

ВЕСЦІ

НАЦЫЯНАЛЬнай

АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. 2024. Т. 69, № 4

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ

АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. 2024. Т. 69, № 4

Журнал основан в 1956 г. как «Весці Акадэміі навук БССР.
Серыя фізіка-тэхнічных навук», с 1992 г. – «Весці Акадэміі навук Беларусі.
Серыя фізіка-тэхнічных навук», с 1998 г. – современное название

Выходит четыре раза в год

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,
свидетельство о регистрации № 391 от 18 мая 2009 г.

*Входит в Перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований, включен в базу данных
Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)*

Главный редактор

Сергей Антонович Чижик –

Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Редакционная коллегия

С. С. Щербаков – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
(заместитель главного редактора)

И. А. Старостина (ведущий редактор журнала)

Д. Басаран – Университет Буффало, Буффало, Соединенные Штаты Америки

П. А. Витязь – Управление аэрокосмической деятельности аппарата Национальной академии наук
Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Дзефэн Ван – Юго-Западный университет Цзяотун, Чэнду, Китайская Народная Республика

В. Г. Залесский – Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск,
Республика Беларусь

В. В. Зильбершмидт – Международный центр виброударных систем, Школа механического,
электрического и технологического машиностроения им. Вольфсона Университета Лафборо,
Лафборо, Великобритания

- А. Ф. Ильющенко** – Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии – Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, Минск, Республика Беларусь
- Б. Каталинич** – Центрально-Европейское отделение Международной инженерной академии, Вена, Австрийская Республика
- М. Консари** – Университет штата Луизиана, Батон-Руж, Соединенные Штаты Америки
- С. М. Костромицкий** – Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- А. Г. Кравцов** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- Л. Г. Красневский** – Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- А. П. Ласковнѳв** – Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- А. М. Маляревич** – Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь
- В. П. Маркевич** – Институт фотоники Университета г. Манчестер, Манчестер, Великобритания
- Н. А. Махутов** – Институт машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация
- В. В. Митюшев** – Краковский политехнический университет им. Тадеуша Костюшко, Краков, Республика Польша
- Н. К. Мышкин** – Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Республика Беларусь
- Нгуен-Ву Тронг** – Национальный институт прикладной механики и информатики Вьетнамской академии наук и технологий, Хошимин, Социалистическая Республика Вьетнам
- С. В. Панин** – Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Российская Федерация
- О. Г. Пенязков** – Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- Л. Танович** – Белградский университет, Белград, Республика Сербия
- В. М. Федосюк** – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, Минск, Республика Беларусь
- М. Л. Хейфец** – Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- Шуньин Цзи** – Совместный институт Даляньского политехнического университета и Белорусского государственного университета, Далянь, Китайская Народная Республика

*Адрес редакции:
ул. Академическая, 1, к. 118, 220072, г. Минск, Республика Беларусь.
Тел.: + 375 17 374-02-45; e-mail: fvesti@mail.ru
vestift.belnauka.by*

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ.

Серия физико-технических наук. 2024. Т. 69, №4

Выходит на русском, белорусском и английском языках

Редактор *И. А. Старостина*
Компьютерная верстка *Н. И. Каууба*

Подписано в печать 23.12.2024. Выход в свет 27.12.2024. Формат 60 × 84¹/₈. Бумага офсетная.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 74 экз. Заказ 272.
Цена номера: индивидуальная подписка – 14,01 руб., ведомственная подписка – 32,74 руб.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/18 от 02.08.2013. ЛП №02330/455 от 30.12.2013. Ул. Ф. Скорины, 40, 220084, г. Минск, Республика Беларусь

© Оформление. РУП «Издательский дом «Беларуская навука»,
Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук, 2024

PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

PHYSICAL-TECHNICAL SERIES, 2024, vol. 69, no. 4

The Journal was founded in 1956 under the titles
“Proceedings of the Academy of Sciences of BSSR. Physical-technical series”,
since 1992 – “Proceedings of the Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series”,
since 1998 – it comes under its actual title

Issued four times a year

Founder is the National Academy of Sciences of Belarus

The Journal was registered on May 18, 2009 by the Ministry of Information of the Republic of Belarus
in the State Registry of Mass Media, reg. no. 391

*The Journal is included in The List of Journals for Publication of the Results
of Dissertation Research in the Republic of Belarus and in the database
of Russian Science Citation Index (RSCI)*

E d i t o r - i n - C h i e f

Sergei A. Chizhik – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

E d i t o r i a l B o a r d

Sergei S. Sherbakov – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
(Deputy Editor-in-Chief)

Irina A. Starostsina (lead editor)

Cemal Basaran – University of Buffalo, Buffalo, United States of America

Pyotr A. Vityaz – Department of Aerospace Activities of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk,
Republic of Belarus

Zefeng Wang – Southwest Jiaotong University, Chengdu, People’s Republic of China

Vitali G. Zalesski – Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk,
Republic of Belarus

Vadim V. Silberschmidt – International Centre of Vibro-Impact Systems, Wolfson School of Mechanical
and Manufacturing Engineering at Loughborough University, Loughborough, United Kingdom

Aliaksandr Ph. Ilyshchanka – State Scientific and Production Association of Powder Metallurgy –
Academician O. V. Roman Institute of Powder Metallurgy, Minsk, Republic of Belarus

Branko Katalinic – Central-European Branch of the International Engineering Academy, Vienna, Republic
of Austria

Michael Khonsari – Louisiana State University, Baton Rouge, United States of America

Sergei M. Kostromitsky – Radio Engineering Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk,
Republic of Belarus

Alexander G. Kravtsov – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic
of Belarus

Leonid G. Krasnevski – Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences
of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Alexander P. Laskovnev – Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
Alexander M. Malyarevich – Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus
Vladimir P. Markevich – Photon Science Institute and School of Electrical and Electronic Engineering, University of Manchester, Manchester, United Kingdom
Nikolay A. Makhutov – Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
Vladimir V. Mityushev – Cracow University of Technology, Krakow, Republic of Poland
Nikolai K. Myshkin – V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus
Nguyen-Vu Truong – National Institute of Applied Mechanics and Informatics, Vietnam Academy of Science and Technology, Ho Chi Minh City, Socialist Republic of Vietnam
Sergey V. Panin – Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation
Oleg G. Penyazkov – A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
Lyubodrag Tanovich – University of Belgrade, Belgrade, Republic of Serbia
Valery M. Fedosyuk – Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
Mikhail L. Kheifetz – Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
Shunying Ji – Joint Institute of Dalian University of Technology and Belarusian State University, Dalian, People's Republic of China

Address of the Editorial Office:
1, Akademicheskaya Str., room 118, 220072, Minsk, Republic of Belarus.
Tel.: +375 17 374-02-45; e-mail: ftvesti@mail.ru
vestift.belnauka.by

PROCEEDING OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS.
Physical-technical series, 2024, vol. 69, no. 4
Printed in Russian, Belarusian and English languages

Editor *I. A. Starostina*
Computer imposition *N. I. Kashuba*

It is sent of the press 23.12.2024. Appearance 27.12.2024. Format $60 \times 84^{1/8}$. Offset paper. The press digital.
Printed pages 10,23. Publisher's signatures 11,3. Circulation 74 copies. Order 272.
Number price: individual subscription – 14,01 byn., departmental subscription – 32,74 byn.

Publisher and printing execution:
Republican unitary enterprise "Publishing House "Belaruskaya navuka"
Certificate on the state registration of the publisher, manufacturer, distributor of printing editions No. 1/18 dated August 2, 2013. License for the press No. 02330/455 dated December 30, 2013. Address: 40, F. Scorina Str., Minsk, 220084, Republic of Belarus.

© Formalization. RUE "Publishing House "Belaruskaya Navuka",
Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series, 2024

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Лапицкая В. А., Трухан Р. Э., Хабарова А. В., Кузнецова Т. А., Чижик С. А., Соловьёв Я. А., Пилипенко В. А., Люцко К. С., Насевич А. А., Гуанбин Ю. Влияние быстрого термического отжига на механические свойства субмикроструктур на основе плёнок никеля и хрома (на английском языке) 271

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

Базров Б. М., Хейфец М. Л., Гуревич В. Л. Структура конструкции изделия и оценка уровня его сложности с позиций трудоёмкости изготовления и эффективности эксплуатации 279
Савенко В. С., Чэнь Янцзы. Повышение эксплуатационных характеристик алюминия путем электропластической деформации 286

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

Жданов В. Л., Пустоход Е. А., Чорный А. Д. Интенсификация теплообмена в воздушном канале продольными вихрями 297
Гринчук П. С., Лузин В. Г. Повышение надёжности высокотемпературных электрических нагревателей типа радиационная труба на основе методов теории графов 307

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Гусинский А. В., Забеньков И. И., Свирид М. С., Кондрашов Д. А., Солонович С. С. Радиовысотометры с частотной модуляцией зондирующего сигнала 318
Лагунович Н. Л. Приборно-технологическое моделирование $p-n^+$ -перехода в прямоугольной и цилиндрической системах координат 329

ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

Лопатин С. Н., Журавков М. А., Передрий П. С. Комплексная оценка устойчивости подземных горных выработок при различных горнотехнических условиях 340

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)**CONTENTS****MATERIALS SCIENCES AND ENGINEERING, METALLURGY**

- Lapitskaya V. A., Trukhan R. E., Khabarova A. V., Kuznetsova T. A., Chizhik S. A., Solovjov Ja. A., Pilipenko V. A., Liutsko K. S., Nasevich A. A., Guangbin Yu.** Influence of rapid thermal treatment on the mechanical properties of submicrostructures based on nickel and chrome films 271

MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS

- Bazrov B. M., Kheifetz M. L., Hurevich V. L.** Structure of the product design and assessment of its complexity level from the point of labor intensity of manufacturing and operational efficiency 279
- Savenko V. S., Chen Yangtzi.** Improving the operating characteristics of aluminium by electroplastic deformation 286

POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

- Zhdanov V. L., Pustokhod E. A., Chorny A. D.** Heat transfer enhancement in air channel by longitudinal vortexes 297
- Grinchuk P. S., Luzin V. G.** Increasing the reliability of high-temperature electric heaters of the radiant tube type based on graph theory methods 307

RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING

- Gusinskiy A. V., Zabenkov I. I., Svirid M. S., Kondrashov D. A., Solonovich S. S.** Radio altimeters with frequency modulation of the probing signal 318
- Lagunovich N. L.** The device-process simulation of $p-n^+$ junction in rectangular and cylindrical coordinate systems. 329

DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS

- Lapatsin S. N., Zhuravkov M. A., Piaredryi P. S.** Complex estimation of the underground excavations stability in various mining and geological conditions 340

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ
MATERIALS SCIENCES AND ENGINEERING, METALLURGY

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-271-278>
UDC 539.25



Original article

**Vasilina A. Lapitskaya^{1*}, Ruslan E. Trukhan¹, Anastasiya V. Khabarova¹,
Tatyana A. Kuznetsova¹, Sergei A. Chizhik¹, Jaroslav A. Solovjov², Vladimir A. Pilipenko²,
Karyna S. Liutsko³, Anastasiya A. Nasevich³, Guangbin Yu⁴**

¹*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus*

²*JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company,
121, A. Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus*

³*Belarusian National Technical University,
65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus*

⁴*School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology,
92, Xida Str., Nangang, 150001, Harbin, China*

**INFLUENCE OF RAPID THERMAL TREATMENT ON THE MECHANICAL
PROPERTIES OF SUBMICROSTRUCTURES BASED ON NICKEL
AND CHROME FILMS**

Abstract. The results of a study of the phase composition, surface morphology, grain size and mechanical properties of submicrostructures based on chromium and nickel before and after rapid thermal treatment (RTT) at temperatures from 200 to 550 °C are presented. Surface morphology and grain size were determined using atomic force microscopy. Mechanical properties were determined by nanoindentation. Rapid thermal treatment of nickel and chromium films significantly affects the change in phase composition, surface morphology, grain size and properties. The formation of silicides (according to the diffusion mechanism) and new phases occurs in the films: the CrSi₂ phase is formed at temperatures of 350 °C and above, the Ni₂Si phase at 300 °C, and the NiSi phase at 350 °C and above. When the phase composition changes, the grain size increases. In the RTT ranges from 200 to 300 °C and from 450 to 550 °C for chromium-based submicrostructures, the correlation between microhardness and grain size is carried out according to the Hall–Petch law – microhardness increases with decreasing grain size. For nickel-based submicrostructures, the Hall–Petch law is satisfied in the temperature range from 200 to 300 °C and from 500 to 550 °C. In the temperature range of 300–450 °C for chromium-based submicrostructures and 300–500 °C for nickel-based submicrostructures, microhardness decreases with decreasing grain size and vice versa, i.e. a “negative Hall–Petch effect” occurs. This effect is associated with the phase transitions Cr → CrSi₂ and Ni → Ni₂Si → NiSi, restructuring of submicrostructures due to the diffusion mechanism, morphological rearrangement of vacancy defects and annealing of point defects inside grains, as well as the corresponding reconstruction of grain boundaries. The considered submicrostructures based on chromium and nickel can be used in microelectronics for Schottky diodes, ohmic contacts and gates.

Keywords: thin films, nickel and chrome silicides, silicon substrate, rapid thermal treatment, grain size, mechanical properties, atomic force microscopy, nanoindentation

Acknowledgements: the work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grants no. T23ME-010 and no. T17KIG-009).

Conflict of interest: the team of authors includes the Editor-in-Chief of the Journal, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Engineering), Professor S. A. Chizhik.

* Corresponding author / Автор, ответственный за переписку.

Information about the authors: *Vasilina A. Lapitskaya* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0002-3245-5945>. E-mail: vasilinka.92@mail.ru; *Ruslan E. Trukhan* – Junior Researcher at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0002-9565-9232>. E-mail: ruslan.trukhan@mail.ru; *Anastasiya V. Khabarova* – Junior Researcher at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0002-8780-7717>. E-mail: av.khabarova@mail.ru; *Tatyana A. Kuznetsova* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor. <https://orcid.org/0000-0002-3993-3559>. E-mail: kuzn06@mail.ru; *Sergei A. Chizhik* – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Heat Transfer and Mechanics of Micro- and Nanoscale Systems at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0002-5301-0195>. E-mail: chizhik_sa@tut.by; *Jaroslav A. Solovjov* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Scientific and Technical Center – Head of the Laboratory, JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company. E-mail: jsolovjov@integral.by. <https://orcid.org/0000-0001-6332-7631>; *Vladimir A. Pilipenko* – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Deputy Head of the State Center “Belmicroanalysis”, JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company. E-mail: office@bms.by; *Karyna S. Liutsko* – Senior Lecturer at Belarusian National Technical University. E-mail: liutsko@bntu.by; *Anastasiya A. Nasevich* – Master’s Student at Belarusian National Technical University. E-mail: anastasiya.kozulya@mail.ru; *Guangbin Yu* – Dr. Sci. (Engineering), Professor at School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology. E-mail: yugb@hit.edu.cn

Contribution of the authors: *Vasilina A. Lapitskaya* – concept description, experimental research design, instrumental research, data collection and systematization, comparative analysis, manuscript text writing, formulation of conclusions; *Ruslan E. Trukhan* – instrumental research, data collection and systematization; *Anastasiya V. Khabarova* – instrumental research, data collection and systematization; *Tatyana A. Kuznetsova* – concept description, experimental research design; *Sergei A. Chizhik* – interpretation of research results, manuscript text editing; *Jaroslav A. Solovjov* – concept description, experimental research design, instrumental research, data collection and systematization, manuscript text editing; *Vladimir A. Pilipenko* – interpretation of research results, manuscript text editing; *Karyna S. Liutsko* – instrumental research; *Anastasiya A. Nasevich* – instrumental research; *Guangbin Yu* – interpretation of research results, manuscript text editing.

For citation: Lapitskaya V. A., Trukhan R. E., Khabarova A. V., Kuznetsova T. A., Chizhik S. A., Solovjov Ja. A., Pilipenko V. A., Liutsko K. S., Nasevich A. A., Guangbin Yu. Influence of rapid thermal treatment on the mechanical properties of submicrostructures based on nickel and chrome films. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 4, pp. 271–278. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-271-278>

Received: 02.09.2024

Approved for publication: 16.12.2024

Signed to the press: 23.12.2024

Оригинальная статья

**В. А. Лапицкая^{1*}, Р. Э. Трухан¹, А. В. Хабарова¹, Т. А. Кузнецова¹, С. А. Чижик¹,
Я. А. Соловьёв², В. А. Пилипенко², К. С. Люцко³, А. А. Насевич³, Гуанбин Ю⁴**

¹Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца, 121А, 220108, Минск, Республика Беларусь,

³Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь

⁴Факультет мехатроники, Харбинский технологический институт,
92, Xida Str., Наньган, 150001, Харбин, Китайская Народная Республика

ВЛИЯНИЕ БЫСТРОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУБМИКРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК НИКЕЛЯ И ХРОМА

Аннотация. Представлены результаты исследования фазового состава, морфологии поверхности, размера зерна и механических свойств субмикроструктур на основе хрома и никеля до и после быстрой термической обработки при температуре от 200 до 550 °С. Морфологию поверхности и размер зерна определяли с помощью атомно-силового микроскопии, механические свойства – методом наноидентификации. Быстрая термическая обработка субмикроструктур на основе никеля и хрома существенно влияет на изменение фазового состава, морфологии поверхности, размера зерна и свойств. Происходит формирование силицидов (по диффузионному механизму) и новых фаз: фаза CrSi₂ формируется при температуре 350 °С и выше, фаза Ni₂Si – при 300 °С, а фаза NiSi – при 350 °С и выше. При изменении фазового состава происходит рост размера зерна. В диапазонах БТО от 200 до 300 °С и от 450 до 550 °С для субмикроструктур на основе хрома корреляция микротвердости и размера зерна выполняется согласно закону Холла–Петча – микротвердость растет с уменьшением размера зерна. Для субмикроструктур на основе никеля закон Холла–Петча выполняется в диапазоне температур от 200 до 300 °С и от 500 до 550 °С. В диапазоне температур 300–450 °С для субмикроструктур на основе хрома и 300–500 °С для субмикроструктур на

основе никеля микротвердость снижается с уменьшением размера зерна и наоборот, то есть происходит «отрицательный эффект Холла–Петча». Такой эффект связан с фазовыми переходами $\text{Cr} \rightarrow \text{CrSi}_2$ и $\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}_2\text{Si} \rightarrow \text{NiSi}$, реструктуризацией субмикроструктур из-за диффузионного механизма, морфологической перестройки вакансионных дефектов и отжигом точечных дефектов внутри зерен, а также соответствующей реконструкцией межзеренных границ. Рассмотренные субмикроструктуры на основе хрома и никеля можно применять в микроэлектронике для диодов Шоттки, омических контактов и затворов.

Ключевые слова: тонкие пленки, силициды никеля и хрома, кремниевая подложка, быстрая термическая обработка, размер зерна, механические свойства, атомно-силовая микроскопия, наноиндентирование

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (гранты № Т23МЭ-010 и № Т17КИГ-009).

Конфликт интересов: в составе авторского коллектива – главный редактор журнала академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор С. А. Чижик.

Информация об авторах: *Лапицкая Василина Александровна* – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0002-3245-5945>. E-mail: vasilinka.92@mail.ru; *Трухан Руслан Эдуардович* – младший научный сотрудник Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0002-9565-9232>. E-mail: ruslan.trukhan@mail.ru; *Хабарова Анастасия Викторовна* – младший научный сотрудник Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0002-8780-7717>. E-mail: av.khabarova@mail.ru; *Кузнецова Татьяна Анатольевна* – кандидат технических наук, доцент. <https://orcid.org/0000-0002-3993-3559>. E-mail: kuzn06@mail.ru; *Чижик Сергей Антонович* – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заведующий отделением теплообмена и механики микро- и наноразмерных систем Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0002-5301-0195>. E-mail: chizhik_sa@tut.by; *Соловьёв Ярослав Александрович* – кандидат технических наук, доцент, начальник научно-технического центра – заведующий лабораторией ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». <https://orcid.org/0000-0001-6332-7631>. E-mail: jsolovjov@integral.by; *Пилипенко Владимир Александрович* – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заместитель начальника Государственного центра «Белмикрoанализ», ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». E-mail: office@bms.by; *Люцко Карина Сергеевна* – старший преподаватель Белорусского национального технического университета. E-mail: liutsko@bntu.by; *Насевич Анастасия Александровна* – магистрант Белорусского национального технического университета. E-mail: anastasiya.kozulya@mail.ru; *Гуанбин Ю* – доктор технических наук, профессор, Факультет мехатроники Харбинского технологического института. E-mail: yugb@hit.edu.cn

Вклад авторов: *Лапицкая Василина Александровна* – обоснование концепции, разработка дизайна экспериментального исследования, проведение инструментальных исследований, сбор и систематизация данных, написание текста рукописи, формулировка выводов; *Трухан Руслан Эдуардович* – проведение инструментальных исследований, сбор и систематизация данных; *Хабарова Анастасия Викторовна* – проведение инструментальных исследований, сбор и систематизация данных; *Кузнецова Татьяна Анатольевна* – обоснование концепции, разработка дизайна экспериментального исследования; *Чижик Сергей Антонович* – интерпретация результатов исследования, редактирование текста рукописи; *Соловьёв Ярослав Александрович* – обоснование концепции, разработка дизайна экспериментального исследования, проведение инструментальных исследований, сбор и систематизация данных, редактирование текста рукописи; *Пилипенко Владимир Александрович* – интерпретация результатов исследования, редактирование текста рукописи; *Люцко Карина Сергеевна* – проведение инструментальных исследований; *Насевич Анастасия Александровна* – проведение инструментальных исследований; *Гуанбин Ю* – интерпретация результатов исследования, редактирование текста рукописи.

Для цитирования: Влияние быстрого термического отжига на механические свойства субмикроструктур на основе пленок никеля и хрома / В. А. Лапицкая [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 68, № 4. – С. 271–278. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-4-271-278>

Поступила в редакцию: 02.09.2024

Утверждена к публикации: 16.12.2024

Подписана в печать: 23.12.2024

Introduction. Transition metal silicides are good electrical conductors with resistivity comparable to that of metals and metal alloys. They also have good thermoelectric properties [1]. These silicides find application as: the Schottky barriers and ohmic contacts [2], gate and interconnect metals, epitaxial conductors in heterostructures [3] since they have lower electrical resistance than polycrystalline silicon and are compatible with the silicon substrate.

