ресурсной механики / В. Б. Альгин // Механика машин, механизмов и материалов. 2011. № 1 (14). С. 10–20.
17. Вопросы математической теории надежности / под ред. Б. В. Гнеденко. М.: Радио и связь, 1983. 376 с.

18. Половко, А. М., Гуров, С. В. Основы теории надежности. 2-е изд., перераб. и доп. / А. М. Половко, С. В. Гуров. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 704 с.
19. Гуров, С. В. Надежность восстанавливаемых резервированных систем с последствием отказов / С. В. Гуров, Л. В. Уткин // Автоматика и телемеханика, 2017. № 1. С. 137–151.
20. Жаднов, В. В. Определение показателей надежности систем, обладающих вспомогательными элементами / В. В. Жаднов, С. Н. Полесский // Проектирование телекоммуникационных и информационных средств и систем: сб. науч. тр. М.: МИЭМ, 2006. С. 151–158.
21. ГОСТ 9.602–2016. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Стандартинформ, 2016. 87 с.
22. ГОСТ Р 51164–98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Госстандарт России, 1998. 41 с.
9. State Standard 27.002–2015. *Reliability in Technology. Terms and Definitions*. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 23 (in Russian).
10. Mikhaylov M. I. (2022) *Reliability and Diagnostics of Technological Systems*. Minsk, Republican Institute for Higher Education. 360 (in Russian).
11. Deryushev L. G., Pham Ha Hai (2014) Standardization of Reliability Requirements for Water Supply Systems in Vietnam. *Vestnik MGSU*, (9), 7–21 (in Russian).
12. State Standard 27.301–95. *Reliability in Technology. Reliability Calculation. Basic Provisions*. Minsk, 1995. 10 (in Russian).
13. State Standard P 51901.14–2007. *Risk Management. Reliability Block Diagram and Boolean Methods*. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 23 (in Russian).
14. Belyaev Yu. K., Bogatyrev V. A., Bolotin V. V. (1985) *Reliability of Technical Systems*. Moscow, Radio i Svyaz Publ. 608 (in Russian).
15. Viktorova V. S., Stepanyants A. S. (2014) *Models and Methods for Calculating the Reliability of Technical Systems*. Moscow, LENAND Publ. 256 (in Russian).
16. Algin V. B. (2011) Calculation of Real Machine Reliability. Resource Mechanics Approaches. *Mekhanika Mashin, Mekhanizmov i Materialov = Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, (1), 10–20 (in Russian).
17. Barzilovich E. Yu., Belyaev Yu. K., Kashtanov V. A., Kovalenko I. N., Solov'ev A. D., Ushakov I. A. (1983) *Questions of Mathematical Theory of Reliability*. Moscow, Radio i Svyaz Publ. 376 (in Russian).
18. Polovko A. M., Gurov S. V. (2006) *Fundamentals of Reliability Theory*. 2nd ed. Saint Petersburg, BKhV-Peterburg Publ. 704 (in Russian).
19. Gurov S. V., Utkin L. V. (2017) Reliability of Recoverable Redundant Systems with After-Effects Failures. *Automation and Remote Control*, 78, 113–124. <https://doi.org/10.1134/S000511791701009X>.
20. Zhadnov V. V., Poletsky S. N. (2006) Determination of Reliability Indicators for Systems with Auxiliary Elements. *Proektirovanie Telekommunikatsionnykh i Informatsionnykh Sredstv i Sistem: Sb. Nauch. Tr.* [Design of Telecommunication and Information Means and Systems. Collection of Scientific Papers] Moscow, Moscow Institute of Electronic and Mathematics, 151–158 (in Russian).
21. State Standard 9.602–2016. *Unified System of Protection Against Corrosion and Aging. Underground Structures. General Requirements for Corrosion Protection*. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 87 (in Russian).
22. State Standard P 51164–98. *Main Steel Pipelines. General Requirements for Corrosion Protection*. Moscow, Gosstandart of Russia, 1998. 41 (in Russian)/