Some of the widely available metals for the formation of silicides are Cr and Ni. A common method for obtaining silicides based on these metals is rapid heat treatment of the metal layer on the surface of the silicon wafer. The reaction of Cr and Si results in the formation of the CrSi_2 phase at temperatures of 350 °C and above [4, 5]. During heat treatment of Ni on Si, Ni_2Si silicides are formed (at temperatures of 200–300 °C) with subsequent phase transition to NiSi and NiSi_2 at temperatures above 350 °C [6]. Silicides based on Cr and Ni are used to create barriers for Schottky diodes, interconnections and contacts in integrated circuits [6–10].

Studies of the properties of Cr and Ni silicides are mainly focused on their phase composition and electrophysical characteristics. Mechanical properties (which are not unimportant) have been studied to a small extent or for a very long time [11, 12]. When studying the mechanical properties of nickel silicides, difficulties arose due to the brittleness of the materials obtained [13], and chromium silicide study was carried out mainly for bulk materials [14]. The elastic modulus of CrSi_2 was determined by the ultrasonic method and calculated using the first principles method [15]. The use of a modern nanoindentation method and small loads (from μN to mN) allows working with small thicknesses and volumes of material [16], which opens up opportunities for determining the mechanical properties of thin nanometer films.

The *aim of the work* is to determine the mechanical properties of submicrostructures based on nickel and chromium films before and after rapid thermal treatment at temperatures from 200 to 550 °C.

Materials and research methods. Chromium (Cr) and nickel (Ni) films were deposited on silicon substrates by magnetron sputtering of 99.5 % pure chromium and nickel targets in 99.993 % pure argon using an SNT Sigma installation (StratNanoTek Invest, Belarus) [17, 18]. For chromium films, the discharge pressure and power during deposition were 0.5 Pa and 5.1 kW (the power density was about 5.85 W/cm^2 at a discharge voltage of 680 V), respectively, and for nickel films – 0.35 Pa and 7.1 kW (the power density was about 8.15 W/cm^2 at a discharge voltage of 480 V), respectively. The silicon substrates were epitaxial layers of phosphorus-doped silicon with a resistivity of 0.58–0.63 $\text{Ohm} \cdot \text{cm}$ and a thickness of 5.3–5.8 μm , formed on substrates of *p*-type single-crystal silicon with a resistivity of 10 $\text{Ohm} \cdot \text{cm}$ and orientation (111). Before deposition of Ni and Cr films, the substrates were treated first in an ammonium peroxide solution and then in an aqueous HF solution.

Then the substrates with Cr and Ni films were subjected to rapid thermal treatment (RTT) in the heat balance mode by irradiating the back side of the substrates with an incoherent light flux of constant power quartz halogen lamps in a nitrogen environment for 7 s until the temperature reached 200 to 550 °C using a JetFirst 100 setup (Jipelec Qualiflow, France). The temperature of the working side of the substrate was controlled by a thermocouple with an accuracy of ± 0.5 °C.

The phase composition was studied by X-ray diffraction (XRD) analysis using an ULTIMA IV diffractometer (Rigaku, Tokyo, Japan).

Film thickness was determined by scanning electron microscopy (SEM) on an S-4800 device (Hitachi, Tokyo, Japan). To determine the film thickness, a vertical cleavage of a silicon wafer with a film was made and its SEM image was obtained.

The surface structure of Cr- and Ni-based submicrostructures before and after RTA was studied on a Dimension FastScan atomic force microscope (AFM) (Bruker, USA) in the PeakForce QNM mode using a standard CSG10_SS silicon cantilever (TipsNano, Russia) with a tip radius of 5 nm and a cantilever stiffness of 0.3 N/m.

The physical and mechanical properties (elastic modulus E and microhardness H) were determined on a Hysitron 750 Ubi nanoindenter (Bruker, USA). Nine indentations were performed with a load of 50 μN (for Cr-based submicrostructures) and 100 μN (for Ni-based submicrostructures). The indentation depth did not exceed 1/10 of the film thickness in order to exclude the influence of the substrate on the E and H values.

Results and discussion. SEM images of cross sections of samples with films showed an increase in thickness with increasing RTT temperature (Fig. 1, 2). The initial film thickness was: for Cr – 27.8 nm, for Ni – 59.5 nm. A significant increase in thickness occurs after RTT at 350–400 °C for Cr films (up to 66.1 nm) and after RTT at 300–350 °C for Ni films (up to 139 nm). RTT of nickel and chromium films also significantly affects the change in phase composition, surface morphology, grain size and electrophysical properties. These changes are described in more detail in [17, 18]. Let us note the main points:

1. During RTT, silicides and new phases are formed. Thus, in Cr-based films, the CrSi_2 phase is formed at temperatures of 350 °C and above (Fig. 1 *c, d*) [17]. In Ni-based films, the Ni_2Si phase is formed first at 300 °C, and then the NiSi phase at 350 °C and above (Fig. 2, *b–d*) [18]. Phase transitions are the main reason for the formation of new submicrostructures, changes in surface morphology, grain size, and electrophysical properties.

2. In the RTT temperature range from 400 to 550 °C, the surface of the Cr/Si structure acquires a wavy texture (see Figure 1 *c, d*), caused by the phase transition of the Cr film into the CrSi_2 layer with a large lattice parameter and formed due to the diffusion of silicon atoms from the substrate into the

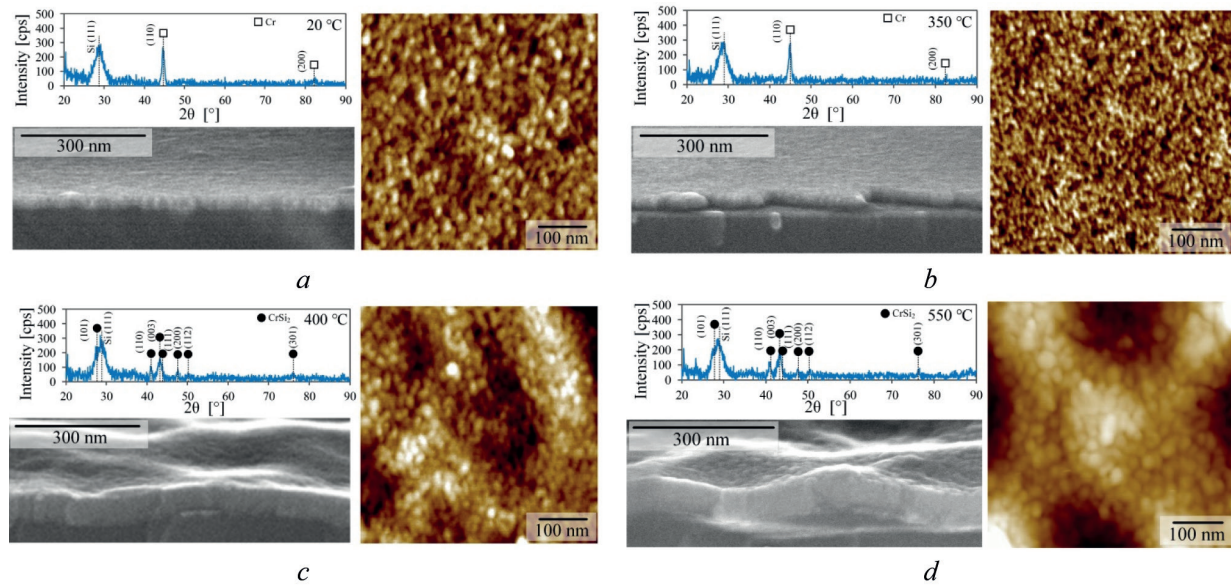


Fig. 1. X-ray phase analysis, SEM images of a cross section and AFM images of the surface of heterostructures based on chrome films after RTT: *a* – initial film; *b* – at 350 °C; *c* – at 400 °C; *d* – 550 °C

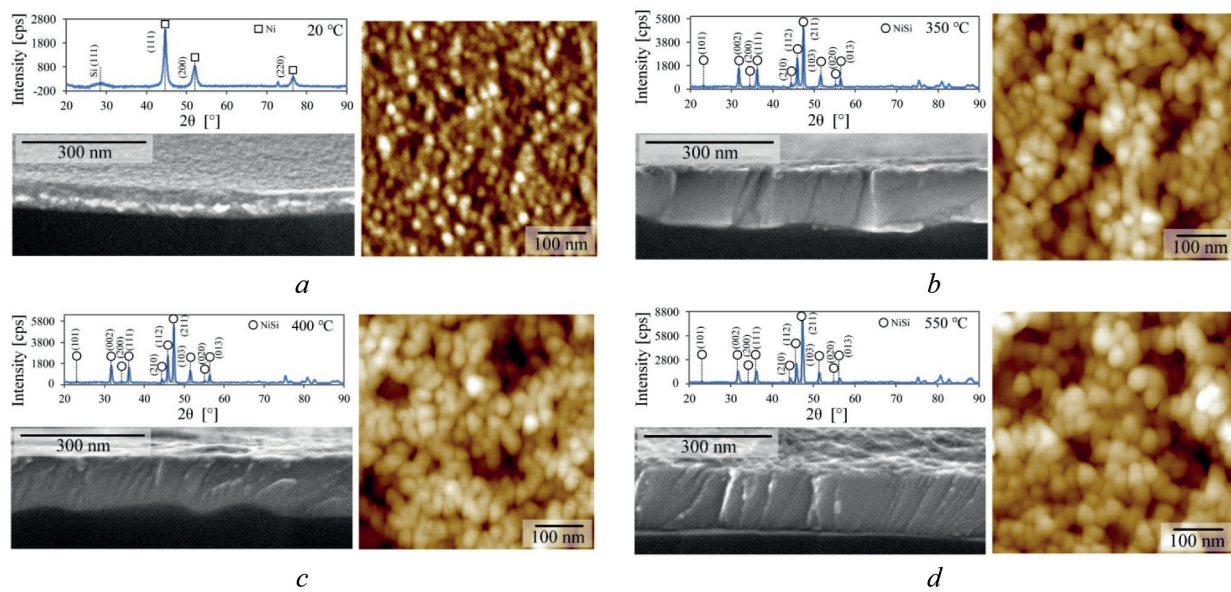


Fig. 2. X-ray phase analysis, SEM images of a cross section and AFM images of the surface of heterostructures based on nickel films after RTT: *a* – initial film; *b* – at 350 °C; *c* – at 400 °C; *d* – 550 °C

growing layer. These phase changes are accompanied by an increase in the size of the crystalline grains and cause an increase in the surface roughness parameters, specific surface energy and specific resistance of the CrSi_2 layers [17]. RTT at temperatures of 200–250 °C leads to coarsening of the nickel film grains due to the formation of the Ni_2Si phase, and then the NiSi phase (see Figure 2, *b–d*). In this case, there is an increase in roughness and average grain size, and the specific electrical resistance decreases.

3. The formation of Cr and Ni silicides occurs by a diffusion mechanism – diffusion of Ni atoms into the substrate and diffusion of silicon atoms from the substrate into the Cr film [8, 10, 17–22].

The mechanical properties (elastic modulus E and microhardness H) of submicrostructures based on nickel and chromium films before and after RTT are shown in Table and Figure 3. On Cr-based submicrostructures, there is an almost direct dependence of the elastic modulus on the grain size (see Table), while on Ni-based submicrostructures there is no correlation (see Table). The elastic modulus

Grain size and elastic modulus of submicrostructures based on nickel and chromium films before and after RTT

RTT temperature, °C	Cr-based submicrostructures		Ni-based submicrostructures	
	Grain size, nm	Elastic modulus, E , GPa	Grain size, nm	Elastic modulus E , GPa
Initial	15.2 ± 1.4	254 ± 37	18.7 ± 4.1	170 ± 3
200	10.4 ± 0.9	203 ± 23	21.7 ± 5.4	95 ± 4
250	12.2 ± 1.1	74 ± 11	23.1 ± 7.2	149 ± 15
300	11.8 ± 1.1	118 ± 89	24.9 ± 5.3	129 ± 19
350	11.3 ± 1.0	152 ± 16	27.4 ± 6.3	179 ± 20
400	16.4 ± 1.5	156 ± 23	24.3 ± 6.3	152 ± 23
450	18.1 ± 1.6	131 ± 14	25.9 ± 6.7	141 ± 15
500	20.1 ± 1.8	94 ± 21	24.8 ± 8.9	161 ± 18
550	26.6 ± 2.4	116 ± 31	29.9 ± 8.7	127 ± 12

changes in the range of values: for Cr – from 74 to 254 GPa, for Ni – from 95 to 170 GPa. In this case, the maximum values were obtained on the original submicrostructures.

In the RTT ranges from 200 to 300 °C and from 450 to 550 °C for Cr-based submicrostructures, the correlation of microhardness and grain size is performed according to the Hall–Petch law [16, 23] (Figure 3, *a*) – microhardness increases with decreasing grain size. The same thing happens for Ni-based submicrostructures in the temperature range from 200 to 300 °C and from 500 to 550 °C (see Figure 2, *b*). The “negative Hall–Petch effect” [16, 24] (i.e. microhardness decreases with decreasing grain size and vice versa) occurs in the temperature range of 300–450 °C for Cr and 300–500 °C for Ni (see Figure 3, red areas on the graphs).

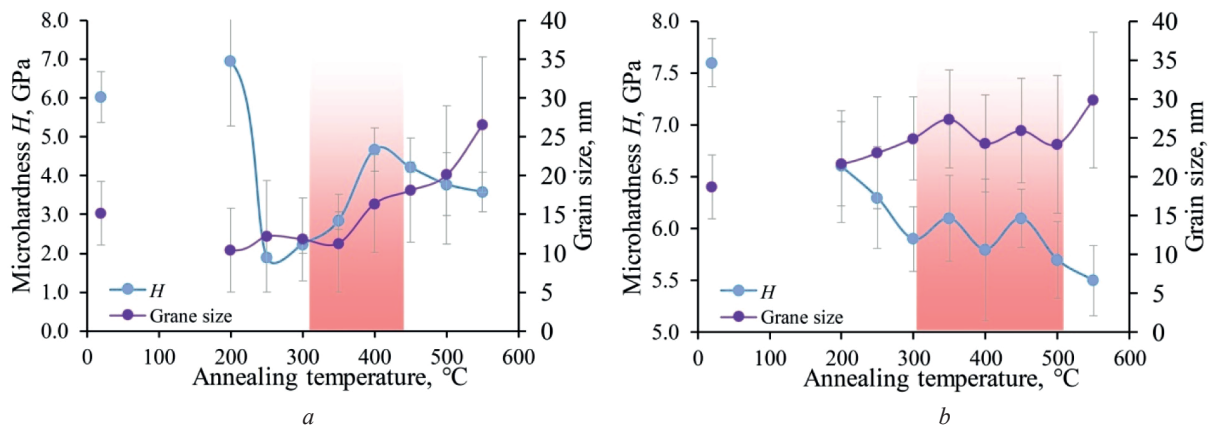


Fig. 3. Dependence of microhardness and grain size on RTT temperature for heterostructures based on chromium (*a*) and nickel (*b*) films

The maximum microhardness of 5.1 GPa was obtained for the initial nickel-based submicrostructure without heat treatment. For chromium-based submicrostructures, the maximum microhardness was 6.9 GPa at 200 °C. The failure to observe the Hall–Petch law in the above temperature ranges (see Figure 3, red areas on the graphs) is probably associated with the phase transitions $\text{Cr} \rightarrow \text{CrSi}_2$ and $\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}_2\text{Si} \rightarrow \text{NiSi}$ [17, 18], film restructuring due to the diffusion mechanism, morphological rearrangement of vacancy defects in the Ni film [25], and annealing of point defects inside the grains of polycrystalline Cr and the corresponding reconstruction of grain boundaries [26].

Conclusion. The study examined the effect of the rapid thermal treatment at temperatures from 200 to 550 °C on the microstructure and mechanical properties of the submicrostructures based on nickel and chromium films. Silicides (by the diffusion mechanism) and new phases are formed in the films: the CrSi_2 phase at temperatures of 350 °C and above, the Ni_2Si phase at 300 °C, and then the NiSi phase at 350 °C and above. When the phase composition changes, the grain size increases and the surface morphology changes. The elastic modulus changes in the following range: for Cr – from 74 to 254 GPa, for Ni – from 95 to 170 GPa. In the RTT ranges from 200 to 300 °C and from 450 to 550 °C for Cr-based submicrostructures, the correlation of microhardness and grain size is performed according to the Hall–

Petch law. For Ni-based submicrostructures, the Hall-Petch law is valid in the temperature range of 200 to 300 °C and 500 to 550 °C. The “negative Hall–Petch effect” occurs in the temperature range of 300–450 °C for chromium submicrostructures and 300–500 °C for the nickel submicrostructures (associated with the phase transitions, restructuring, rearrangement of vacancy defects, annealing of point defects within grains and reconstruction of grain boundaries).

References

1. Shishido T., Okada S., Ishizawa Y., Kudou K., Iizumi K., Sawada Y., Horiuchi H. [et al.]. Molten metal flux growth and properties of CrSi₂. *Journal of Alloys and Compounds*, 2004, vol. 383, iss. 1–2, pp. 319–321. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.04.037>
2. Murarka Sh. P. *Silicides for VLIC*. Moscow, Mir Publ., 1986. 176 p. (in Russian).
3. Kumar K. S. Intermetallics: Silicides. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. 2nd ed. Elsevier, 2001, pp. 4243–4246. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00744-0>
4. Zhu J., Barbier D., Mayet L., Gavand M., Chaussemy G. Interstitial chromium behaviour in silicon during rapid thermal annealing. *Applied Surface Science*, 1989, vol. 36, iss. 1–4, pp. 413–420. [https://doi.org/10.1016/0169-4332\(89\)90937-9](https://doi.org/10.1016/0169-4332(89)90937-9)
5. D’Anna E., Leggieri G., Luches A., Majni G., Ottaviani G. Chromium silicide formation under pulsed heat flow. *Thin Solid Films*, 1986, vol. 136, iss. 1, pp. 93–104. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(86\)90112-4](https://doi.org/10.1016/0040-6090(86)90112-4)
6. Liu C. M., Liu W. L., Hsieh S. H., Tsai T. K., Chen W. J. Interfacial reactions of electroless nickel thin films on silicon. *Applied Surface Science*, 2005, vol. 243, iss. 1–4, pp. 259–264. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.09.110>
7. Deneb Menda U., Özdemir O., Tatar B., Ürgen M., Kutlu K. Transport and storage properties of CrSi₂/Si junctions made using the CAPVD technique. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2010, vol. 13, iss. 4, pp. 257–266. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2010.12.002>
8. Zhao F. F., Zheng J. Z., Shen Z. X., Osipowicz T., Gao W. Z., Chan L. H. Thermal stability study of NiSi and NiSi₂ thin films. *Microelectronic Engineering*, 2004, vol. 71, iss. 1, pp. 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2003.08.010>
9. Okubo K., Tsuchiya Y., Nakatsuka O., Sakai A., Zaima S., Yasuda Y. Influence of structural variation of Ni silicide thin films on electrical property for contact materials. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, vol. 43, pp. 1896. <https://doi.org/10.1143/JJAP.43.1896>
10. Waidmann S., Kahlert V., Streck C., Press P., Kammler T., Dittmar K., Rinderknecht J. Tuning nickel silicide properties using a lamp based RTA, a heat conduction based RTA or a furnace anneal. *Microelectronic Engineering*, 2006, vol. 83, iss. 11–12, pp. 2282–2286. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2006.10.020>
11. Ren B., Lu D. H., Zhou R., Ji D. P., Hu M. Y., Feng J. First principles study of stability, mechanical, and electronic properties of chromium silicides. *Chinese Physics B*, 2018, vol. 27, art. ID 107102. <http://dx.doi.org/10.1088/1674-1056/27/10/107102>
12. Wang L., Gao Y., Xue Q. A comparative study on the tribological behavior of nanocrystalline nickel and cobalt coatings correlated with grain size and phase structure. *Materials Chemistry and Physics*, 2006, vol. 99, iss. 1, pp. 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.10.014>
13. Laptev A. A., Belomyttsev M. Yu., Laptev A. I. Mechanical properties of nickel-silicon alloys. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2014, vol. 57, no. 5, pp. 47–50 (in Russian) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-5-47-50>
14. Chu F., Lei M., Maloy S.A., Petrovic J. J., Mitchell T. E. Elastic properties of C40 transition metal disilicides. *Acta Materialia*, 1996, vol. 44, iss. 8, pp. 3035–3048. [https://doi.org/10.1016/1359-6454\(95\)00442-4](https://doi.org/10.1016/1359-6454(95)00442-4)
15. Pan Y. Structural Prediction and Overall Performances of CrSi₂ Disilicides: DFT Investigations. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, vol. 8, iss. 29, pp. 11024–11030. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c04737>
16. Golovin Yu. I. *Nanoindentation and Its Capabilities*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 312 p. (in Russian).
17. Kuznetsova T., Lapitskaya V., Solovjov J., Chizhik S., Pilipenko V., Aizikovich S. Properties of CrSi₂ Layers Obtained by Rapid Heat Treatment of Cr Film on Silicon. *Nanomaterials*, 2021, vol. 11, iss. 7, art. ID 1734. <https://doi.org/10.3390/nano11071734>
18. Lapitskaya V., Trukhan R., Kuznetsova T., Solovjov J., Chizhik S., Pilipenko V., Liutsko K. [et al.]. Microstructure and Properties of Thin-Film Submicrostructures Obtained by Rapid Thermal Treatment of Nickel Films on Silicon. *Surfaces*, 2024, vol. 7, iss. 2, pp. 196–207. <https://doi.org/10.3390/surfaces7020196>
19. Gül F. Addressing the sneak-path problem in crossbar RRAM devices using memristor-based one Schottky diode-one resistor array. *Results Physics*, 2019, vol. 12, pp. 1091–1096. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.12.092>
20. Galkin N. G., Astashynski V. M., Chusovitin E. A., Galkin K. N., Dergacheva T. A., Kuzmitski A. M., Kostyukovich E. A. Ultra high vacuum growth of CrSi₂ and β-FeSi₂ nanoislands and Si top layers on the plasma modified monocrystalline silicon surfaces. *Physics Procedia*, 2011, vol. 11, pp. 39–42. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.01.009>
21. Adusumilli P., Seidman D. N., Murray C. E. Silicide-phase evolution and platinum redistribution during silicidation of Ni_{0.95}Pt_{0.05}/Si(100) specimens. *Journal of Applied Physics*, 2012, vol. 112, iss. 6, p. 11. <http://doi.org/10.1063/1.4751023>
22. Peter A. P., Meersschaert J., Richard O., Moussa A., Steenbergen J., Schaekers M., Adelmann C. Phase formation and morphology of nickel silicide thin films synthesized by catalyzed chemical vapor reaction of nickel with silane. *Chemistry of Materials*, 2015, vol. 27, iss. 1, pp. 245–254. <http://doi.org/10.1021/cm503810p>
23. Meyers M. A., Mishra A., Benson D. J. Mechanical properties of nanocrystalline materials. *Progress in Materials Science*, 2006, vol. 51, pp. 427–556. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2005.08.003>

24. Suzdalev I. P. *Nanotechnology. Physicochemistry of Nanoclusters, Nanostructures and Nanomaterials*. Moscow, KomKniga Publ., 2006. 592 p. (in Russian).

25. Pilipenko V. A., Solovjov J. A., Gaiduk P. I. Nickel silicide formation with rapid thermal treatment in the heat balance mode. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 1, pp. 111–118 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-1-111-118>

26. Solovjov J. A., Pilipenko V. A., Gaiduk P. I. Structure and morphology of CrSi_2 layers formed by rapid thermal treatment. *Doklady BGUIR*, 2020, vol. 18, no. 4, pp. 71–79 (in Russian). <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-4-71-79>

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА
MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-279-285>
УДК 621.92.941.95.005



Оригинальная статья

Б. М. Базров¹, М. Л. Хейфец^{2*}, В. Л. Гуревич³

¹*Институт машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук,
Малый Харитоньевский переулок, 4, 101000, Москва, Российская Федерация*

²*Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь*

³*Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220072, Минск, Республика Беларусь*

**СТРУКТУРА КОНСТРУКЦИИ ИЗДЕЛИЯ И ОЦЕНКА УРОВНЯ ЕГО СЛОЖНОСТИ
С ПОЗИЦИЙ ТРУДОЕМКОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
И ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Аннотация. Базируясь на том, что сложность конструкции изделия влияет на трудоемкость его изготовления и эффективность эксплуатации, сформулировано понятие сложности изделия по определению количества уровней структуры конструкции. Предлагается представить структуру конструкции изделия с помощью графа, отражающего связи между элементами конструкции изделия, а их подчиненность показывать посредством конструкторских баз каждого элемента и описывать количеством уровней и числом элементов на каждом уровне графа. Показано, что структура конструкции влияет на построение маршрута сборочного технологического процесса изделия. В связи с этим предложено дополнить исходные данные для проектирования сборочного технологического процесса графом с указанием на его ребрах модулей соединений. Это позволяет при наличии элементной базы средств технологического обеспечения модулей соединений определять ожидаемую трудоемкость сборки изделия.

Ключевые слова: изделие, элемент, структура, конструкция, уровень, граф, модуль соединения

Конфликт интересов: в составе авторского коллектива – член редакционной коллегии доктор технических наук, профессор М. Л. Хейфец.

Информация об авторах: *Базров Борис Мухтарбекович* – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией «Теория модульной технологии» Института машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук. E-mail: modul_lab@mail.ru; *Хейфец Михаил Львович* – доктор технических наук, профессор, директор Института прикладной физики Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0002-6942-3605>. E-mail: mlk-z@mail.ru; *Гуревич Валерий Львович* – кандидат технических наук, доцент, Белорусский национальный технический университет. <https://orcid.org/0000-0001-9071-2746>. E-mail: valery.hurevich@gmail.com

Вклад авторов: *Базров Борис Мухтарбекович* – разработка метода оценки уровня сложности конструкции изделия с позиций трудоемкости его изготовления и эффективности эксплуатации; *Хейфец Михаил Львович* – анализ уровня сложности конструкции изделия с позиций теории организации сложных систем, написание текста статьи; *Гуревич Валерий Львович* – анализ уровня сложности конструкции изделия с позиций унификации и стандартизации.

Для цитирования: Базров, Б. М. Структура конструкции изделия и оценка уровня его сложности с позиций трудоемкости изготовления и эффективности эксплуатации / Б. М. Базров, М. Л. Хейфец, В. Л. Гуревич // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 4. – С. 279–285. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-279-285>

Поступила в редакцию: 15.08.2024

Утверждена к публикации: 16.12.2024

Подписана в печать: 23.12.2024

© Базров Б. М., Хейфец М. Л., Гуревич В. Л., 2024

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

*Original article***Boris M. Bazrov¹, Mikhail L. Kheifetz^{2*}, Valery L. Hurevich³**¹*A. A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences,
4, Maly Kharitonyevsky Lane, 101000, Moscow, Russian Federation*²*Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus*³*Belarusian National Technical University,
65, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus***STRUCTURE OF THE PRODUCT DESIGN AND ASSESSMENT
OF ITS COMPLEXITY LEVEL FROM THE POINT OF LABOR INTENSITY
OF MANUFACTURING AND OPERATIONAL EFFICIENCY**

Abstract. Based on the fact that the complexity of the product design affects the labor intensity of its manufacture and the efficiency of operation, the concept of product complexity is formulated by determining the number of levels of the design structure. It is proposed to describe the structure of the product design using a graph reflecting the connections between the elements of the product design, and to show their subordination using the design bases of each element and describe the number of levels and the number of elements at each level of the graph. It is shown that the structure of the design affects the construction of the route of the assembly technological process of the product. In this regard, it is proposed to supplement the initial data for designing the assembly technological process with a graph indicating the connection modules on its edges. This allows, in the presence of an element base of the means of technological support for the connection modules, determination of the expected labor intensity of the product assembly.

Keywords: product, element, structure, construction, level, graph, connection module

Conflict of interest: the author's team includes the member of the Editorial Board Dr. Sci. (Engineering), Professor Mikhail L. Kheifetz.

Information about the authors: *Boris M. Bazrov* – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Laboratory “Theory of Modular Technology” at A. A. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences. E-mail: modul_lab@mail.ru; *Mikhail L. Kheifetz* – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Director at Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0002-6942-3605>. E-mail: mlk-z@mail.ru; *Valery L. Hurevich* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor at Belarusian National Technical University. <https://orcid.org/0000-0001-9071-2746>. E-mail: valery.hurevich@gmail.com

Contribution of the authors: *Boris M. Bazrov* – development and testing of a method for improving the manufacturability of a product design at the stage of creating its working documentation, editing the manuscript; *Mikhail L. Kheifetz* – development of recommendations for improving the manufacturability of a product design depending on the scale of its production, writing the text of the article; *Valery L. Gurevich* – analysis of the level of complexity of the product design from the standpoint of unification and standardization.

For citation: Bazrov B. M., Kheifetz M. L., Hurevich V. L. Structure of the product design and assessment of its complexity level from the point of labor intensity of manufacturing and operational efficiency. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 4, pp. 279–285 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-279-285>

Received: 15.08.2024

Approved for publication: 16.12.2024

Signed to the press: 23.12.2024

Введение. Понятие «сложность» относится к предметной области информации или энтропии, и, согласно взглядам основоположников теории организации сложных систем [1–3], к нему применимы законы термодинамики. Так, по мнению Дж. фон Неймана [3], со сложностью связана эффективность – способность делать нечто существенное. В этом смысле объект или конструкция производимого изделия обладает очень высокой сложностью, если он способен решать весьма сложные задачи.

Как показано ранее [2, 3], когда количество элементарных частей изделия ниже некоторого минимального числа, сложность изделия носит вырождающийся характер: если один объект создает другой, то последний менее сложен, чем первый. Если же число элементарных частей превышает минимум, то объект-автомат конструирует объекты равной или более высокой сложности. Величина этого минимума зависит от того, как определены элементарные части.

По мнению Дж. фон Неймана, все это останется на уровне нечетких утверждений, если не дано корректное определение понятия сложности для детального рассмотрения конструкций, иллюстрирующих свойства сложности [3]. При этом под термином «сложность» в последнее

время некоторые исследователи понимают способность выделить и сохранить отдельные элементы в системе [4–6], независимо от того это биты в компьютере или нейроны в мозге [7].

Исходя из этого, применительно к машиностроительному производству сложность конструкции изделия является, с одной стороны, свойством конструкции, а с другой – характеристикой качества конструкции изделия и влияет на трудоемкость его изготовления и эффективность эксплуатации.

Оценка уровня сложности важна на этапе проектирования изделия, когда требуется выбрать решение из нескольких вариантов. В связи с этим необходимо оценивать уровень сложности конструкции изделия, а для этого требуется сформулировать понятие сложности конструкции изделия машиностроения.

Сложность конструкции изделия определена в [8, 9] следующим образом: с одной стороны, она есть мера затрат производственных ресурсов на изготовление машиностроительного изделия, с другой стороны, она является неотъемлемым атрибутом самого изделия, комплексно учитывающим его структурные и субстантные характеристики в соответствии со сложившимся уровнем средств производства.

Под сложностью конструкции изделий в [10] понимается относительная характеристика их состава и структурного исполнения. Она определяет конструктивные дополнительные признаки и соответствующие требования к обеспечению технологической рациональности конструкции изделия.

В результате связи между сложностью изделия и технико-экономическими показателями технологии его изготовления и условий эксплуатации уже отражаются при анализе конструкций в машиностроении. Однако в этих формулировках не отражено понятие меры сложности конструкции изделия, что на этапе его проектирования вызывает затруднение в выборе наилучшего варианта решения.

Для оценки уровня сложности конструкции изделия в [11, 12] был предложен коэффициент, равный отношению числа элементов конструкции к числу элементов аналога. Однако существуют, во-первых, зависимость уровня сложности конструкции изделия от выбранного аналога, во-вторых, даже при одинаковом числе элементов в двух аналогах при наличии разницы в конструкциях их элементов уровень сложности конструкции изделия будет разным.

Поэтому *цель исследования* – разработка понятия сложности изделия и определение ее меры, в качестве которой предложен уровень сложности конструкции.

Уровень сложности конструкции изделия. Понятие уровня сложности конструкции не должно зависеть от конкретной конструкции изделия, у которого нет аналога, чтобы можно было оценить ее уровень сложности.

В связи с этим возникает проблема, как оценить этот уровень, следовательно, необходимо разработать метод определения уровня сложности конструкции изделия без учета аналога.

Если принять в качестве уровня сложности конструкции изделия одинаковое количество элементов в двух изделиях, то при одинаковом количестве элементов в их составе трудоемкость изготовления и эксплуатации может отличаться из-за разной сложности элементов, входящих в эти изделия.

Чтобы сформулировать понятие сложности конструкции изделия, воспользуемся наличием связи между сложностью конструкции изделия и ее структурой: чем сложнее конструкция изделия, тем сложнее ее структура. Структура конструкции изделия включает в себя относительное расположение элементов его конструкции, их видов и количество элементов каждого вида.

Рассмотрим возможность изучения структуры конструкции изделия с помощью графа, который описывается числом уровней с указанием числа элементов, располагающихся на каждом уровне.

Для такого представления конструкции изделия необходимо определиться с понятием элемента изделия. В качестве элемента выступают как узлы, так и отдельные детали. Однако неопределенность понятия узла приводит к неоднозначному описанию изделия, когда одно и то же изделие может быть представлено разной совокупностью узлов. В связи с этим рекомендуется

в качестве узла принять модуль [13], который представляет собой конструктивное решение, предназначенное выполнять соответствующую служебную функцию.

По функциональному назначению предлагается [13–15] модули изделия разделить на две группы: модули функциональные технологические (МФТ) и модули функциональные обслуживающие (МФО). Под МФТ будем понимать конструктивное решение, с помощью которого изделие выполняет свое служебное назначение, под МФО – конструктивное решение, которое обеспечивает функционирование МФТ.

Разница между модулями заключается в том, что МФТ принадлежит только к изделиям одного служебного назначения. Например, у грузового автомобиля в качестве МФТ выступают кузов для размещения груза и ходовая часть, обеспечивающая перемещение груза; в качестве МФО – двигатель, трансмиссия, рулевое управление, которые могут участвовать в изделиях различного служебного назначения, в то время как кузов и ходовая часть принадлежат только транспортному изделию. Рассмотрим и другой пример: в токарно-винторезном станке в качестве МФТ выступают патрон для установки заготовки и резцедержатель для установки инструмента, а в качестве МФО – коробка скоростей, коробка подач, электродвигатель и др.

Для описания структуры конструкции изделия воспользуемся графом конструкции изделия, который строится следующим образом (рис. 1): вершиной графа является базовая деталь; на первом уровне располагаются элементы, базирующиеся непосредственно на базовой детали; на втором уровне – элементы, базами которых являются элементы первого уровня, и т. д. Такой граф отражает наличие связи между элементами конструкции изделия, их подчиненность, показывая базы каждого элемента, но при этом, в отличие от чертежа, он не отражает их относительное расположение в конструкции изделия.

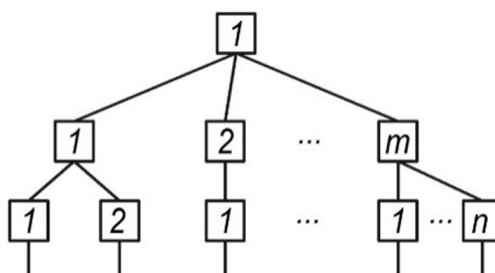


Рис. 1. Граф конструкции изделия

Fig. 1. Graph of the product design

Построение графа должно заканчиваться уровнем, на котором располагаются последние элементы. Для повышения информативности о конструкции изделия целесообразно на ребрах графа указывать модули соединений.

Сложность конструкции изделия должна описываться двумя характеристиками: числом уровней и количеством элементов на каждом уровне. В общем случае структура изделия содержит группу уровней с расположенными на них элементами.

Таким образом, в основе предлагаемой оценки уровня сложности конструкции изделия лежит уровень сложности структуры конструкции изделия, для определения которого следует воспользоваться графом.

Построение маршрута сборочного процесса. Оценка сложности конструкции изделия имеет практическое значение как с технологической точки зрения, так и с позиций надежности при эксплуатации изделия, включающей в себя понятие ремонтпригодности. Структура конструкции изделия влияет на построение маршрута его сборочного процесса, который может быть использован или доработан при техническом обслуживании и ремонте изделия и отражать его ремонтпригодность при эксплуатации.

Уровни графа конструкции изделия показывают последовательность присоединяемых групп элементов изделия в сборочном процессе. По этой причине исходные данные на проектирование сборочного процесса следует дополнить графом конструкции изделия. Наличие графа определяет последовательность сборки изделия на уровне групп элементов. Различие числа уровней гра-

фа и их последовательность указывают на группы элементов и их очередность в процессе сборки изделия. На ребрах графа целесообразно указывать вид соединения в виде соответствующего модуля соединения (МС). Под МС понимается совмещение комплекта вспомогательных баз (комплект баз присоединяемой детали) с комплектом основных баз деталей (комплект баз, принадлежащий базовой детали).

Любая деталь может быть представлена совокупностью модулей поверхностей (МП) [13, 14]. Под МП понимается сочетание поверхностей детали, предназначенное для выполнения соответствующей служебной функции детали. Согласно классификации модулей поверхностей детали [10] все модули поверхности делятся на три класса – базирующие (МПБ), рабочие (МНР) и связующие (МПС).

Первый тип (МПБ) представляет собой комплект баз, номенклатура которых ограничена 14 вариантами [13, 14]. При этом базирующим модулям Б11, Б211, Б221, Б311, Б321, Б41, Б51 соответствуют ответные им по конструктивному оформлению и характеристикам базирующие модули Б12, Б212, Б222, Б312, Б322, Б42, Б52 [15].

Совмещение этих модулей создает соединение деталей, или МС.

Как следует из парности базирующих модулей поверхностей, номенклатура МС ограничена семью видами: $МС1 = \frac{Б11}{Б12}$; $МС2 = \frac{Б211}{Б212}$; $МС3 = \frac{Б221}{Б222}$; $МС4 = \frac{Б311}{Б312}$; $МС5 = \frac{Б321}{Б322}$; $МС6 = \frac{Б41}{Б42}$; $МС7 = \frac{Б51}{Б52}$.

В тех случаях, когда МПБ, расположенный в числителе МС, переходит из категории комплекта вспомогательных баз в категорию комплекта основных баз, модули соединения можно представить следующим образом: $МС1' = \frac{Б12}{Б11}$; $МС2' = \frac{Б212}{Б211}$; $МС3' = \frac{Б222}{Б221}$; $МС4' = \frac{Б312}{Б311}$; $МС5' = \frac{Б322}{Б321}$; $МС6' = \frac{Б42}{Б41}$; $МС7' = \frac{Б52}{Б51}$.

Таким образом, все разнообразие соединений деталей в любых изделиях ограничено 14 вариантами модулей соединений (МС и МС').

В итоге структуру любой конструкции изделия можно описать с помощью графа – многоуровневой схемы с элементами, расположенными на разных уровнях. После того как на графе все узлы будут представлены соответствующими группами деталей, располагающимися на разных уровнях, получим множество деталей, составляющих конструкцию изделия. Если представить каждую деталь совокупностью соответствующих МП, то описание конструкции изделия на нижнем уровне будет состоять из множества МП и множества МС соответствующих видов. В итоге конструкцию изделия можно описать множеством МП и МС с указанием их видов и количества каждого вида.

Наличие элементной базы средств технологического обеспечения (ЭБТО) на уровне предмета производства МП, МС позволит определить ожидаемую трудоемкость сборки изделия и изготовления деталей. Построение ЭБТО модулей соединений следует начинать с построения классификации модулей соединения, где в качестве первой отличительной характеристики должен выступать их вид. Так как число видов данных модулей ограничено семью наименованиями, ЭБТО окажется громоздкой, поэтому рекомендуется строить элементную базу для каждого вида МС. В основе построения такой базы должна быть положена классификация МС, где в качестве отличительных характеристик следует принять размерные характеристики и уровень точности.

Например, модуль соединения содержит три поверхности – отверстие, торец и шпоночный паз (рис. 2). В качестве отличительных признаков выступают диаметр отверстия (d), его длина (l), диаметр торца (D), ширина и высота шпоночного паза (соответственно b и h).

На *первом* уровне классификации принимается отношение l/d , на *втором* уровне – размер d , на *третьем* уровне с учетом связи характеристик высоты и ширины шпоночного паза с диаметром отверстия – ширина паза b , а на *четвертом* – уровень точности. Диаметр d делится на диапазоны номинальных размеров согласно системе допусков и посадок¹. Для каждого диапазона размерных характеристик МС в ЭБТО указывают трудоемкость соединения.

¹ ГОСТ 25346-2013 (ISO 286-1:2010). Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки. М.: Стандартинформ, 2019. 35 с. ; ISO 286-1:2010. Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes. Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits.

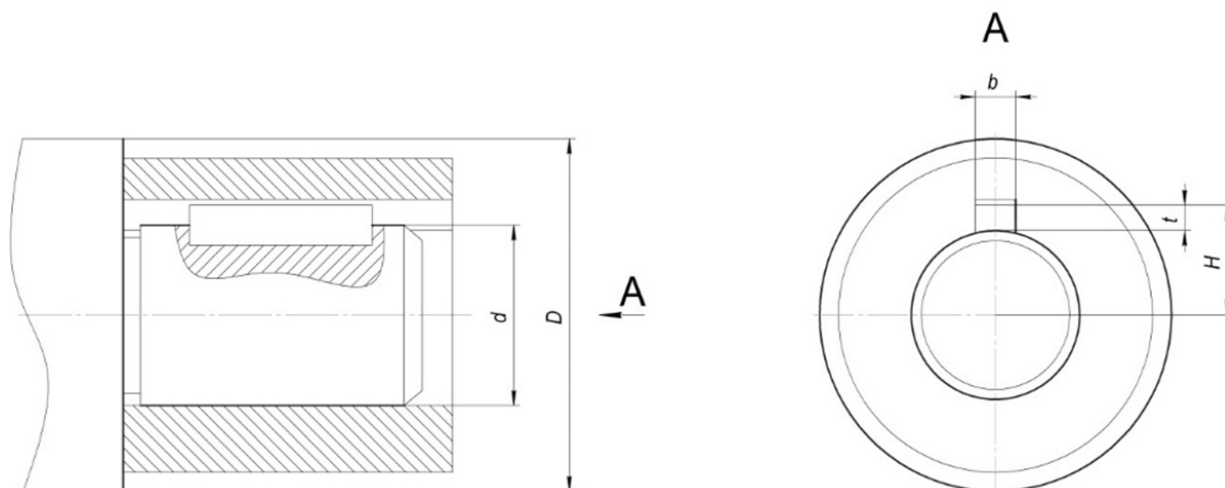


Рис. 2. Пример модуля соединения

Fig. 2. Example of a connection module

Таким образом, наличие ЭБТО позволяет оценивать варианты структуры конструкции изделия по их трудоемкости.

Заключение. Предложено оценивать сложность конструкции изделия машиностроения характеристиками ее структуры, включающей в себя пространственное расположение элементов конструкции с указанием их видов и количества каждого вида.

Показано, что структура конструкции изделия может быть представлена графом конструкции изделия, который показывает связи между элементами конструкции, а их базы отражают пространственное расположение элементов конструкции изделия и характеризуют компоновку изделия.

Установлено, что определять уровень сложности конструкции изделия целесообразно числом уровней графа и количеством его элементов, располагающихся на каждом уровне, а изделие представлять множеством модулей поверхностей и модулей соединений с указанием их видов и количеством каждого вида.

Рекомендовано включать в исходные данные для проектирования маршрута сборочного процесса граф конструкции изделия, который определяет последовательность операций сборки изделия.