Поступила 22.08.2023

Подписана в печать 24.10.2023

Опубликована онлайн 30.11.2023

REFERENCES

1. Tsvetkov V. Ya. (2017) Complex Technical Systems. *Obrazovatelnye Resursy i Tekhnologii = Educational Resources and Technologies*, (3), 86–92 (in Russian).
2. Rozanov B. G. (1989) *Living cover of the Earth*. Moscow, Pedagogika Publ. 128 (in Russian).
3. Hurd, W., Retterer, B. L., Meister, D., Marshik, J. A., Lancaster, Y., McClure, J., Knight, L. J. (1970) *Reliability Handbook. Vol. 3*. Moscow, Mir Publ. 376 (in Russian).
4. Zinevich A. M. (1984) *Scientific and Technical Support for the Reliability of the Construction of the Linear Part of Main Pipelines*. Moscow, Informneftegazstroy Publ. 132 (in Russian).
5. Kats L., Linkovsky Zh. (1970) *Some Issues in Studying the Reliability of VNIIEgazprom* Moscow, Express-Informatsiya Publ., (23), 15–28 (in Russian).
6. Kharionovsky V. V., Rodin V. P. (1993) Issues of Reliability and Survivability of Main Pipelines as Linear Systems. *Voprosy Nadezhnosti Gazoprovodnykh Konstruktsii: Sb. Nauch. Tr.* [Issues of Reliability of Gas Pipeline Structures: Collection of Scientific Papers]. Moscow, All-Union Scientific Research Institute of Natural Gases. 125 (in Russian).
7. Rudachenko A. V., Baykin S. S. (2008) *Operational Reliability of Pipeline Systems*. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University. 118 (in Russian).
8. Deyneko S. V. (2011) *Ensuring the Reliability of Oil and gas Pipeline Transport Systems*. Moscow, Tekhnika Publ. 176 (in Russian).
9. State Standard 27.002–2015. *Reliability in Technology. Terms and Definitions*. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 23 (in Russian).
10. Mikhaylov M. I. (2022) *Reliability and Diagnostics of Technological Systems*. Minsk, Republican Institute for Higher Education. 360 (in Russian).
11. Deryushev L. G., Pham Ha Hai (2014) Standardization of Reliability Requirements for Water Supply Systems in Vietnam. *Vestnik MGSU*, (9), 7–21 (in Russian).
12. State Standard 27.301–95. *Reliability in Technology. Reliability Calculation. Basic Provisions*. Minsk, 1995. 10 (in Russian).
13. State Standard P 51901.14–2007. *Risk Management. Reliability Block Diagram and Boolean Methods*. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 23 (in Russian).
14. Belyaev Yu. K., Bogatyrev V. A., Bolotin V. V. (1985) *Reliability of Technical Systems*. Moscow, Radio i Svyaz Publ. 608 (in Russian).
15. Viktorova V. S., Stepanyants A. S. (2014) *Models and Methods for Calculating the Reliability of Technical Systems*. Moscow, LENAND Publ. 256 (in Russian).
16. Algin V. B. (2011) Calculation of Real Machine Reliability. Resource Mechanics Approaches. *Mekhanika Mashin, Mekhanizmov i Materialov = Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, (1), 10–20 (in Russian).
17. Barzilovich E. Yu., Belyaev Yu. K., Kashtanov V. A., Kovalenko I. N., Solov'ev A. D., Ushakov I. A. (1983) *Questions of Mathematical Theory of Reliability*. Moscow, Radio i Svyaz Publ. 376 (in Russian).
18. Polovko A. M., Gurov S. V. (2006) *Fundamentals of Reliability Theory*. 2nd ed. Saint Petersburg, BKhV-Peterburg Publ. 704 (in Russian).
19. Gurov S. V., Utkin L. V. (2017) Reliability of Recoverable Redundant Systems with After-Effects Failures. *Automation and Remote Control*, 78, 113–124. <https://doi.org/10.1134/S000511791701009X>.
20. Zhadnov V. V., Poletsky S. N. (2006) Determination of Reliability Indicators for Systems with Auxiliary Elements. *Proektirovanie Telekommunikatsionnykh i Informatsionnykh Sredstv i Sistem: Sb. Nauch. Tr.* [Design of Telecommunication and Information Means and Systems. Collection of Scientific Papers] Moscow, Moscow Institute of Electronic and Mathematics, 151–158 (in Russian).
21. State Standard 9.602–2016. *Unified System of Protection Against Corrosion and Aging. Underground Structures. General Requirements for Corrosion Protection*. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 87 (in Russian).
22. State Standard P 51164–98. *Main Steel Pipelines. General Requirements for Corrosion Protection*. Moscow, Gosstandart of Russia, 1998. 41 (in Russian)/

Received: 22.08.2023

Accepted: 24.10.2023

Published online: 30.11.2023

Перечень статей, опубликованных
в журнале «Наука и техника» в 2023 г.

ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Пэнхао Гу, Леоновец Ю. А., Лобатый А. А. Форсированное управление квадрокоптером . . .	2
Пэнхао Гу, Рыльков В. Н., Лобатый А. А. Экспериментальное исследование вибраций винтомоторной группы агродрона	6

ГЕОДЕЗИЯ И РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Kosarev N. S., Lechner J., Padve V. A., Umnov I. A. Results of Many Years' Measurements Conducted at the Czech State Long Distances Measuring Standard Košice (Косарев Н. С., Лехнер И., Падве В. А., Умнов И. А. Результаты многолетних измерений на линейном базисе Коштице)	1
Михайлов В. И., Куприенко Н. О. Геодезическое измерение деформаций несущих опор и конструкций здания Комаровского рынка при его эксплуатации	1

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Алексеев Ю. Г., Королёв А. Ю., Нисс В. С., Будницкий А. С. Структура и свойства черных керамических МДО-покрытий на алюминиевых сплавах	1
Баевич Г. А., Никитюк Ю. В., Мышковец В. Н., Максименко А. В., Аушев И. Ю. Оптимизация обработки стали 12X18H9T кольцевыми лазерными пучками	3
Быков К. Ю., Качанов И. В., Ленкевич С. А., Власов В. В. Акустическая методика регистрации начальной скорости деформирования при высокоскоростной штамповке стержневых изделий	1
Девоино О. Г., Туричин Г. А., Кардаполова М. А., Касач Ю. И., Погудо Е. В., Косякова И. М. Триботехнические характеристики композиционных покрытий на никелевой основе, полученных гибридными технологиями	6
Devoino O. G., Gorbunov A. V., Chenchong Wang, Volod'ko A. S., Polyakov A. N., Gorbunova V. A., Seniut' V. T., Kovaleva S. A., Koval V. A. Investigation of Upgraded Technology for Plasma Spraying of Bronze Powder Using the Combined Process with Hydrocarbon Additions (Девоино О. Г., Горбунов А. В., Ченчон Ван, Володько А. С., Поляков А. Н., Горбунова В. А., Сениуть В. Т., Ковалева С. А., Коваль В. А. Исследование модернизированной технологии плазменного напыления порошка бронзы с использованием комбинированного процесса с добавками углеводородов)	2
Коротеев А. О., Шукан Н. М., Фетисова Е. А., Коротеева А. А. Технологические особенности выбора значений параметров режима дуговой сварки в защитной газовой смеси Ar + CO ₂	4
Костюкович Г. А., Попрукайло А. В., Овчинников Е. В., Хвисевич В. М., Чекан Н. М., Веремейчик А. И. Методы создания конструкций карданных передач повышенного ресурса для наземных транспортных средств и сельскохозяйственной техники	2
Куценоленко А. В., Антонецкий А. И., Непша Д. В. Современные средства обеспечения безопасности во время движения кабины лифта вверх и при ее остановке в этажной площадке	6
Литвинко А. А. Технология горячего брикетирования отходов черных металлов в пресс-формах с подвижной матрицей	5
Луговой В. П. Сравнительный анализ перемещений ультразвуковых инструментов изогнутой формы	2
Пантелеев Ф. И., Оковитый В. А., Девоино О. Г., Литвинко А. А., Оковитый В. В., Асташинский В. М., Блюменштейн В. М. Аспекты создания многослойных покрытий методом плазменного напыления	3
Пронин А. И., Мыльников В. В., Валько Д. А., Севрюков А. С. Исследование динамики параметров обработки на режимах твердого точения	6
Сапсальев Д. В., Петровская А. С., Радюкевич Д. Л., Толстая Т. Н., Мельникова Г. Б., Чирик С. А. Структура и свойства многослойных наноконпозиционных покрытий поливинилового спирта с наночастицами оксида алюминия	5
Селивончик Н. М., Нестеренко Н. Л. Силовой расчет противоугонного кранового устройства из эксцентрикового и клинового механизмов	2