Список использованных источников

1. Бриллюэн, Л. Наука и теория информации / Л. Бриллюэн. – М.: Физматгиз, 1960. – 342 с.
2. Бёркс, А. Предварительное рассмотрение логической конструкции электронного вычислительного устройства / А. Бёркс, Х. Голдстейн, Дж. фон Нейман // Кибернетический сборник. – М.: Мир, 1964. – Т. 9. – С. 7–67.
3. Нейман, Дж. фон. Теория самовоспроизводящих автоматов / Дж. фон Нейман. – М.: Мир, 1971. – 342 с.
4. Lewin, R. Complexity: Life at the Edge of Chaos / R. Lewin. – New York: Macmillan, 1992. – 208 p.
5. Waldrop, M. Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos / M. Waldrop. – New York: Simon & Schuster, 1992. – 380 p.
6. Emmeche, C. The Garden in the Machine: The Emerging Science of Artificial Life / C. Emmeche. – Princeton: Princeton University Press, 1994. – 214 p. <https://doi.org/10.1515/9780691225159>
7. Coveney, P. Frontiers of Complexity. The Search for order in a Chaotic World / P. Coveney, R. Highfield. – London: Faber, 1995. – xviii, 462 p.
8. Коршунов, А. И. Исследование конструктивно-технологической сложности машиностроительного изделия / А. И. Коршунов // Фундаментальные исследования. – 2006. – № 11. – С. 36–37.
9. Коршунов, А. И. Введение в теорию конструктивно-технологической сложности изделий машиностроения / А. И. Коршунов // Современные наукоемкие технологии. – 2004. – № 2. – С. 66–67.
10. Ерёмин, А. А. Конструктивная сложность как мера технологичности изделий в машиностроении / А. А. Ерёмин, О. А. Ямникова // Актуальные вопросы науки и техники: сб. науч. тр. по итогам междунар. науч.-практ. конф. (7 апр. 2015 г.). – Самара, 2015. – Вып. 2. – С. 40–42.

11. Машиностроение: энциклопедия: в 40 т. / ред. совет: К. В. Фролов (пред.) [и др.]. – М.: Машиностроение [и др.], 2003–2016. – Т. III-5: Технология сборки в машиностроении / А. А. Гусев [и др.]; под общ. ред. Ю. М. Соломенцева. – 2006. – 640 с.
12. Ямникова, О. А. Оценка конструктивно-технологической сложности деталей на этапе проектирования / О. А. Ямникова, Д. И. Троицкий, А. А. Ерёмин // Механика XXI века. – 2016. – № 5. – С. 75–80.
13. Базров, Б. М. Модульная технология / Б. М. Базров // Научные технологии в машиностроении. – 2011. – № 4. – С. 3–10.
14. Базров, Б. М. Базис технологической подготовки машиностроительного производства / Б. М. Базров. – М.: КУРС, 2023. – 324 с.
15. Базров, Б. М. Метод представления изделия как объекта цифровизации производства структурированным множеством модулей / Б. М. Базров, М. Л. Хейфец // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 377–384. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-377-384>

References

1. Brillouin L. *Science and Theory of Information*. New York, Academic Press, 1956. 320 p.
2. Burks A., Goldstein H., Neumann J. von. Preliminary consideration of the logical design of an electronic computing device. *Kiberneticheskii sbornik* [Cybernetic Collection]. Moscow, Mir Publ., 1964, vol. 9, pp. 7–67 (in Russian).
3. Neumann J. von. *Theory of Self-Reproducing Automata*. Urbana; London, University of Illinois Press, 1966. XIX, 388 p.
4. Lewin R. *Complexity: Life at the Edge of Chaos*. New York, Macmillan, 1992. 208 p.
5. Waldrop M. *Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*. New York, Simon & Schuster, 1992. 380 p.
6. Emmeche C. *The Garden in the Machine: The Emerging Science of Artificial Life*. Princeton, Princeton University Press, 1994. 214 p. <https://doi.org/10.1515/9780691225159>
7. Coveney P., Highfield R. *Frontiers of Complexity. The Search for order in a Chaotic World*. London, Faber, 1995. xviii, 462 p.
8. Korshunov A. I. Study of the structural and technological complexity of a mechanical engineering product. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*, 2006, no. 11, pp. 36–37 (in Russian).
9. Korshunov A. I. Introduction to the theory of structural and technological complexity of mechanical engineering products. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern High Technologies*, 2004, no. 2, pp. 66–67 (in Russian).
10. Eremin A. A., Yamnikova O. A. Structural complexity as a measure of manufacturability of products in mechanical engineering. *Aktual'nye voprosy nauki i tekhniki: sbornik nauchnykh trudov po itogam mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (7 aprelya 2015 g.)*. [Topical Issues of Science and Technology: a Collection of Scientific Papers on the Results of the International Scientific and Practical Conference (April 7, 2015)]. Samara, 2015, iss. 2, pp. 40–42 (in Russian).
11. Gusev A. A., Pavlov V. V., Andreev A. G. [et al.]. *Mechanical Engineering: Encyclopedia. Vol. III-5 Mechanical Engineering. Assembly Technology in Mechanical*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 640 p. (in Russian).
12. Yamnikova O. A., Troitsky D. I., Eremin A. A. Evaluation of the design and technological complexity of parts at the design stage. *Mekhanika XXI veku* [Mechanics of the XXI century], 2016, no. 5, pp. 75–80 (in Russian).
13. Bazrov B. M. Modular technology. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2011, no. 4, pp. 3–10 (in Russian).
14. Bazrov B. M. *Basis of Technological Preparation of Mechanical Engineering Production*. Moscow, KURS Publ., 2023. 324 p. (in Russian).
15. Bazrov B. M., Kheifetz M. I. Method of presenting a product as an object of digitalization of manufacturing by a structured set of modules. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 3, pp. 377–384 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-377-384>

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-286-296>
УДК 669.2/8:620



Оригинальная статья

В. С. Савенко*, Чэнь Янцзы

*Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина,
ул. Студенческая, 28, 247760, Мозырь, Гомельская область, Республика Беларусь*

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛЮМИНИЯ
ПУТЕМ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

Аннотация. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований электропластического волочения (ЭПВ) электротехнического алюминия на промышленном многоходовом стане. Рассмотрено влияние импульсного тока плотностью $\sim 10^3$ А/мм² и длительностью $\sim 10^{-4}$ с на реализацию ЭПВ в деформационном узле с волокой, нагруженной выше предела текучести, в условиях возбуждения электронной подсистемы металла, и показана принципиальная возможность управления деформационными процессами для улучшения физико-механических свойств технического алюминия. Выявлено, что в условиях электропластичности за счет пондеромоторных эффектов в зоне деформации с периодичностью импульсов тока на фронте их нарастания создается ультразвуковая вибрация, которая обуславливает дополнительные механические напряжения остова кристаллической решетки и активно влияет на кинетику пластической деформации, что способствует улучшению характеристик. Области технологического применения ЭПВ являются сверхтонкое, тонкое волочение проволоки (до диаметра ~ 1 мм), прокатка тонкого листа, вытяжка и штамповка материала. Указанные технологии обеспечивают выпуск самой массовой продукции металлообрабатывающей промышленности.

Ключевые слова: алюминий, электропластическая деформация, пондеромоторное действие тока, пинч- и скин-эффекты, импульсный ток, собственное магнитное поле, вихревое электрическое поле, поле Холла, микротвердость

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Савенко Владимир Семенович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики и математики Мозырского государственного педагогического университета имени И. П. Шамякина. E-mail: savenko.vladimir195@gmail.com; Чэнь Янцзы – аспирант кафедры физики и математики Мозырского государственного педагогического университета имени И. П. Шамякина. E-mail: 494650763@qq.com

Вклад авторов: Савенко Владимир Семенович – обоснование концепции, разработка методологии исследования, систематизация данных, написание текста рукописи, формулировка выводов; Чэнь Янцзы – проведение инструментального исследования, сбор данных.

Для цитирования: Савенко, В. С. Повышение эксплуатационных характеристик алюминия путем электропластической деформации / В. С. Савенко, Чэнь Янцзы // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 4. – С. 286–296. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-286-296>

Поступила в редакцию: 06.12.2023

Доработанный вариант: 16.10.2024

Утверждена к публикации: 16.12.2024

Подписана в печать: 23.12.2024

Original article

Vladimir S. Savenko*, Chen Yangzi

*Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamyakin,
28, Studencheskaya Str., 247760, Mozyr, Gomel Region, Republic of Belarus*

**IMPROVING THE OPERATING CHARACTERISTICS OF ALUMINIUM
BY ELECTROPLASTIC DEFORMATION**

Abstract. The article presents the results of theoretical and experimental studies of electroplastic deformation by drawing (EPD) of electrical aluminum on an industrial multi-pass mill. The influence of a pulsed current with a density of $\sim 10^3$ A/mm² and a duration of $\sim 10^{-4}$ s on the implementation of EPT in a deformation unit loaded above the yield limit, under conditions of excitation of the electronic subsystem of the metal, is considered, and the fundamental possibility of programmed

control of deformation processes for modifying the physical and mechanical properties of technically important materials is shown. It was revealed that under conditions of electroplasticity, due to ponderomotive effects in the deformation zone, with the periodicity of current pulses at the front of their increase, ultrasonic vibration is created, causing additional mechanical stresses of the crystal lattice skeleton and actively influencing the kinetics of plastic deformation with improving the service characteristics of the material. The areas of technological application of EPV are drawing of ultra-fine, thin wire (up to ~ 1 mm in diameter), rolling of thin sheets, drawing and stamping of material. The installed technologies correspond to the most widespread production in the metalworking industry.

Keywords: aluminum, electroplastic deformation, ponderomotive action of current, pinch and skin effect, pulsed current, intrinsic magnetic field, vortex electric field, Hall field, microhardness

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interests.

Information about the authors: *Vladimir S. Savenko* – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Physics and Mathematics Department at Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamyakin. E-mail: savenko.vladimir195@gmail.com; *Chen Yangzi* – Graduate Student of the Physics and Mathematics Department at Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamyakin. E-mail: 494650763@qq.com

Contribution of the authors: *Vladimir S. Savenko* – concept development, research methodology, systematization of data, writing the text of the manuscript, formulation of conclusions; *Chen Yangzi* – carrying out instrumental research, collecting data.

For citation: Savenko V. S., Chen Yangtzi. Improving the operating characteristics of aluminium by electroplastic deformation. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 4, pp. 286–296 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-286-296>

Received: 06.12.2023

Modified: 16.10.2024

Approved for publication: 16.12.2024

Signed to the press: 23.12.2024

Введение. В настоящее время перспективным направлением развития физики твердого тела и физического материаловедения является создание высокоинтенсивных технологий для получения материалов с комплексом высоких физико-механических и эксплуатационных характеристик.

Не связанное с тепловым действием тока явление прямого действия электрического тока высокой плотности на пластическую деформацию металла (электропластический эффект, ЭПЭ) было обнаружено О. А. Троицким при действии одиночными импульсами тока плотностью ~ 10^5 A/cm^2 и длительностью ~ 10^{-4} с на деформацию кристаллов цинка растяжением и сжатием [1]. Эффект проявлялся в скачкообразном характере удлинения образцов при прохождении по ним импульса тока без какого-либо существенного теплового эффекта и тепловой дилатации. Исследователь высказал предположение, что в основе нового эффекта лежит ускорение пластического течения металла потоком электронов проводимости, которые, помимо джоулевого эффекта, способны оказывать специфическое электропластическое действие на металл, находящийся под механическими напряжениями выше предела текучести. Г. Конрад с соавторами наблюдали ЭПЭ с аналогичными параметрами тока на образцах титана, ряд других авторов исследовали широкий спектр проводящих металлов при различных видах пластической деформации, включая сложно-напряженное состояние [2–4].

Электропластичность обуславливает ряд факторов вторичного силового пондеромоторного действия импульсного тока на пластическую деформацию металла, таких как пинч- и скин-эффекты, возникающие под влиянием собственного магнитного поля тока и поляризации электронной подсистемы металла с созданием поперечного электрического поля Холла, которое препятствует дальнейшему сжатию электронной плазмы. Холловское поле, действуя на ионный остов кристаллической решетки металла с периодичностью подачи импульсов тока на фронте их нарастания, создает ультразвуковую вибрацию и активно влияет на кинетику пластической деформации с модификацией эксплуатационных характеристик материала [5–8].

Реализация электропластического волочения (ЭПВ) предоставила возможность изменять кинетику пластической деформации для улучшения эксплуатационных характеристик технически важных материалов, что создает новые решения для управления деформационными процессами в металлах с помощью высокоэнергетических воздействий при электропластической деформации металлов (ЭПДМ) за счет возникающих сил немеханической природы.

При производстве кабельно-проводниковой продукции для получения медной алюминиевой проволоки, к которой предъявляются высокие требования по электрическим и механическим свойствам, целесообразно применять электропластическое волочение. К преимуществам ЭПВ

можно отнести: возможность позонного воздействия на материал и интенсификацию технологического процесса с получением материалов с периодически измененными свойствами, экологическую чистоту метода и его энергоэкономичность, высокую скорость и эффективность воздействия, а также возможность комбинирования процесса волочения с джоулевым эффектом с достижением практически любых сопутствующих температур. ЭПВ предоставляет возможность упрощения производства алюминиевой проволоки путем замены стандартной технологии волочения на электропластическое с исключением из технологического процесса части операций отжига для улучшения физико-механических характеристик, на которые требуются большие временные и энергетические затраты. Энергетические затраты на электропластическое волочение невелики. Так, для проволоки диаметром 0,64 мм затрачиваемая мощность не превышает 1 кВт. Одним из недостатков технологии ЭПВ является, ограничение по скоростям деформации. Если учесть, что скорость дрейфа электронов определяется напряженностью электрического поля E , тогда средний импульс, действующий на остов кристаллической решетки по направлению дрейфа электронов и упруго взаимодействующих с узлами кристаллической решетки, определяется следующим образом:

$$I_e = m_e V_F = e E t_e,$$

где m_e – масса электрона, t_e – время свободного пробега между столкновениями, e – заряд электрона; $E = I/\lambda$ (I – плотность тока, λ – проводимость).

При этом следует учитывать скорость деформации материала, которая не должна превышать скорость дрейфа электронов V_F :

$$V_F \cong \frac{J}{en} \cong 0,5 - 1 \text{ м/с},$$

где n – концентрация электронов в единице объема металла.

Также к недостаткам относится невозможность применения ЭПВ при волочении и прокатке заготовок больших сечений из-за сложности создания в зоне деформации плотности тока 10^3 А/мм^2 , при которой реализуется электропластический эффект.

Алюминий и его сплавы являются одними из самых применяемых металлов в разных отраслях современной промышленности, например, авиационной, машиностроении, электротехнической и др. В связи с этим исследования технологии ЭПВ актуальны и представляют большой научный и практический интерес для улучшения эксплуатационных характеристик изделий из электротехнического алюминия, в частности для создания облегченных высокопроводящих кабелей с улучшенными механическими и электрическими свойствами, которые особенно востребованы в аэрокосмической и авиационной отраслях, а также проволоки из магнитотвердой стали, изделий из вспененного алюминия, нанотрубок из углерода.

Цель работы – исследовать физические и технологические условия создания высокоэнергетических воздействий при электропластическом волочении проволоки из электротехнического алюминия на стандартном многоходовом промышленном волочильном стане для получения изделий с комплексом высоких физико-механических и эксплуатационных характеристик.

Методика исследования. Алюминиевую катанку марки АКЛП-5ПТ с максимальным сечением 196 мм^2 ($d = 14 \text{ мм}$) подвергали ЭПВ на промышленном многоходовом волочильном стане СМВ-1-9М4 (рис. 1) в условиях стандартного технологического процесса.

В процессе электропластической деформации волочением осуществлялся подвод импульсного тока длительностью 10^{-4} с и плотностью $J_m = 10^3 \text{ А/мм}^2$ в узел зоны деформации алюминиевой проволоки для каждой волоки (максимальное количество волок – 9), установленной на волочильном стане согласно технологическому маршруту. Импульсы тока подавались генератором импульсного тока мощностью 70 кВт с частотой следования 600–800 Гц [9]. Электрическое сопротивление каждого технологического контактного узла ЭПВ при натянутой алюминиевой проволоке не превышало значения $R = 0,005 \text{ Ом}$.

Применялись следующие режимы волочения: обычное волочение без подвода тока; ЭПВ с импульсным током, пропускаемым через зону деформации, при полярности плюс источника тока до зоны деформации; то же с обратной полярностью минус источника тока до зоны деформации.

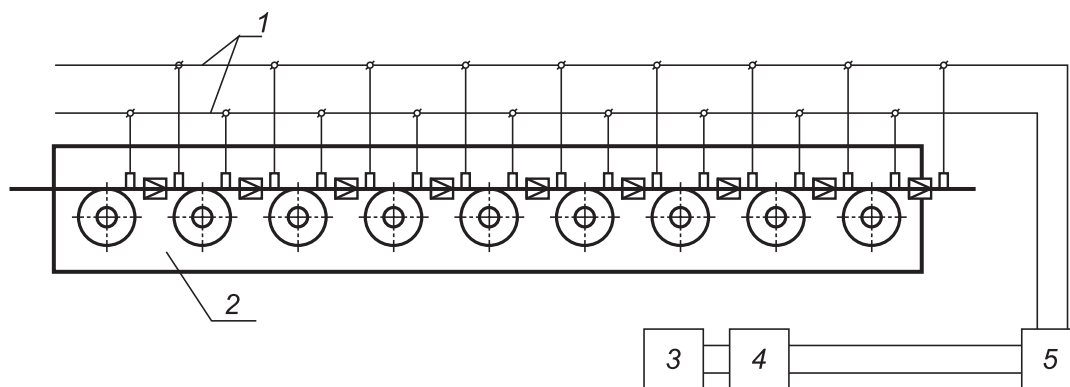


Рис. 1. Блок-схема волочильного стана: 1 – шины, 2 – волочильный стан СМВ-1-9МЧ, 3 – пульт управления волочильного стана, 4 – пульт управления генератора импульсного тока, 5 – генератор импульсного тока

Fig. 1. Block diagram of the drawing mill: 1 – tires, 2 – SMV-1-9MH drawing mill, 3 – drawing mill control panel, 4 – pulse current generator control panel, 5 – pulse current generator

Электрическое сопротивление метровых образцов проволок измерялось по мостовой компенсационной схеме на УПИП-60М (класс точности 0,1), а удельное электросопротивление рассчитывалось по усредненному диаметру проволоки для каждого технологического перехода с учетом степени обжатия, измеренного электронным микрометром (с точностью до 1 мкм).

Механические свойства – разрывное усилие и относительное удлинение – измерялись на разрывной машине РМУ-0,05 с точностью 1 % (относительное удлинение определялось на базе 200 мм).

В соответствии с ГОСТ 6132-63 «Проволока алюминиевая круглая электротехническая» (URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294768/4294768292.pdf>) исследовались служебные характеристики алюминиевой проволоки: временное сопротивление разрыву (G , кг/мм²), относительное удлинение (%), количество перегибов для каждого диаметра (n).

На рис. 2 показаны зависимости количества n от истинного сужения $L_i = d_0/d_n$ (d_0 – начальный диаметр проволоки, d_n – диаметр проволоки после технологического перехода на маршруте волочения при различных режимах пропускания импульсного тока).

Результаты исследования и их обсуждение. Нами установлено, что наложение импульсного тока на зону деформации во время ЭПВ алюминия приводит к увеличению количества перегибов в 3 раза при полярности тока плюс до деформационного узла (рис. 2).

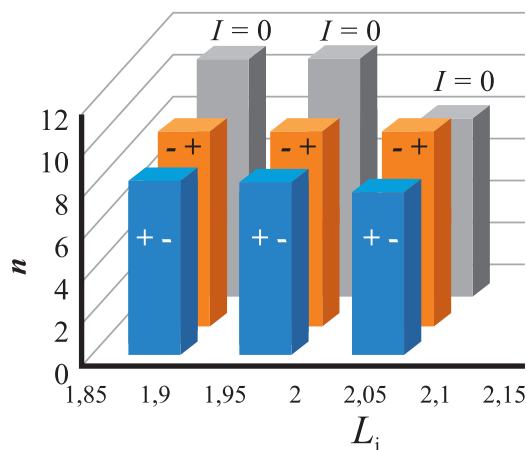


Рис. 2. Зависимость количества перегибов (n) от истинного сужения (L_i)

Fig. 2. Dependence of the number of kinks (n) on the true narrowing (L_i)

С увеличением количества технологических переходов на маршруте волочения глубина обработки материала током растет, происходит накопление электропластического действия тока с уменьшением диаметра проволоки и увеличением плотности тока. Данный эффект наиболее выражен при плюсовой полярности источника тока до зоны деформации.

Этот вывод подтверждает и зависимость временного сопротивления G от истинного сужения L_i . Из рис. 3 видно, что при электропластической деформации на последнем технологическом переходе временное сопротивление разрыву при плюсовой полярности тока до зоны деформации более чем в 2 раза меньше, чем без тока.

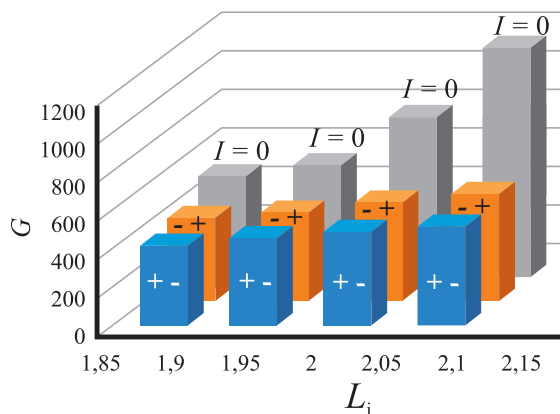


Рис. 3. Зависимость временного сопротивления (G) от истинного сужения (L_i)

Fig. 3. Dependence of temporary resistance (G) on true contraction (L_i)

Электропластическое волочение также влияет на важные эксплуатационные характеристики электротехнических проводящих кабелей – относительное удлинение Δl и удельное электрическое сопротивление алюминиевой проволоки ρ (рис. 4, 5).

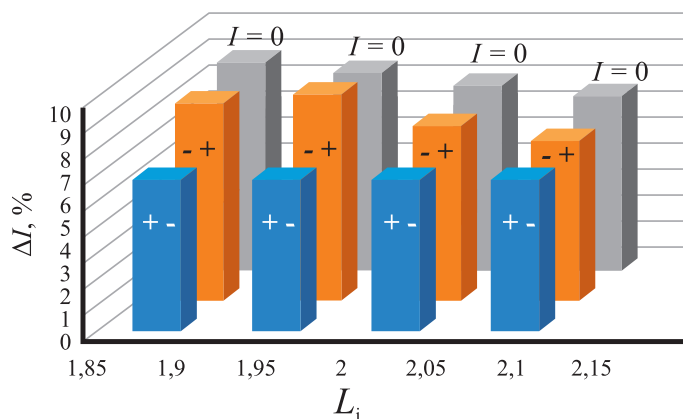


Рис. 4. Зависимость относительного удлинения (Δl) от истинного сужения (L_i)

Fig. 4. Dependence of relative elongation (Δl) on true contraction (L_i)

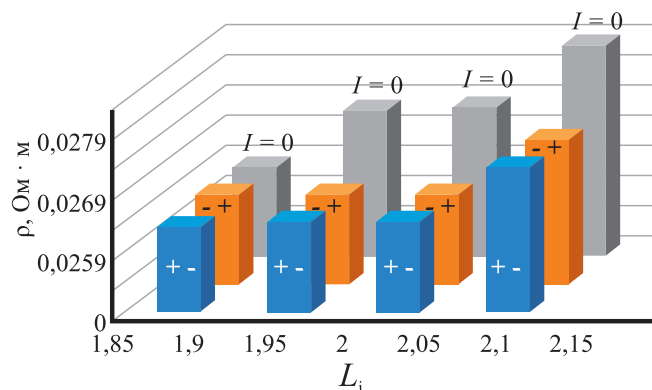


Рис. 5. Зависимость удельного сопротивления (ρ) от истинного сужения (L_i)

Fig. 5. Dependence of resistivity (ρ) on true contraction (L_i)

Полученные результаты электропластического волочения электротехнической алюминиевой проволоки выявили улучшение эксплуатационных характеристик изделий относительно ГОСТ 6132-63. Это предоставляет возможность интенсифицировать технологический процесс, уменьшить энергетические затраты, так как при ЭПВ увеличивается пластичность материала, уменьшается предел текучести, что снижает мощность на тяговом барабане волочильного стана и экономит энергоресурс.

Важным эффектом ЭПВ является снижение металлоемкости электротехнических кабелей и получение облегченных проводов с меньшим диаметром за счет улучшения характеристик удельного электросопротивления (см. рис. 5), что играет определяющую роль в аэрокосмической и авиационной промышленности.

Из полученных результатов можно заключить, что наложение импульсного тока большой плотности на зону деформации выше предела текучести при ЭПВ обуславливает создание пондеромоторных эффектов и осцилляций деформирующих усилий, что приводит в итоге к изменению кинетики деформации. В зоне деформационного узла происходит образование и размножение дефектов с уменьшением стартовых напряжений движения дислокаций и увеличением пластичности материала.

При ЭПВ носители тока, в зависимости от полярности, движутся в направлении деформации или в противоположную сторону. Если направление движения электронов совпадает с составляющей вектора деформации, то электрон-дислокационное взаимодействие стимулирует движение и размножение дефектов, увеличение амплитуды колебания дислокаций и срыв их со стопоров в направлении волочения с ростом пластичности [10–12].

В обратном направлении, от минуса к плюсу, в деформационной зоне электроны затормаживают движение дефектов или действуют только термически, что обуславливает перераспределение электронной плотности носителей и дислокаций леса [9, 12, 13].

Динамическое действие электрического импульса вызывает также процесс механического удара, который переходит в затухающие виброколебания после начала каждого из фронтов электрического импульса. Виброакустические отклики характеризуются противофазной формой для различных фронтов, а их максимальное действие совпадает с интервалом времени, соответствующим максимальному значению магнитного поля. Такие параметры, как ускорение, динамическая сила, действующая вдоль оси проводника, и величина магнитной индукции у его поверхности позволяют провести анализ происходящих физических процессов на основе результатов эксперимента (рис. 6). Магнитная индукция вокруг проводника сравнительно медленно увеличивается, начиная от момента начала электрического импульса (t_0) и спадает после его окончания в момент t_1 . В моменты t_0 и t_1 формируются ударные механические перегрузки с максимальной амплитудой, знак которых определяется полярностью ступенчатого изменения электрического напряжения на фронте электрического импульса, который вызывает распространение в материале проводника, а также затухающие виброакустические колебания. Действие электрического импульса на каждом из фронтов обуславливает формирование импульса силы в продольном направлении, знак которого также определяется знаком ступенчатого изменения напряжения на каждом из фронтов.

Такая модель физического механизма ЭПЭ позволяет сделать выбор параметров электрического воздействия и регулировать как процесс преобразования электроимпульсного воздействия в механический ударно-волновой процесс, так и его характеристики, например, за счет суперпозиции колебаний, создаваемых при действии переднего и заднего фронтов электрического импульса.

Для определения микроструктуры образцов проводилось сканирование поверхности материала на электронном микроскопе Hitachi Table Microscope TM 000 сфокусированным высокоэнергетическим тонким электронным лучом с возбуждением исследуемой области, который генерирует, увеличивает и отображает физическую информацию (рис. 7).

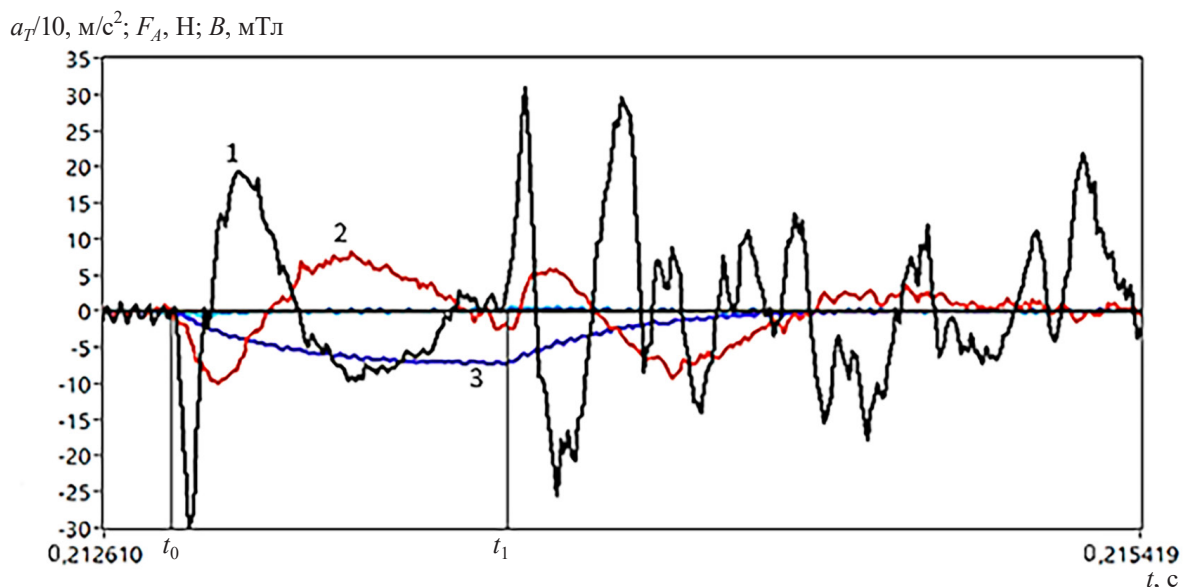


Рис. 6. Динамика ускорения в поперечном направлении (a_T , кривая 1), осевой динамической силы (F_A , кривая 2) и кольцевой компоненты магнитной индукции у поверхности (B , кривая 3) для проводника из меди диаметром 3 мм и длиной 160 мм в разные моменты электрического импульса (от t_0 до t_1)

Fig. 6. Dynamics of acceleration in the transverse direction (a_T , curve 1), axial dynamic force (F_A , curve 2) and annular magnetic induction components at the surface (B , curve 3) for a copper conductor with a diameter of 3 mm and a length of 160 mm. Electric pulse duration is from t_0 to t_1

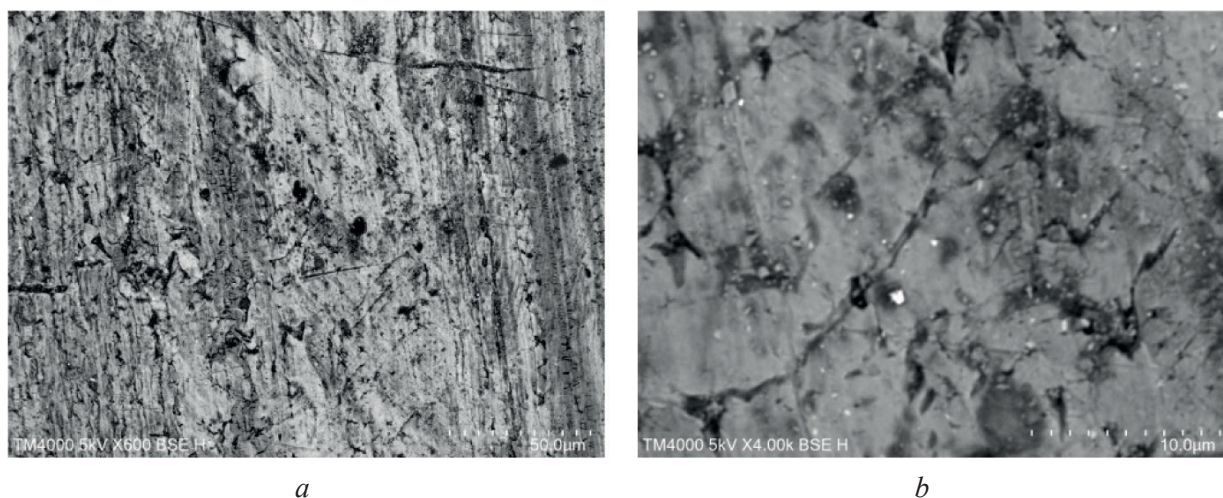


Рис. 7. Электропластическое волочение, на технологическом переходе 2,98–2,64 мм, скорость $V = 0,5$ м/с:
 a – без тока; b – с током полярностью плюс минус, $J_m = 10^3$ А/мм² и длительностью $\sim 10^{-4}$ с

Fig. 7. Electroplastic drawing with polarity, at a technological transition of 2.98–2.64 mm, $V = 0.5$ m/s: a – without current; b – with current polarity plus minus, $J_m = 10^3$ A/mm² and duration $\sim 10^{-4}$ s

Во время процесса ЭПВ при прохождении импульсного тока через деформационный узел происходит выделение мгновенной мощности в зоне деформации металла, которая достигает значений 10^3 – 10^4 кВт/см³. Это стимулирует структурно-фазовые превращения, изменяет микроструктуру материала на мелкозернистую с зонами рекристаллизации и субзернами, что приводит к циклическому упрочнению и интенсифицирует технологический процесс, усиливает эффекты «размытия» субграниц и дислокационной плотности, уменьшает энергопотребление и металлоемкость изделия, снижает усилия деформации и приводит к технологически важным результатам [11].

Для определения зернистости образцов при электропластическом волочении выполнен расчет предела текучести для изменений среднего размера зерна в условиях ЭПВ при наличии набора препятствий для движения дислокаций в соответствии соотношением Холла–Петча:

$$\sigma_T = \sigma_0 + kd_{cp}^{-1/2},$$

где d_{cp} – средний размер зерна; σ_0 – сопротивление движению дислокаций в материале; k – коэффициент Холла–Петча. Для алюминия: $\sigma_0 = 10$ МПа, $k = 0,06$ МПа · м^{1/2}.

Из полученных данных следует, что электропластическая деформация волочением уменьшает средний размер зерен (таблица), структура становится мелкозернистой и равновесной, что улучшает механические свойства алюминиевой проволоки. При ЭПВ процессе происходит дробление зерен, увеличиваются зеренные границы, что приводит к росту пластичности и уменьшению предела текучести. При деформации плюс источника тока до деформационной зоны реализуется более интенсивное измельчение микроструктуры и электропластичность проходит при значительных микроискажениях.

Расчет номера зерна
Calculation of the grain number

Номер образца	m_1	m_2	m	m_{cp}	$S_{cp}, \text{мм}^2 \cdot 10^{-5}$	$d_{cp}, \text{мм}$	Номер зерна	$\sigma_T, \text{МПа}$
1 (без тока)	54	31	69,5	31 275	3,197	0,00 565	4	10,798
2 (с током)	107	47	130,5	58 725	1,703	0,004 127	5	10,936

Примечание: d_{cp} – средний диаметр зерна; m_1 – количество целых зерен; m_2 – количество зерен, перерезанных окружностью; m_{cp} – среднее количество зерен на площади шлифа S_{cp} ; m – общее количество зерен ($m = m_1 + 0,5m_2$).

Note: d_{cp} – the average diameter of the grain; m_1 – the number of whole grains; m_2 – the number of grains cut by a circle; m_{cp} – the average number of grains on the area of the S_{cp} slot; m – the total number of grains ($m = m_1 + 0,5m_2$).

Полученные экспериментальные и теоретические результаты металлографического анализа микроструктуры алюминия и проведенные расчеты по формуле Холла–Петча показали существенное влияние ЭПВ на микрозернистую структуру образцов и модификацию свойств материала.

Следует учесть фактор временно заторможенных скоплений дислокаций с возможным усилением их взаимодействий со стопорами, в качестве которых могут выступать парамагнитные примеси, а также дефекты решетки в виде дислокации леса. В алюминии существуют электронно-структурные объекты элементарных возбуждений на линиях дислокаций, парамагнитные центры.

Микротвердость образцов исследовалась на цифровом микротвердомере Micro Met 5114 с сенсорным LCD пультом управления с помощью программного обеспечения Altami Studio 3.4 и с автоматическим расчетом значений твердости с накоплением статистики при помощи алмазной пирамидки (Виккерс) с вариацией приложения нагрузки 15 с. Нагрузка на индентор составляла $P = 1000$ г, угол алмазной пирамидки был равен $\theta = 136^\circ$. Индентирование проводилось перпендикулярно плоскости шлифа в ортогональном направлении вектора деформации. После снятия нагрузки измерялась диагональ отпечатка (d). Число твердости по Виккерсу (HV) вычислялось как отношение нагрузки (P) к площади поверхности пирамидального отпечатка (S):

$$HV = k \frac{P}{S} = 0,102 \frac{2P \frac{\sin \theta}{2}}{d^2} = 0,1891 \frac{P}{d^2}.$$

В ходе измерения диагонали в зависимости от P получили глубину отпечатка для исследуемых образцов. Эти данные позволили получить графические изображения некоторых кинематических характеристик при анализе зависимости значения микротвердости HV от нагрузки с вариациями продолжительности деформации (t) с током (рис. 8, а) и без тока (рис. 8, б).

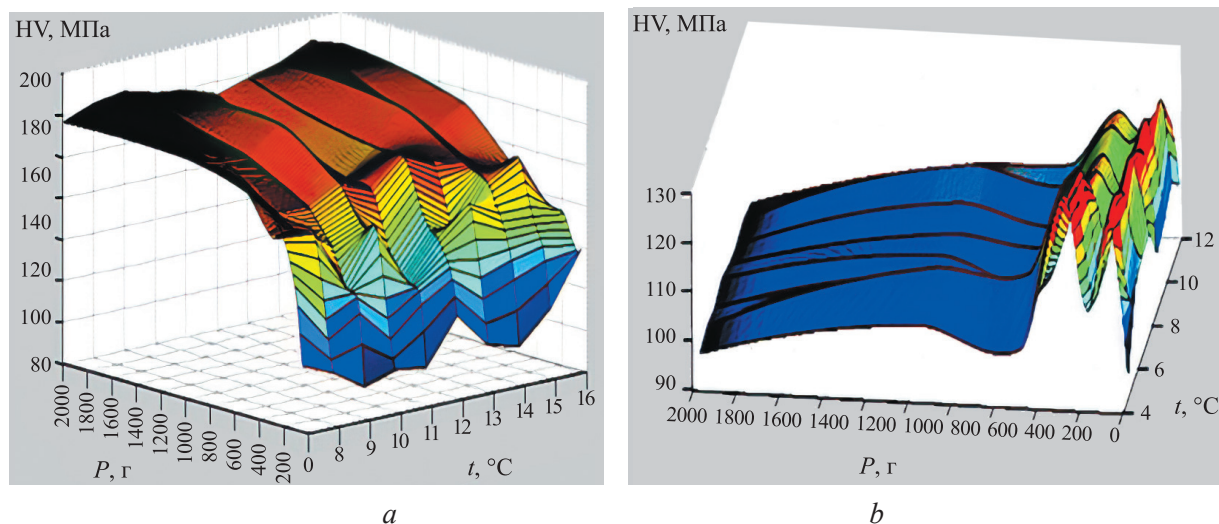


Рис. 8. Зависимость микротвердости HV от нагрузки (P) с вариациями продолжительности деформации:
 a – с током; b – без тока

Fig. 8. Dependence of microhardness HV on load P with variations in deformation duration:
 a – with current; b – without current

Из графиков видно, что при электропластическом волочении микротвердость уменьшается, увеличивается электропластичность без значительного изменения прочности и улучшаются служебные характеристики изделия.

Заключение. Возбуждение электронной подсистемы металла при реализации электропластичности в алюминиевом образце, нагруженном выше предела текучести, обуславливает возникновение деформационных процессов за счет осцилляций деформирующих усилий. Электропластическое волочение способствует увеличению амплитуды колебаний дислокаций с периодическим изменением позиции дислокационных петель, что стимулирует отрыв дислокаций от стопоров, а также приводит к возникновению пондеромоторных эффектов, обуславливающих виброакустические колебания и дополнительные механические напряжения кристаллической решетки в различных направлениях.

Электропластическая деформация волочением электротехнического алюминия с импульсами тока высокой плотности 10^3 А/мм² и длительностью 10^{-4} с в зоне деформирования выше предела текучести изменяет микроструктуру материала на мелкозернистую с зонами рекристаллизации и субзернами, что приводит к циклическому упрочнению. Под влиянием импульсов тока наиболее неравновесные группы дислокаций положительного знака открепляются от препятствий безактивационным путем. Группы же дислокаций отрицательного знака открепляются от стопоров только термофлуктуационным путем и трансформируют микроструктуру материала.

В ходе исследования установлено, что ЭПВ улучшает физико-механические и эксплуатационные характеристики материала по сравнению с нормативными (см. ГОСТ 6132-63). Увеличиваются относительное удлинение, количество перегибов, незначительно падает временное сопротивление. Важным технологическим фактором электропластического волочения является снижение удельного электрического сопротивления, что предоставляет возможность уменьшить сечения провода без изменения электротехнических параметров в соответствии с ГОСТ и снизить металлоемкость алюминиевого кабеля. ЭПВ также позволяет исключить из технологического процесса энергозатратный отжиг, который применяется для улучшения электротехнических и механических характеристик, что упрощает технологию изготовления алюминиевой проволоки с улучшенными служебными характеристиками путем замены обычного волочения электропластическим. Предложенная технология ЭПВ по сравнению с обычной уменьшает металлоемкость изделия, снижает усилия деформации, это позволяет не только снизить энергетические затраты, но и повысить ресурс стана, в том числе износостойкость деформационных деталей волок.

Полученные результаты можно применить при волочении, для получения электротехнических кабелей с улучшенными эксплуатационными характеристиками, прокатке тонкого листа, ленты, ультразвуковой ковке, вытяжке, штамповке и других технологических процессах обработки металлов давлением.

Список использованных источников

1. Троицкий, О. А. Электромеханический эффект в металлах / О. А. Троицкий // Письма в ЖЭТФ. – 1969. – Т. 10, № 1. – С. 18–22.
2. Okazaki, K. The electroplastic effect in titanium [Electronic resource] / K. Okazaki, M. Kagawa, H. Conrad. – Mode of access: https://cdn.ymaws.com/titanium.org/resource/resmgr/ZZ-WTCP1980-VOL1/1980_Vol.1-6-The_Electroplas.pdf
3. Molotskii, M. Dislocation paths in a magnetic field / M. Molotskii, V. Fleurov // J. Phys. Chem. B. – 2000. – Vol. 104, № 16. – P. 3812–3816. <https://doi.org/10.1021/jp993259g>
4. Sprecher, A. F. Overview no. 49: On the mechanisms for the electroplastic effect in metals / A. F. Sprecher, S. L. Mannan, H. Conrad // Acta Met. – 1986. – Vol. 34, № 7. – P. 1145–1162. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(86\)90001-5](https://doi.org/10.1016/0001-6160(86)90001-5)
5. Molotskii, M. Plasticity of ferromagnets near the Curie point / M. Molotskii, V. Fleurov // Philos. Mag. A. – 2003. – Vol. 83, № 12. – P. 1421–1430. <https://doi.org/10.1080/01478643031000078495>
6. Троицкий, О. А. Фундаментальные и прикладные исследования электропластической деформации металлов / О. А. Троицкий, В. С. Савенко. – Минск: ИВЦ Минфина, 2013. – 375 с.
7. Molotskii, M. Magnetic effects in electroplasticity of metals / M. Molotskii, V. Fleurov // Phys. Rev. B. – 1991. – Vol. 52, № 22. – P. 311–317. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.52.15829>
8. Savenko, V. S. Electroplastic effect under the simultaneous superposition and magnetic fields / V. S. Savenko // J. Appl. Phys. – 1999. – Vol. 86, № 5. – P. 2479–2482. <https://doi.org/10.1063/1.371080>
9. Влияние высокоэнергетических воздействий на модификацию физико-механических характеристик стали / В. С. Савенко [и др.] // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2020. – № 3. – С. 65–75. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-3-65-75>
10. Савенко, В. С. Вклад пондеромоторных факторов в реализацию электропластической деформации / В. С. Савенко, О. А. Троицкий, А. Г. Силивонец // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 1. – С. 85–91.
11. Savenko, V. S. Electroplastic deformation by twinning metals / V. S. Savenko // Acta Mechanica et Automatic. – 2018. – Vol. 12, № 4. – P. 6–12. <https://doi.org/10.2478/ama-2018-0039>
12. Батаронов, И. Л. О влиянии электрического тока и магнитного поля на взаимодействие дислокаций с точечными дефектами в металлах / И. Л. Батаронов, А. М. Рошупкин // Физика твердого тела. – 1988. – Т. 30, № 11. – С. 3311–3318.
13. Воздействия импульсами тока и СВЧ-изучением на конструкционные материалы. Электродинамические и электрохимические эффекты в проводниках / О. А. Троицкий [и др.]. – М.: Ким Л. А., 2019. – 278 с.