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

- Степаненко Д. А., Мудинов И., Охремчик В. А., Билейчик А. А. О возможности применения программы COMSOL Multiphysics для топологической оптимизации пластин для остеосинтеза 5

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

- Августовский П. А., Комаровская В. М. Современные тенденции в повышении функциональных свойств внутрисосудистых эндопротезов 3
- Бручковский И. И., Литвинович Г. С. Спектрометр для оценки содержания SO₂ в вулканических выбросах 5
- Козерук А. С., Сухоцкий А. А., Филонова М. И., Юринок В. И., Кузнецик В. О. Моделирование процесса формообразования стеклянных шариков по методу свободного притирания 3
- Степаненко Д. А., Еромин Е. С. Обеспечение равномерности съема припуска при магнитно-абразивной финишной обработке полупроводниковых пластин за счет управления режимами процесса обработки 6
- Тихон О. И., Мадвейко С. И. Влияние электрических характеристик импульсного источника питания СВЧ магнетрона на условия формирования плазмы в вакуумной камере плазмотрона резонаторного типа 6

СТРОИТЕЛЬСТВО

- AL-obaidi A. M. Sh., Leonovich S. N. Comparative Study of Fiber Glass Reinforced Polymer and Carbon Fiber Reinforced Polymer on Cube and Cylinder
(Аль-Обайди А. М. Ш., Леонович С. Н. Сравнительное исследование полимера, армированного стекловолокном, и полимера, армированного углеродным волокном, на кубе и цилиндре) 1
- Босаков С. В. Контактная задача для торца упругой полуполосы 2
- Босаков С. В. Расчет кольцевого свайно-плитного фундамента при условии нахождения части плиты в одной плоскости 6
- Гуриненко Н. С., Батяновский Э. И. Защитная способность цементного бетона с полифункциональной добавкой по отношению к стальной арматуре 4
- Зеленковская Ж. Л., Ковшар С. Н. Назначение и обоснование традиционных режимов тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий 2
- Кумашов Р. В. Применение способа Жемочкина в нелинейном расчете железобетонных плит покрытия автомобильных дорог на упругом основании 2
- Leonovich S. N., Sadovskaya E. A., Koleda A. A. Multi-Parameter Methodology for Assessing Quality Indicators of Nanomodified Fiber-Reinforced Concrete for Construction Site
(Леонович С. Н., Садовская Е. А., Коледа А. А. Многопараметрическая методика оценки показателей качества наномодифицированного фибробетона для строительной площадки) 5
- Ливанский Д. Г. Влияние рекламных баннеров и логотипов команд на температурный режим льда крытых ледовых катков, встраиваемых в ледовую пластину 6
- Михневич Э. И., Ли Цзэмин. Оптимизация параметров магистральных каналов в области гидравлически наивыгоднейших сечений 3
- Петрусевиц В. В. Исследование влияния состава гидрофобного профилактического «Протект-01» на физико-механические свойства материалов асфальтобетонных покрытий 4
- Повколас К. Э. Оценка эффективности некоторых способов виброизоляции существующих зданий и сооружений от вибродинамических воздействий, распространяющихся в грунтовой среде 2
- Повколас К. Э. Оценка эффективности применения горизонтальных инерционных барьеров для снижения вибраций, распространяющихся в грунтовой среде 4
- Скачѣк П. Д. Особенности нелинейного расчета изгибаемых стержней, частично опертых на упругое основание 2
- Снежков Д. Ю., Леонович С. Н., Будревич Н. А. Однородность ствола буронабивных свай по результатам четырехканального межскважинного ультразвукового мониторинга 3
- Zhang Qing, Romaniuk V. N., Khroustalev B. M., Hou Qiang, Hou Dehua. Thermodynamic Evaluation of Asphalt Concrete Properties and its Mixing Energy Consumption by Exergy Structure
(Чжан Цин, Романюк В. Н., Хрусталева Б. М., Хоу Цян, Хоу Дэхуа Термодинамическая оценка свойств и энергозатрат смешения асфальтобетона по структуре эксергии) 1

ТРАНСПОРТ

- Пегин П. А., Капский Д. В., Ильин А. А., Рунев Е. В. Метод определения достаточности сети автомобильных дорог региона 4