References

1. Troitskii O. A. Electromechanical effect in metals. *Pis'ma v Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki = JETP Letters*, 1969, vol. 10, pp.18–22 (in Russian).
2. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. *The electroplastic effect in titanium*. Available at: https://cdn.ymaws.com/titanium.org/resource/resmgr/ZZ-WTCP1980-VOL1/1980_Vol.1-6-The_Electroplas.pdf
3. Molotskii M., Fleurov V. Dislocation paths in a magnetic field. *Journal of Physical Chemistry B*, 2000, vol. 104, no. 16, pp. 3812–3816. <https://doi.org/10.1021/jp993259g>
4. Sprecher A. F., Mannan S. L., Conrad H. Overview no. 49: On the mechanisms for the electroplastic effect in metals. *Acta Metallurgica*, 1986, vol. 34, no. 7, pp. 1145–1162. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(86\)90001-5](https://doi.org/10.1016/0001-6160(86)90001-5)
5. Molotskii M., Fleurov V. Plasticity of ferromagnets near the Curie point. *Philosophical Magazine A*, 2003, vol. 83, no. 12, pp. 1421–1430. <https://doi.org/10.1080/01478643031000078495>
6. Troitskii O. A., Savenko V. S. *Fundamental and Applied Studies of Electroplastic Deformation of Metals*. Minsk, Information and Computing Center of the Ministry of Finance, 2013. 375 p. (in Russian).
7. Molotskii M., Fleurov V. Magnetic effects in electroplasticity of metals. *Physical Review B*, 1991, vol. 52, no. 22, pp. 311–317. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.52.15829>
8. Savenko V. S. Electroplastic effect under the simultaneous superposition and magnetic fields. *Journal of Applied Physics*, 1999, vol. 86, no. 5, pp. 2479–2482. <https://doi.org/10.1063/1.371080>
9. Savenko V. S., Troitskiy O. A., Hrushchov M. M., Stashenko V. I., Zernitsa D. A. Effects of high energy on steel structure in deformation. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Fizika = Journal of the Belarusian State University. Physics*, 2020, no. 3, pp. 65–75 (in Russian). <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-3-65-75>
10. Savenko V. S., Troickij O. A., Silivonec A. G. The contribution of ponderomotive factors in implementation of electroplasticity deformation. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 1, pp. 85–91 (in Russian).

11. Savenko V. S. Electroplastic deformation by twinning metals. *Acta Mechanica et Automatic*, 2018, vol. 12, no. 4, pp. 6–12. <https://doi.org/10.2478/ama-2018-0039>
12. Bataronov I. L., Roshchupkin A. M. On the influence of electric current and magnetic field on the interaction of dislocations with point defects in metals. *Solid State Physics*, 1988, vol. 30, no. 11, pp. 3311–3318.
13. Troitskii O. A., Stashenko V. I., Savenko V. S. *Impact of Current Pulses and Microwave Studies on Structural Materials. Electrodynamical and Electrochemical Effects in Conductors*. Moscow, Kim L. A. Publ., 2019. 278 p. (in Russian).

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН
POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-297-306>
УДК 536.24



Оригинальная статья

В. Л. Жданов*, Е. А. Пустоход, А. Д. Чорный

*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси,
ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь*

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ВОЗДУШНОМ КАНАЛЕ
ПРОДОЛЬНЫМИ ВИХРЯМИ**

Аннотация. Представлены результаты численного моделирования интенсификации теплообмена в канале прямоугольного сечения ($0,005 \times 0,031$) м длиной 0,175 м. Нижняя поверхность канала равномерно нагревается до 343 К, а ее охлаждение осуществляется воздушным потоком при двух значениях расхода $Q = 0,0010044$ и $0,00209$ м³/с и температуре 293 К. Интенсификация теплообмена совершается вихревыми генераторами (ВГ), расположенными на нагреваемой и противоположной ей поверхностях канала. Вихревые генераторы состоят из двух прямоугольных пластин (высота пластин $h = 0,002$ м, длина $l = 0,015$ м), установленных по нормали к поверхности и под углом атаки $\alpha = 15^\circ$ к потоку. Нижние ВГ генерируют пары продольных вихрей, которые формируют за пластинами общие потоки, направленные к нагретой стенке, а верхние пары вихрей генерируют общие потоки, направленные от стенки к центру канала. Взаимодействие продольных вихрей и создаваемых ими вторичных потоков с основным потоком усиливает смешение внутри канала и теплообмен с поверхностями. Исследование выполнено методом RANS в интервале чисел Рейнольдса 1200–2600, рассчитанных по высоте вихревого генератора и скорости потока на входе в канал. Показано, что тепловая мощность канала с вихревыми генераторами на нижней поверхности увеличивается по сравнению с аналогичной в канале с гладкими стенками на 17–23 % соответственно указанным расходам. При расположении ВГ на нижней и верхней поверхностях тепловая мощность возрастает на 27–32 %. Метод может найти практическое применение при разработке конструкций теплообменников для охлаждения малоразмерных источников тепловыделения или для обеспечения теплообмена в труднодоступных областях.

Ключевые слова: воздушный канал, вихревые генераторы, тепловой поток, продольные вихри

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Жданов Валерий Львович* – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0001-6674-203X>. E-mail: valery.zhdanov@hmti.ac.by; *Пустоход Егор Александрович* – младший научный сотрудник Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси. E-mail: pustokhod@hmti.ac.by; *Чорный Андрей Дмитриевич* – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0003-4716-6123>. E-mail: anchor@hmti.ac.by

Вклад авторов: *Жданов Валерий Львович* – формулирование идеи, исследовательских целей и задач, написание текста статьи, анализ результатов; *Пустоход Егор Александрович* – проведение численных исследований, подготовка графического материала; *Чорный Андрей Дмитриевич* – разработка методологии исследования, анализ литературных источников.

Для цитирования: Жданов, В. Л. Интенсификация теплообмена в воздушном канале продольными вихрями / В. Л. Жданов, Е. А. Пустоход, А. Д. Чорный // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 4. – С. 297–306. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-297-306>

Поступила в редакцию: 22.08.2024

Доработанный вариант: 10.09.2024

Утверждена к публикации: 16.12.2024

Подписана в печать: 23.12.2024

© Жданов В. Л., Пустоход Е. А., Чорный А. Д., 2024

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Original article

Valery L. Zhdanov*, Egor A. Pustohod, Andrei D. Chorny

*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus,
15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus***HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN AIR CHANNEL BY LONGITUDINAL VORTEXES**

Abstract Numerical investigation of heat transfer is carried out in an air channel of the rectangular cross section (0.005×0.031) m with the length of 0.175 m. The lower surface of the channel is uniformly heated up to 343 K, and the air flow temperature at the channel entrance is 293 K. Two flow rates $Q = 0.0010044$ and 0.00209 m³/s are considered. The heat transfer between the channel surfaces and the cooling air flow enhances by vortex generators (VG) placed at a heated and an opposite surfaces. These generators are formed by two rectangular plates arranged vertically on the surface and at an angle of attack $\alpha = 15^\circ$ to the flow. The plate height is $h = 0.002$ m and its length is 0.015 m. The VGs at the heated surface creates a pair of longitudinal vortexes that generates behind the plates a common flow to the surface while a pair of longitudinal vortexes at the upper surface creates the common flow away from it. Interaction of longitudinal vortices and secondary flows created by them with the main flow enhances mixing inside the channel and heat exchange with surfaces. Investigation was carried out by the RANS method at $Re = 1300$ – 2600 based on the VG height and the flow velocity at the channel entrance. It is shown that the thermal power of the channel with VG at the lower surface increases relative to that in the smooth walls channel by 17–23 % for the considered flow rates. If VG are placed at the both surfaces, the channel thermal power increases by 27–32 % depending on the flow rate.

Keywords: air channel, vortex generators, heat flow, longitudinal vortices

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: *Valery L. Zhdanov* – Dr. Sci. (Engineering), Leading Researcher at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus. <https://orcid.org/0000-0001-6674-203X>. E-mail: valery.zhdanov@hmti.ac.by; *Egor A. Pustohod* – Junior Researcher at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus. E-mail: pustokhod@hmti.ac.by; *Andrei D. Chorny* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus. <https://orcid.org/0000-0003-4716-6123>. E-mail: anchor@hmti.ac.by.

Contribution of the authors: *Valery L. Zhdanov* – formulation of ideas, research goals and objectives, writing the text of the article, analyzing the results; *Egor A. Pustohod* – numerical calculations, preparing graphic material; *Andrei D. Chorny* – development of research methodology, analysis of literary sources.

For citation: Zhdanov V. L., Pustokhod E. A., Chorny A. D. Heat transfer enhancement in air channel by longitudinal vortexes. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Science of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 4, pp. 297–306 (in Russian). doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-297-306

Received: 22.08.2024

Modified: 10.09.2024

Approved for publication: 16.12.2024

Signed to the press: 23.12.2024

Введение. В связи с интенсивным развитием мощностей компьютеров и обслуживающего сетевого оборудования увеличивается генерация тепла на критических элементах архитектуры указанной техники, что снижает надежность ее функционирования. Поэтому возникает необходимость отвода избыточной тепловой энергии. Данная задача должна решаться с помощью устройств ограниченных физических размеров. Это условие определило внимание к методам интенсификации теплообмена маломасштабными возмущениями, в том числе с помощью генерации продольных вихрей.

Интерес к продольным вихревым структурам проявился в XX в. по мере раскрытия их преимуществ перед поперечными вихрями [1–3]. Прежде всего, они имеют существенно меньшее сопротивление, поскольку их оси совпадают с направлением основного потока, в котором они возникают. Продольные вихри генерируют нормальные и поперечные скорости, что, усиливая трехмерность потока, обеспечивает интенсификацию смешения.

Были исследованы как одиночные, так и парные продольные вихри [2–4]. Продольные вихри разрушают гидродинамический и тепловой пограничный слой, усиливая отвод или подвод тепла к поверхности, и увеличивают теплообмен в канале на 10–77 % в зависимости от режима течения [4]. Генерация продольных вихрей, как правило, осуществлялась с помощью тонких пластин, установленных по нормали к поверхности под углом атаки к потоку. Пара таких пластин, которая при взаимном расположении формирует конфузурный канал, генерирует пару продоль-

ных вихрей, создающих общий поток, направленный от поверхности. Трение на поверхности под этим потоком снижается. При формировании пластинами диффузорного канала пара продольных вихрей генерирует общий поток, направленный к поверхности. Этот поток уменьшает толщину пристеночного слоя и приводит к росту напряжений сдвига на поверхности. Поэтому вихревые генераторы (ВГ), формирующие диффузорный канал, применяются для интенсификации теплообмена с поверхностью [5–7]. Так, теплообмен в воздушном канале с одним рядом ВГ при ламинарном режиме течения увеличивается с 16,5 по 44,0 %, а перепад давления возрастает только на 12 % [8]. При этом режиме течения в канале пара продольных вихрей увеличивает теплообмен на 33 % по сравнению с воздействием одиночного вихря [9]. Применение одновременно в канале двух и более пар ВГ увеличивает интенсификацию теплообмена, но возникает большая неопределенность в прогнозировании конечных результатов, поскольку взаимное расположение ВГ оказывает существенное влияние на смешение. Такие исследования крайне ограничены.

В данной работе исследуется интенсификация теплообмена в узком канале с подводом тепла при установке на его внутренней поверхности вихревых генераторов диффузорного и конфузорного типа.

Объект и метод исследования. Объектом исследования являлся воздушный канал прямоугольного сечения шириной 0,031 м, высотой 0,005 м и длиной 0,175 м. К его нижней поверхности подводился тепловой поток так, что ее температура возрастала до 343 К. Охлаждение осуществлялось воздушным потоком с температурой входа 293 К. Интенсификация теплообмена обеспечивалась вихревыми генераторами двух типов. Создающие общий поток к стенке пары генераторов располагались на нижней поверхности в четыре ряда (рис. 1, *b*). На верхней поверхности пары ВГ создавали общий поток от стенки к центру канала и размещались в три ряда (рис. 1, *c*).

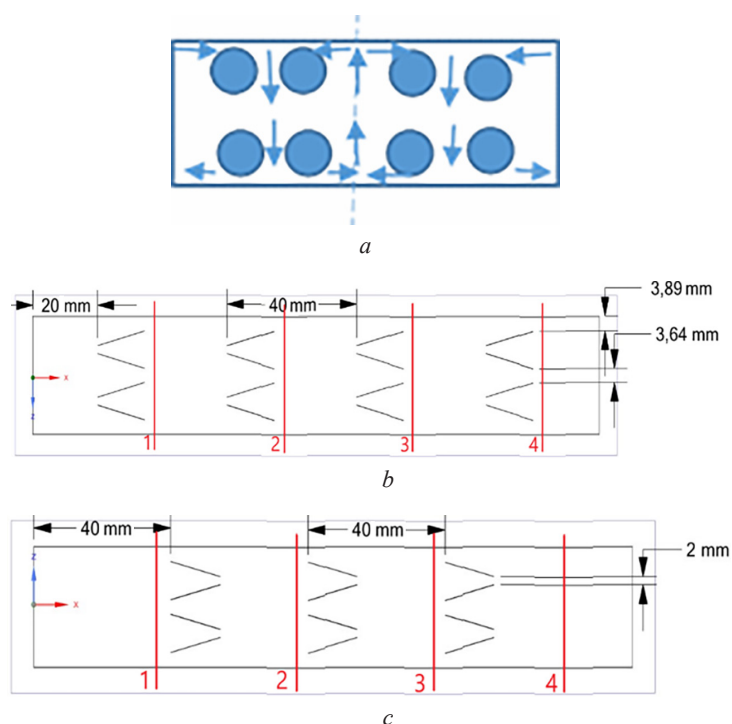


Рис. 1. Схема генерации вихревых пар в канале (*a*); расположение вихревых генераторов на нижней (*b*) и верхней (*c*) поверхностях канала

Fig. 1. Diagram of vortex pair generation in the channel (*a*); arrangement of vortex generators on lower (*b*) and upper (*c*) surfaces of the channel

Вихревой генератор был образован двумя тонкими пластинами с соотношением высоты ($h = 0,002$ м) к длине ($l = 0,015$ м), равным $h/l = 0,133$, установленными под углом атаки к потоку $\alpha = \pm 15^\circ$. Расстояние между передними кромками ВГ на нижней поверхности и задними кромками ВГ на верхней поверхности равнялось высоте пластины. Расстояние между кромками смежных ВГ составило $1,82h$.

Моделирование проводилось средствами верифицированного программного продукта Ansys Fluent¹. В качестве метода численного моделирования используется модель RANS, предполагающая совместное решение осредненных по Рейнольдсу уравнений переноса импульса и уравнения неразрывности [10]. Для замыкания осредненных по Рейнольдсу уравнений и описания турбулентности применялась стандартная SST (Shear-Stress Transport) $k-\omega$ модель турбулентности, учитывающая как процессы, происходящие непосредственно в пограничных слоях около стенок, так и особенности развития свободных течений.

Для построения расчетной области использовалась флагманская мозаичная технология Fluent Mosaic сеточного генератора Ansys Fluent Meshing, сочетающая в себе poly- и hex-элементы. Минимальный размер поверхностного элемента составляет $2,5 \cdot 10^{-4}$ м, коэффициент роста ячейки соответствует рекомендованному для данной модели турбулентности значению в 1,2 пункта. Итоговое количество конечно-объемных ячеек модели составило порядка 0,6 млн единиц.

На входе в расчетную область задавались постоянный расход и интенсивность турбулентности $Tu = 1\%$, на ее выходе – статическое давление (давление окружающей среды). На стенках канала и поверхностях генераторов ставились условия прилипания (равенство нулю скоростей). На нижней стенке канала поддерживалась равномерно распределенная постоянная температура. Температура вихревых генераторов принимала температуру стенки, на которой они установлены, и изменялась с изменением температуры воздушной среды в канале.

Результаты и их обсуждение. Расчеты выполнены при двух значениях расхода воздушного потока $Q = 0,0010044$ и $0,00209$ м³/с для канала с гладкими стенками и для канала с вихревыми генераторами соответственно. Рассмотрены два варианта расположения вихревых генераторов:

- 1) только на нижней нагреваемой поверхности;
- 2) на нижней и на верхней поверхностях.

Числа Рейнольдса, рассчитанные по средней скорости потока в канале и высоте ВГ, для этих расходов соответствовали значениям $Re_h = 1300$ и 2600 . Расчет поля скорости в канале с гладкими стенками показал, что форм-фактор потока на входе равен $H = 2,17$, а на выходе $H = 1,98$ при $Q = 0,0010044$ м³/с. При расходе $Q = 0,00209$ м³/с форм-фактор потока на входе в канал $H = 1,98$ снижался до значения $H = 1,80$ на выходе из него. Таким образом, у стенок канала имел место переходный режим течения от ламинарного к турбулентному.

Мониторинг полей температур в поперечном сечении канала осуществлялся по четырем сечениям на расстоянии от входа в канал: 0,0395 м (сечение 1), 0,0795 м (сечение 2), 0,1195 м (сечение 3) и 0,1595 м (сечение 4) (см. рис. 1, *b*, *c*). Продольные вихри усиливали перемешивание в канале. Каждая пара вихрей на нижней стенке канала создавала общий поток к ней. Этот поток нагревался на поверхности и поступал к боковым стенкам и к центру канала. Крайние пластины смежных ВГ в центре канала формировали восходящий нагретый поток (см. рис. 1, *a*).

Визуализация распределения температур представлена в сечениях 1–4 для двух расходов воздушного потока при расположении ВГ на нижней поверхности (рис. 2). Продольные вихри при своем формировании захватывали и удерживали воздушную массу при температуре ее входа в канал. Эта температура сохранялась до следующего ряда ВГ, где структуры, по-видимому, частично разрушались, а вновь формирующиеся вихри имели уже более высокую температуру (см. рис. 2, *b*). При увеличении расхода воздушного потока выравнивание температуры вихрей с окружающей средой ускорялось.

Каждая пара вихрей на нижней стенке индуцировала возникновение зеркально отраженных вихрей, которые располагались ближе к верхней стенке. Их взаимодействие создавало нисходящие потоки. Следует также принять во внимание, что продольные вихри, развиваясь у стенок канала, индуцировали противоположную завихренность в этой области. Таким образом, в канале возникали вихревые зоны, интенсифицирующие смешение потока. Температура воздушной среды, вовлекаемая в эти локальные зоны смешения, возрастала за каждым рядом ВГ. За третьим рядом ВГ разница температур между продольными вихрями и средой заметно снижалась, а за

¹ ANSYS Fluid Dynamics Verification Manual Release 14.0 ANSYS, Inc. August 2011 Southpointe 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317 ANSYS, Inc. Is certified to ISO 9001:2008. URL: <http://www.ansys.com> (date of access: 20.02.2022).

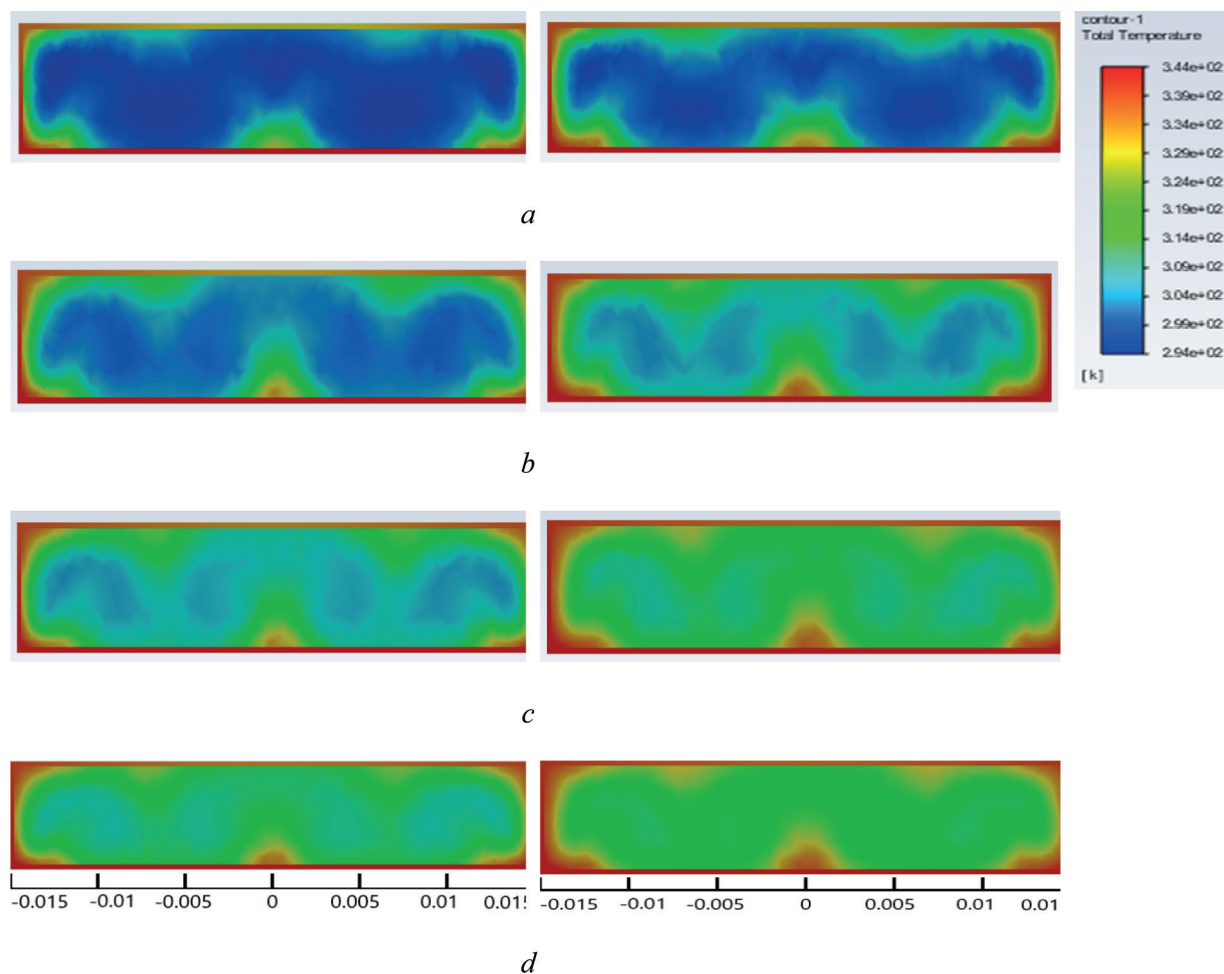


Рис. 2. Поле температур в канале с вихревыми генераторами на нижней поверхности: *a* – сечение 1; *b* – сечение 2; *c* – сечение 3; *d* – сечение 4. Левые изображения – $Q = 0,0010044 \text{ м}^3/\text{с}$; правые изображения – $Q = 0,00209 \text{ м}^3/\text{с}$

Fig. 2. Temperature field in the channel with lower vortex generators: *a* – section 1; *b* – section 2; *c* – section 3; *d* – section 4. Left builders – $Q = 0.0010044 \text{ m}^3/\text{s}$; right builders – $Q = 0.00209 \text{ m}^3/\text{s}$

четвертым рядом температура в поперечном сечении канала становилась вполне однородной (см. рис. 2, *c, d*).

Количественные изменения температуры в канале у нижней поверхности, в его центре и у верхней поверхности представлены для двух расходов на рис. 3.

Вихревые генераторы направляли часть воздушного потока к нагретой стенке, и в области контакта температура была минимальной. Прогретая среда перетекала к боковым стенкам и в центр канала, где формировался нагретый поток от стенки между смежными вихревыми генераторами (см. рис. 3, *a*). За последующими рядами ВГ температура воздушного потока возрастала у поверхности и становилась более однородной, а локальный максимум в центре канала снижался.

В середине канала изменения температуры отражали взаимодействие вихревых структур меньшего масштаба (см. рис. 3, *b*). За первым рядом ВГ в центре канала формировался двугорбый профиль температуры в результате взаимодействия восходящего потока от нагретой стенки и нисходящего более холодного потока. Холодный поток создавался индуцированными вихрями, возникающими у верхней поверхности (см. рис. 2, *a*). За каждым последующим сечением на этой координате максимум температуры увеличивался, отражая усиление прогрева потока как у нижней, так и у верхней стенок. Локальные максимумы температур проявлялись на оси каждой пары ВГ расположенных на нижней стенке. Они вызваны потоками прогретой среды от верхней стенки, генерируемые виртуальными парами вихрей (см. рис. 2, *b–d*).

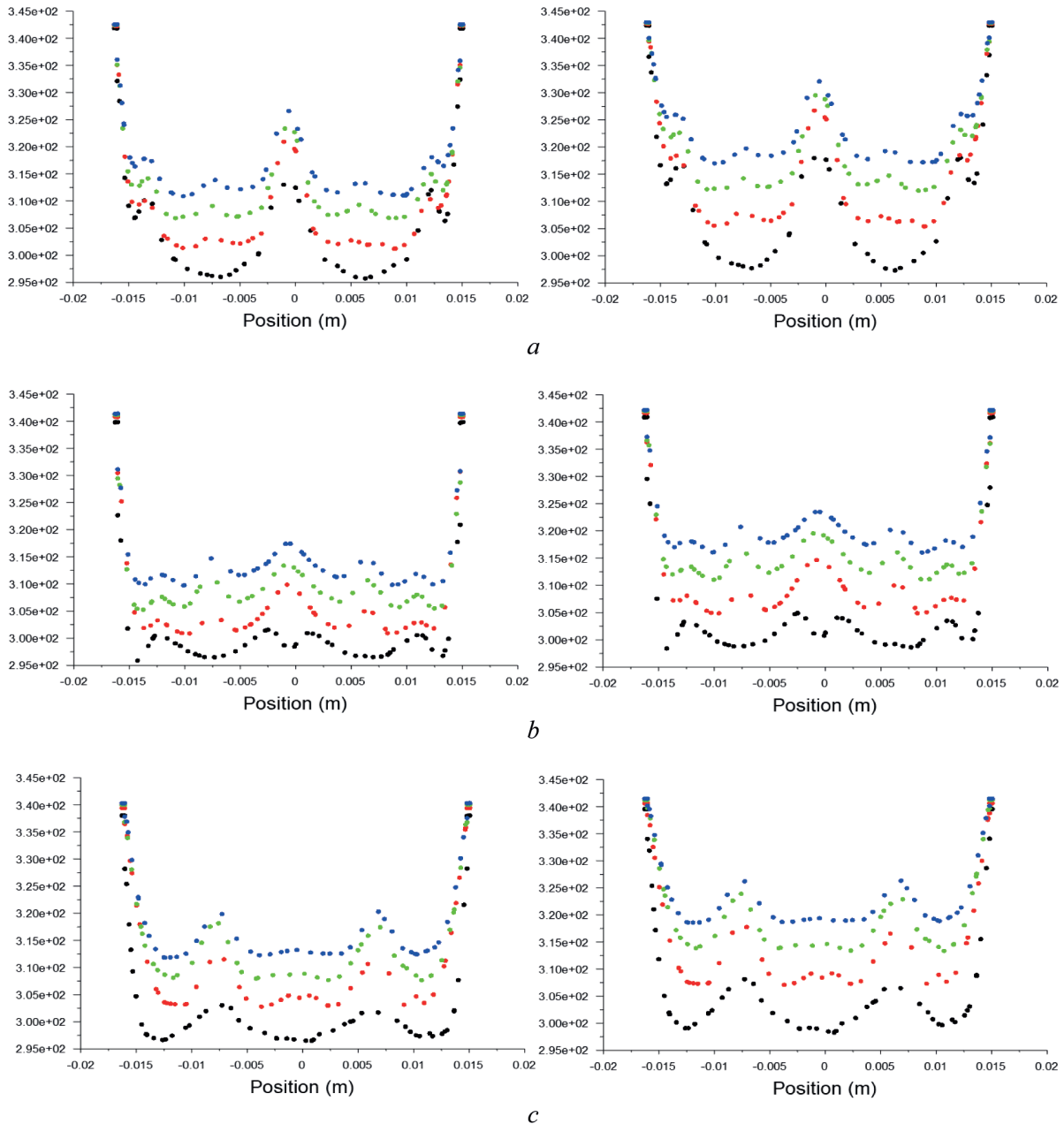


Рис. 3. Распределение температуры по поперечному сечению канала с вихревыми генераторами на нижней поверхности: *a* – у нижней поверхности; *b* – в середине канала; *c* – у верхней поверхности.

Обозначения: • сечение 1; • сечение 2; • сечение 3; • сечение 4.

Левая колонка – $Q = 0,0010044 \text{ м}^3/\text{с}$; правая колонка – $Q = 0,00209 \text{ м}^3/\text{с}$

Fig. 3. Temperature distributions across the channel with vortex generators at the lower surface:

a – at a lower surface; *b* – in the channel center; *c* – at an upper surface.

Naming: • section 1; • section 2; • section 3; • section 4. Left column – $Q = 0.0010044 \text{ m}^3/\text{s}$; right column – $Q = 0.00209 \text{ m}^3/\text{s}$

Распределение температуры потока у верхней поверхности канала определялось взаимодействием вихрей, генерируемых в углах канала, с вихрями, индуцированными нижними ВГ (см. рис. 3, *c*). Это взаимодействие создавало нисходящие воздушные потоки, прогретые у стенки, на координатах осей нижних генераторов. Средняя температура потока на выходе из канала вполне однородна. Увеличение расхода воздушного потока ускоряло его прогрев и температуру на выходе.

Визуализация температуры по сечению канала при установке ВГ на нижней и верхней поверхностях выполнена в том же диапазоне шкалы температур, что и для предыдущего варианта

расположения ВГ. Формирующиеся вихревые структуры захватывали среду с более низкой температурой и сохраняли ее на всей длине канала. Диссипация вихревых структур заметно ускорялась с ростом расхода охлаждающего потока. Генерируемые верхними ВГ структуры оказались подобными виртуальным структурам, формирующимся под влиянием только нижних генераторов (рис. 4).

Генерация вихрей на верхней поверхности усиливала взаимодействие вихревых структур в поперечном сечении канала. Возникли продолжительные замкнутые вихревые области пониженной температуры, перекрывающие поперечное сечение канала и существующие на всей его длине. Их взаимодействие определяло неочевидный перенос тепла от нижней поверхности и стенок канала в воздушный поток и его распределение по сечению канала. Исходя из рис. 4, создается впечатление, что прогрев потока в канале ослабевает, однако представленные изменения температуры по контролируемым сечениям канала это опровергают (рис. 5).

Видно, что у нижней поверхности канала максимум температуры потока в центре канала, формируемый смежными генераторами, уменьшался за первым рядом ВГ из-за усиления встречного нисходящего потока от верхней стенки. Температура прогретого потока, создаваемого нижними ВГ, у стенок канала увеличивалась. Средняя температура по сечению канала возрастала в среднем на 2–4 К с каждым новым рядом генераторов по сравнению с этими распределениями, полученными в канале с ВГ только на нижней поверхности.

В центральной части канала температура воздушного потока чуть выше за первым рядом нижних генераторов. На оси канала в этом сечении отчетливо проявился минимум температуры. Это указывало на усиление влияния нисходящего потока от верхней поверхности канала, который фактически создавался сразу за передней кромкой верхних ВГ (рис. 5, *b*). Неоднородность температуры за вторым сечением сильно возрастала, что отражало интенсивное смешение внутри канала под воздействием продольных вихрей и генерируемых ими вторичных потоков. Эта неоднородность в поперечном сечении канала ослабевала за третьим рядом генераторов и суще-

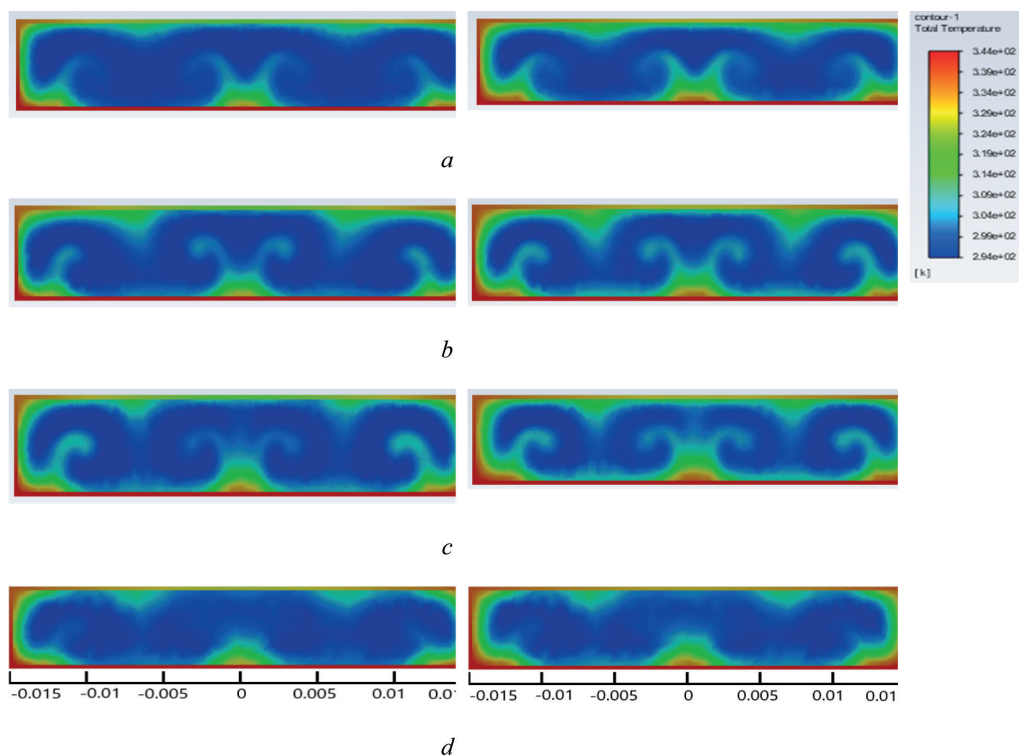


Рис. 4. Поле температур в канале с вихревыми генераторами на нижней и верхней поверхностях: *a* – сечение 1; *b* – сечение 2; *c* – сечение 3; *d* – сечение 4. Левые изображения – $Q = 0,0010044 \text{ м}^3/\text{с}$; правые изображения – $Q = 0,00209 \text{ м}^3/\text{с}$

Fig. 4. Temperature distributions across the channel with vortex generators at the lower and upper surfaces: *a* – section 1; *b* – section 2; *c* – section 3; *d* – section 4. Left builders $Q = 0.0010044 \text{ м}^3/\text{с}$; right builders – $Q = 0.00209 \text{ м}^3/\text{с}$

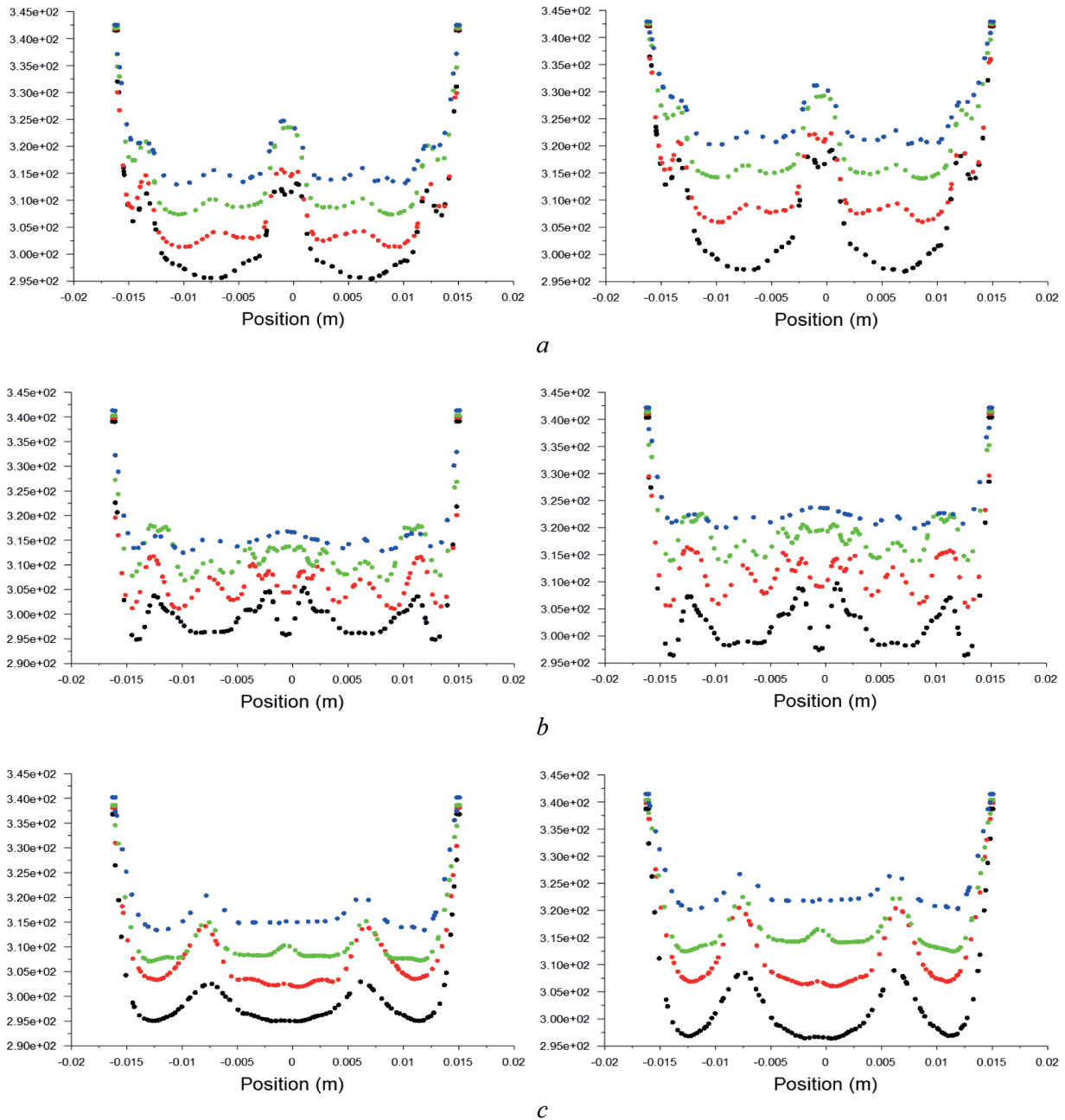


Рис. 5. Распределение температуры по поперечному сечению канала с вихревыми генераторами на нижней и верхней поверхностях: *a* – у нижней поверхности; *b* – в середине канала; *c* – у верхней поверхности. Обозначения: • сечение 1; • сечение 2; • сечение 3; • сечение 4. Левая колонка – $Q = 0,0010044 \text{ м}^3/\text{с}$; правая колонка – $Q = 0,00209 \text{ м}^3/\text{с}$

Fig. 5. Temperature distributions across the channel with vortex generators at the lower and upper surfaces: *a* – at a lower surface; *b* – in the channel center; *c* – at an upper surface. Naming: • section 1; • section 2; • section 3; • section 4. Left column – $Q = 0.0010044 \text{ m}^3/\text{s}$; right column – $Q = 0.00209 \text{ m}^3/\text{s}$

ственно вырождалась за четвертым рядом. Температура на выходе из канала в среднем увеличилась на 5 К по сравнению с предыдущей геометрией канала (см. рис. 4, *a, b*).

Распределения температуры в воздушном потоке у верхней стенки становились более однородными и демонстрировали рост температуры. По всей видимости, перенос тепла от стенок к верхней поверхности заметно возрастал при увеличении интенсивности вихревых зон. Эта прогретая среда направлялась в середину канала на координатах осей нижних генераторов. Пара ВГ в центре канала, направляющая общий поток к верхней стенке, также способствовала повышению его температуры. Полный механизм переноса тепла сложно представить, и требуется более детальное изучение взаимодействия нижних и верхних пар продольных вихрей.

Изменения перепада давления, температуры и тепловой мощности воздушного потока в канале с гладкими стенками и с ВГ представлены в таблице.

Изменение параметров воздушного канала, вызванное установкой вихревых генераторов
Changing in air channel parameters caused by vortex generators

Конфигурация канала	Расход потока, м ³ /с	Перепад давления, Па	Перепад температуры, К	Снимаемая мощность, кВт
Канал с гладкими стенками	0,0010044	34,64	25,20	0,0284
	0,00209	95,76	18,68	0,044
Канал с ВГ на нижней поверхности	0,0010044	56,89	29,49	0,03334
	0,00209	163,53	23,00	0,054
Канал с ВГ на двух поверхностях	0,0010044	64,36	31,91	0,0361
	0,00209	180,50	24,76	0,0581

Проведенные исследования показали, что тепловая мощность, снимаемая воздушным потоком в канале с ВГ на нижней стенке, увеличивалась по сравнению с аналогичной мощностью, снимаемой в канале с гладкими стенками, на 17,4 и на 22,7 % при расходе 0,0010044 и 0,00209 м³/с соответственно. В канале с ВГ на обеих поверхностях тепловая мощность воздушного потока возрастала на 27,1 и 32,0 % соответственно с ростом расхода. Увеличение тепловой мощности, однако, сопровождалось существенным приростом перепада давления.

Заключение. Выполнены численные исследования теплообмена в воздушном канале методом RANS при температуре охлаждающего воздушного потока 293 К и двух значениях расхода: 0,00209 и 0,0010044 м³/с, при которых в канале с гладкими стенками реализовывался режим переходного течения от ламинарного к турбулентному. Подвод теплового потока выполнялся через нижнюю поверхность канала и обеспечивал равномерный ее прогрев до температуры 343 К. Интенсификация теплообмена осуществлялась вихревыми генераторами, установленными на нижней и верхней поверхностях канала.

Генераторы образованы двумя прямоугольными пластинами длиной 0,015 м и высотой 0,002 м расположенными по нормали к поверхности с углом атаки $\alpha = \pm 15^\circ$. Нижние ВГ создавали пару продольных вихрей, которые формировали общий поток к нагретой стенке, а вихри смежной пары у центра канала формировали поток от стенки. В свою очередь верхние ВГ создавали нисходящий общий поток от стенки, а их смежные продольные вихри формировали общий поток к стенке. Генерация этих дополнительных потоков обеспечивала усиление перемешивание воздушной среды в поперечном сечении канала. Выполнена визуализация распределения температуры в четырех сечениях канала по его длине. Показано, что вихревые структуры заполняют поперечное сечение канала и сохранялись на всей его длине, диссипируя тем быстрее, чем выше расход воздушного потока.

Тепловая мощность канала с ВГ, установленными на нижней поверхности, увеличилась на 17,4 и 22,7 %, а перепад давления – на 64 и 71 % соответственно при расходах 0,0010044 и 0,00209 м³/с. В канале с ВГ на нижней и верхней поверхностях тепловая мощность возросла на 27,1 и 32,0 %, а перепад давления – на 86 и 89 % соответственно для указанных расходов.

Рассмотренный метод интенсификации теплообмена в узком канале с помощью малоразмерных вихревых генераторов может найти практическое применение при проектировании малогабаритных теплообменников, когда нет существенных ограничений по перепаду давления. Изготовление таких теплообменников с использованием современных 3D адаптивных технологий экономит материальные и энергетические ресурсы.