Сернов С. П., Балохонов Д. В., Коничева Л. М. Современное состояние и перспективы развития головного освещения транспортных средств. Часть 1: Стандартизация и основные применяемые конструкции головного освещения	1
Сернов С. П., Балохонов Д. В., Коничева Л. М. Современное состояние и перспективы развития головного освещения транспортных средств. Часть 2: Перспективные конструкции головного освещения транспортных средств	2
Чикишев Е. М., Капский Д. В., Семченков С. С. Оценка влияния транспортных и природно-климатических факторов на уровень расхода электроэнергии электробусов в условиях городской среды	1

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Esman A. K., Zykov G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K. Study of Vertically Oriented Solar Battery by Exposure of Concentrated Solar Radiation (Есман А. К., Зыков Г. Л., Потачиц В. А., Кулешов В. К. Исследование вертикально ориентированной солнечной батареи при воздействии концентрированного солнечного излучения)	5
Ласый П. Г. Приближенное решение с помощью элементарных функций смешанной задачи с краевыми условиями второго рода для одномерного волнового уравнения	3

ЭНЕРГЕТИКА

Ataullaev N. O., Dziaruhina A. A., Murodov K. S. Static Characteristics of Magnetic Modulation DC Converters with an Analog Filter (Атауллаев Н. О., Дерюгина Е. А., Муродов Х. Ш. Статические характеристики преобразователей постоянного тока с магнитной модуляцией с аналоговым фильтром)	5
Дмитриев, С. М., Буров А. Л., Демкина Т. Д., Добров А. А., Доронков Д. В., Доронкова Д. С., Курицин Д. Д., Пронин А. Н., Рязанов А. В., Солнцев Д. Н. Гидродинамика теплоносителя в активной зоне реактора PWR с ТВС-Квадрат разных конструкций	4
Кожевников М. М., Никулин В. И., Адамов С. Н. Определение энергосберегающих режимов сушки в аппарате виброкипящего слоя	3
Романюк В. Н., Струцкий Н. В. Применяемые изоляционные покрытия распределительных газопроводов в Республике Беларусь и их характеристика	4
Романюк Ф. А., Румянцев В. Ю., Новаш И. В., Румянцев Ю. В. Динамические свойства алгоритма дистанционных измерений в цифровых органах сопротивления	5
Романюк Ф. А., Румянцев В. Ю., Румянцев Ю. В., Дерюгина Е. А., Климович П. И. Принципы выполнения цифрового органа направления мощности в микропроцессорных токовых защитах	4
Рыжова Т. В., Бухаров Д. Н., Аракелян С. М. Моделирование процессов возникновения и роста фрактальных структур и дефектов камер теплоэнергетических установок. Часть 1	3
Рыжова Т. В., Бухаров Д. Н., Аракелян С. М. Моделирование процессов возникновения и роста фрактальных структур и дефектов камер теплоэнергетических установок. Часть 2	4
Седнин В. А., Игнатович Р. С., Иокова И. Л. О целесообразности строительства мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях Республики Беларусь. Часть 1: Состояние использования местных видов топлива в системах теплоснабжения	5
Седнин В. А., Игнатович Р. С., Иокова И. Л. О целесообразности строительства мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях Республики Беларусь. Ч. 2: Роль мини-ТЭЦ в системах теплоснабжения городов и населенных пунктов Беларуси	6
Струцкий Н. В., Романюк В. Н. Алгоритм расчета надежности единичного линейного участка стального подземного трубопровода	6

ЭКОНОМИКА ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Жуковский Е. М., Кравченко С. Е., Шехова Н. В. К устойчивому дорожному хозяйству через производство негаресурсов	3
Ивуть Р. Б., Попов П. В., Лапковская П. И., Прокопов С. В. Теоретико-методическое обоснование оценки и развития логистической инфраструктуры	1
Месник Д. Н., Вечёрко Д. А. Механизм развития транспортно-логистической системы: инфраструктуры электрического транспорта	5
Месник Д. Н., Вечёрко Д. А. Экономико-организационный механизм стимулирования развития экологически чистых технологий на транспорте	3
Солодовников С. Ю., Сергиевич Т. В. Организационно-экономические механизмы модернизации реального сектора: на примере легкой промышленности	1
Солодовников С. Ю., Мелешко Ю. В., Сюй Ц. Факторы развития корпоративного управления в Китае	4