Список использованных источников

1. Pearcy, H. H. Introduction to Shock-Induced separation and its prevention by design and boundary Layer control / H. H. Pearcy // Boundary Layer and Flow Control: Its Principle and Applications / ed. G. V. Lachmann. – Pergamon Press, 1961. – Vol. 2. – Part IV. – P. 1166–1344. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-1323-1.50021-X>
2. Pauley, W. R. Experimental study of the development of longitudinal vortex pairs embedded in a turbulent boundary layer / W. R. Pauley, J. K. Eaton // AIAA Journal. – 1988. – Vol. 26, № 7. – P. 816–823. <https://doi.org/10.2514/3.9974>

3. Mehta, R. D., Longitudinal vortices imbedded in turbulent boundary layers. Part 2. Vortex pair with 'common flow' upwards / R. D. Mehta, P. Bradshaw // *J. Fluid Mech.* – 1988. – Vol. 188. – P. 529–546. <https://doi.org/10.1017/S0022112088000837>
4. Jacobi, A. M. Heat transfer surface enhancement through the use of longitudinal vortices: A review of recent progress / A. M. Jacobi, R. K. Shah // *Exp. Therm. Fluid Sci.* – 1995. – Vol. 11, Iss. 3. – P. 295–309. [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(95\)00066-U](https://doi.org/10.1016/0894-1777(95)00066-U)
5. Joardar, A. Heat transfer enhancement by winglet-type vortex generator arrays in compact plain-fin-and-tube heat exchangers / A. Joardar, A. Jacobi // *Int. J. Refrigeration.* – 2008. – Vol. 31, Iss. 1. – P. 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2007.04.011>
6. Hiravennavar, S. A note on the flow and heat transfer enhancement in a channel with built-in winglet pair / S. Hiravennavar, E. Tulapurkara, G. Biswas // *Int. J. Heat Fluid Flow.* – 2007. – Vol. 28, Iss. 2. – P. 299–305. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.03.030>
7. Experimental study of rectangular channel with modified rectangular longitudinal vortex generators / Chunhua Min [et al.] // *Int. J. Heat Mass Trans.* – 2010. – Vol. 53, Iss. 15–16. – P. 3023–3029. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.03.026>
8. KeWei Song. Interaction of counter rotating longitudinal vortices and the effect on fluid flow and heat transfer / KeWei Song, Song Liu, LiangBi Wang // *Int. J. Heat Mass Trans.* – 2016. – Vol. 93. – P. 349–360. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.10.001>
9. Nandana, V. Numerical study on the enhancement of heat transfer performance in a rectangular duct with new winglet shapes / V. Nandana, U. Janoske // *Therm. Sci. Eng. Progress.* – 2018. – Vol. 6. – P. 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.03.005>
10. Wilcox, D. C. *Turbulence modeling for CFD* / D. C. Wilcox. – La Canada, California: DCW Industries Inc., 1998. 537 p.

References

1. Percy H. H. Part IV. Introduction to Shock-Induced separation and its prevention by design and boundary Layer control. Lachmann G. V. (ed.). *Boundary Layer and Flow Control: Its Principle and Applications. Vol. 2.* Pergamon Press, 1961, pp. 1166–1344. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-1323-1.50021-X>
2. Pauley W. R., Eaton J. K. Experimental study of the development of longitudinal vortex pairs embedded in a turbulent boundary layer. *AIAA Journal*, 1988, vol. 26, no. 7, pp. 816–823. <https://doi.org/10.2514/3.9974>
3. Mehta R. D., Bradshaw P. Longitudinal vortices imbedded in turbulent boundary layers. Part 2. Vortex pair with 'common flow' upwards. *Journal of Fluid Mechanics*, 1988, vol. 188, pp. 529–546. <https://doi.org/10.1017/S0022112088000837>
4. Jacobi A. M., Shah R. K. Heat transfer surface enhancement through the use of longitudinal vortices: A review of recent progress. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1995, vol. 11, iss. 3, pp. 295–309. [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(95\)00066-U](https://doi.org/10.1016/0894-1777(95)00066-U)
5. Joardar A., Jacobi A. Heat transfer enhancement by winglet-type vortex generator arrays in compact plain-fin-and-tube heat exchangers. *International Journal of Refrigeration*, 2008, vol. 31, iss. 1, pp. 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2007.04.011>
6. Hiravennavar S., Tulapurkara E., Biswas G. A note on the flow and heat transfer enhancement in a channel with built-in winglet pair. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2007, vol. 28, iss. 2, pp. 299–305. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.03.030>
7. Chunhua Min, Chengying Qi, Xiangfei Kong, Jiangfeng Dong. Experimental study of rectangular channel with modified rectangular longitudinal vortex generators. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, vol. 53, iss. 15–16, pp. 3023–3029. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.03.026>
8. KeWei Song, Song Liu, LiangBi Wang. Interaction of counter rotating longitudinal vortices and the effect on fluid flow and heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, vol. 93, pp. 349–360. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.10.001>
9. Nandana V., Janoske U. Numerical study on the enhancement of heat transfer performance in a rectangular duct with new winglet shapes. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018, vol. 6, pp. 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.03.005>
10. Wilcox D. C. *Turbulence Modeling for CFD*. La Canada, California, DCW Industries Inc., 1998. 537 p.

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-307-317>
УДК 536.33;511.178;519.178



Оригинальная статья

П. С. Гринчук^{1*}, В. Г. Лузин²

¹*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь*

²*ООО «ПромТермоСистема», ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь*

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ ТИПА РАДИАЦИОННАЯ ТРУБА
НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ГРАФОВ**

Аннотация. Выполнен анализ особенностей работы электрических нагревателей закрытого вида типа радиационная труба. На основе опыта эксплуатации радиационных труб производства компании «ПромТермоСистема» (Беларусь) показаны ключевые аспекты, влияющие на долговечность нагревателей. В качестве основных технических проблем рассматриваются плотное расположение нагревательных элементов (металлических прутков) в малом объеме и связанные с этим электрические пробой электроизоляционных керамических вставок. На основе теории графов предложен метод анализа коммутации нагревательных элементов при их плотной упаковке, который позволил найти новые рациональные схемы коммутации. Метод основан на построении нумерованных графов на отверстиях в керамическом элементе для нагревательных прутков и нахождении графа с минимальным весом. По смыслу построения графа его вес пропорционален максимальной разности потенциалов между прутками. Найденные схемы коммутации снижают максимальную разность потенциалов на керамических изоляторах на 35–50 %, от 70 В до 35±45 В, а напряженность электрического поля – от 10 кВ/м до 5,0±6,5 кВ/м. Это позволяет пропорционально увеличить надежность и долговечность нагревателей, уменьшить вероятность электрических пробоев керамики.

Ключевые слова: электрический нагреватель, коммутация, теория графов, электрический пробой, высокотемпературная электроизоляционная керамика

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Гринчук Павел Семенович* – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор физико-математических наук, заведующий отделением теплофизики Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0002-4124-3186>. E-mail: gps@hmti.ac.by; *Лузин Владимир Георгиевич* – директор ООО «ПромТермоСистема». E-mail: pts2024xto@mail.ru

Вклад авторов: *Гринчук Павел Семенович* – формулировка и обоснование концепции исследования, идея метода оптимизации электрической коммутации на основе теории графов, решение задачи оптимизации коммутации, написание статьи; *Лузин Владимир Георгиевич* – разработка конструкции нагревателей, сбор информации об опыте эксплуатации нагревателей.

Для цитирования: Гринчук, П. С. Повышение надежности высокотемпературных электрических нагревателей типа радиационная труба на основе методов теории графов / П. С. Гринчук, В. Г. Лузин // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 4. – С. 307–317. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-307-317>

Поступила в редакцию: 10.09.2024

Утверждена к публикации: 16.12.2024

Подписана в печать: 23.12.2024

Original article

Pavel S. Grinchuk^{1*}, Vladimir G. Luzin²

¹*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus*

²*“PromTermoSistema” LLC, 15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus*

**INCREASING THE RELIABILITY OF HIGH-TEMPERATURE ELECTRIC HEATERS
OF THE RADIANT TUBE TYPE BASED ON GRAPH THEORY METHODS**

Abstract. The analysis of the operating features of closed-type electric heaters of the radiant tube type is performed. Based on the operating experience of the radiant tubes manufactured by “PromTermoSistema” LLC (Belarus), the key aspects

affecting the durability of the heaters are shown. One of the main technical problems is the dense arrangement of heating elements (metal rods) in a small volume and the associated electrical breakdowns of electrically insulating ceramic inserts. Based on graph theory, a method is proposed for analyzing the commutation of heating elements with dense packing, which made it possible to find new rational commutation schemes. The method is based on constructing numbered graphs on the holes for heating rods in the ceramic element and finding the graph with the minimum weight. According to the meaning of constructing a graph, its weight is proportional to the maximum potential difference between the rods. The found commutation schemes reduce the maximum potential difference on ceramic insulators by 35–50 %, from 70 V to 35÷45 V, and the electric field strength from 10 kV/m to 5.0÷6.5 kV/m. This allows proportionally increasing the reliability and durability of heaters, reducing the probability of electrical breakdowns of ceramics.

Keywords: electric heater, switching, graph theory, electrical breakdown, high-temperature electrical insulating ceramics

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: *Pavel S. Grinchuk* – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Head of the Thermophysics Department at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0002-4124-3186>. E-mail: gps@hmti.ac.by; *Vladimir G. Luzin* – Director at “PromTermoSistema” LLC. E-mail: pts2024xto@mail.ru

Contribution of the authors: *Pavel S. Grinchuk* – formulation and justification of the research concept, the idea of the method for optimizing electrical commutation based on graph theory, solving the commutation optimization problem, writing the article; *Vladimir G. Luzin* – development of the heater design, collecting information on the operating experience of heaters.

For citation: Grinchuk P. S., Luzin V. G. Increasing the reliability of high-temperature electric heaters of the radiant tube type based on graph theory methods. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 4, pp. 307–317 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-307-317>

Received: 10.09.2024

Approved for publication: 16.12.2024

Signed to the press: 23.12.2024

Введение. Существует ряд технических задач, где необходимо использовать электрический нагрев в специальных, в том числе в химически активных, атмосферах. Характерным примером является процесс газовой цементации сталей с целью придания высокой твердости и износостойкости поверхности деталей при сохранении пластичности их сердцевины [1]. Традиционно в нагревателях, работающих при температурах до 1200 °С, применяются сплавы сопротивления – нихром или фехраль. Долговременная работоспособность таких сплавов связана с формированием на их поверхности стойких защитных оксидных слоев – оксида хрома для нихрома и оксида алюминия для фехрали [2]. Поэтому наиболее благоприятна для работы таких нагревателей окислительная воздушная атмосфера.

При работе нагревателя в химически активной атмосфере, например в эндогазе при цементации (~40 об.% водорода, ~20 об.% СО), оксидные слои будут быстро восстанавливаться водородом и угарным газом. Это резко снижает срок службы нагревателей. Для защиты нагревателей используют чехлы из жаропрочных сплавов или из безоксидной керамики (карбид кремния). Обладая хорошими электроизоляционными свойствами, оксидная керамика также может активно деградировать и разрушаться в восстановительной атмосфере. При этом материал нагревателя стараются разместить как можно компактнее внутри защитного чехла. Такие нагреватели получили название радиационных труб [3]. Существует два варианта размещения труб внутри печи – вертикально (рис. 1) и горизонтально.

Для механической поддержки самого нагревателя и электрической изоляции отдельных элементов нагревателя друг от друга (во избежание межвитковых замыканий) и от электропроводящего защитного кожуха используются специальные фасонные керамические элементы. В зависимости от мощности нагревателя и потребности в концентрации этой мощности в небольшом объеме могут применяться керамические элементы с одним, двумя и даже тремя концентрическими кольцами отверстий для размещения прутков нагревательного элемента (рис. 2). Отметим, что характерная плотность энерговыделения в радиационных трубах составляет около 1 МВт/м³, а напряженность электрического поля на поверхности керамических элементов может достигать 10 кВ/м. Плотное размещение нагревательных элементов в малом объеме является одной из основных конструктивных проблем.

Такое плотное размещение приводит к относительно частому выходу из строя радиационных труб по причине электрического пробоя керамической изоляции. Накопленный опыт эксплуатации данных нагревателей позволяет отметить характерные дефекты и выявить определенные закономерности (рис. 3).

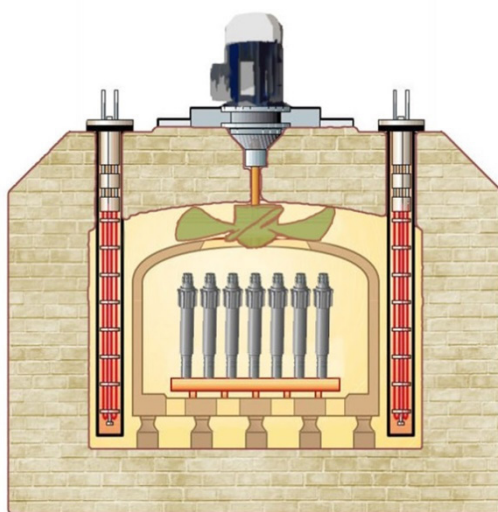


Рис. 1. Вертикальное расположение радиационных труб в печи с цементационной атмосферой
Fig. 1. Vertical arrangement of radiation tubes in a furnace with a carburizing atmosphere

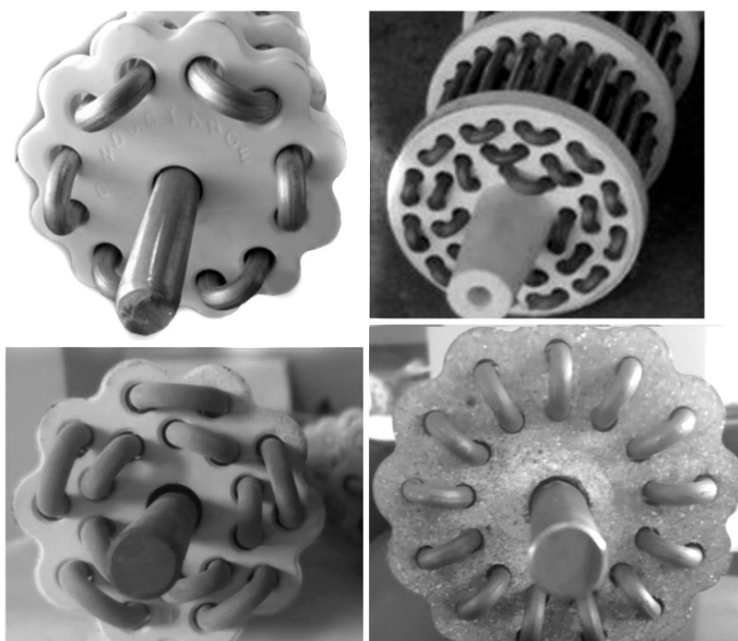


Рис. 2. Керамические элементы (диски) для радиационных труб с различным количеством отверстий и концентрических колец из отверстий (от 1 до 3) для размещения прутков нагревателя

Fig. 2. Ceramic elements (disks) for radiant tubes with a different number of holes and concentric rings of holes (from 1 to 3) for placing heater rods

Общей особенностью электроизоляционных керамик является увеличение их электропроводности с ростом температуры. Так, при возрастании температуры от комнатной до 1000 °С электрическое сопротивление этих материалов может уменьшиться на семь-восемь порядков (рис. 4) [4–6]. Причем это характерно для всех высокотемпературных изоляторов, включая один из лучших – оксид магния [5]. На фоне таких свойств самих электроизоляционных материалов дополнительной причиной упомянутого электрического пробоя может быть низкое качество керамики, вызванное наличием в ее составе посторонних электропроводящих включений. К этому приводит недальновидная практика отдельных производителей, состоящая в использовании вторичных огнеупоров, бывших в употреблении и содержащих большое количество посторонних примесей, в качестве источника сырья для изготовления ответственных деталей [7].

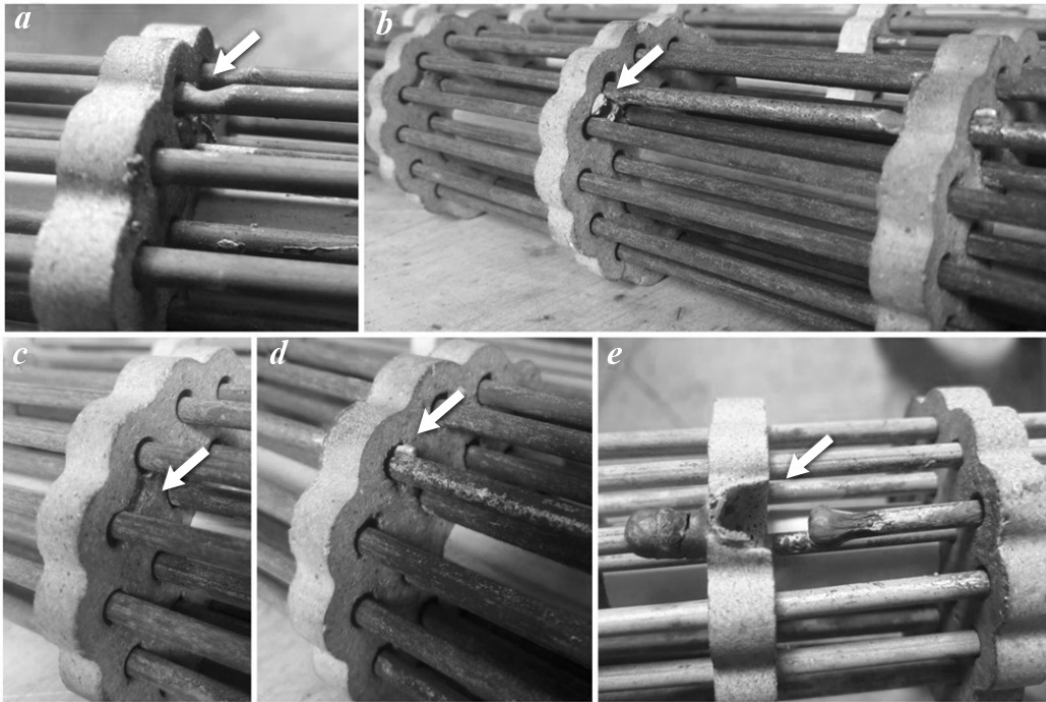


Рис. 3. Характерные дефекты вышедших из строя нагревательных элементов радиационных труб:
a – критическое уменьшение поперечного сечения прутка, вызванное вероятным локальным горением электрической дуги; *b, c* – начальная стадия эрозии керамического элемента по линии максимальной разности потенциалов; *d* – оплавление прутка в месте максимальной разности потенциалов; *e* – полное расплавление прутка и сильная эрозия керамического элемента в месте горения электрической дуги

Fig. 3. Typical defects of failed heating elements: *a* – critical reduction in the cross-section of the rod caused by probable local burning of the electric arc; *b, c* – initial stage of ceramic element erosion along the line of maximum potential difference; *d* – melting of the rod at the point of maximum potential difference; *e* – complete melting of the rod and strong erosion of the ceramic element at the point of burning of the electric arc

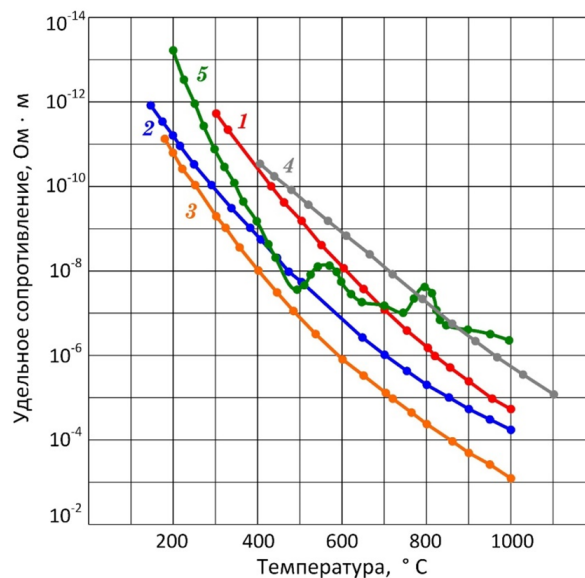


Рис. 4. Удельное электрическое сопротивление электроизоляционной керамики при различных температурах:
кривая 1 – оксид алюминия [4]; кривая 2 – стеатит (талк, обогащенный магнием) с малыми потерями [4];
кривая 3 – цирконовый фарфор [4]; кривая 4 – оксид магния [5]; кривая 5 – прозрачное кварцевое стекло [6]

Fig. 4. Specific electrical resistance of electrical insulating ceramics at different temperatures: curve 1 – aluminum oxide [4]; curve 2 – low-loss steatite (talc enriched with magnesium) [4]; curve 3 – zircon porcelain [4]; curve 4 – magnesium oxide [5]; curve 5 – transparent quartz glass [6]

Анализ причин выхода нагревателей из строя показывает, что в большинстве случаев пробой возникает между двумя точками с максимальной разностью потенциалов, которая может составлять для конкретной геометрии керамического элемента 70 В и выше. При этом напряженность поля в данной точке достигает 10 В/мм. Отметим, что пробивная напряженность поля для огнеупорных керамических диэлектриков составляет около 1,5 кВ/мм при комнатной температуре [4]. Так что при отмеченном выше возрастании на порядки электропроводности керамики при повышении температуры ее электрический пробой имеет отличную от нуля вероятность.

Метод решения проблемы. Существуют два способа решения рассматриваемой проблемы – работа с качеством и составом керамического огнеупорного диэлектрика и работа с коммутацией элементов нагревателя внутри керамики. Оптимизация коммутации прутков нагревателя, призванная уменьшить создаваемые в керамике разности потенциалов, может существенно нивелировать влияние некачественного материала.

Надежность и долговечность нагревателей требует использования в них прутков из сплавов сопротивления достаточно большого диаметра (6–8 мм). Нагревательный элемент большего диаметра медленнее деградирует при прочих равных условиях. Наиболее распространенная конструкция радиационных труб состоит из набора одинаковых конструктивных элементов – длинных сдвоенных U-образных прутков из сплава сопротивления длиной порядка 0,7–1,5 м, которые свариваются (коммутируются) в холодной части нагревателя. Как правило, это последовательно соединяемые части с одинаковым сопротивлением, так что на каждом прутке имеет место одинаковое падение напряжения. Из-за большой длины прутка относительно велико падение напряжения на нем. Например, при напряжении питания нагревателя 110 В его конструкция состоит из 18–22 прутков, так что на каждом прутке падение напряжения составляет около 5 В. Анализ проблемы электрического пробоя керамического изолятора показал, что пробой случается в подавляющем числе случаев между соседними прутками с высокой разницей потенциалов. Стандартная коммутация, которая используется в этих нагревателях, основана на замкнутой кольцевой конфигурации (рис. 2, 5, а). Вынужденная кольцевая конфигурация приводит к тому, что в месте подвода напряжения к нагревателю разность потенциалов между соседними прутками может достигать 70 В.

Рассмотрим проблему оптимизации коммутации последовательно соединенных сопротивлений (U-образных прутков). В стандартном варианте прутки размещены в соседних ячейках последовательно и в холодной части нагревателя их выводы сварены перемычками. Схема размещения прутков в керамике показана на рис. 5, а (вид сверху). Пронумеруем последовательно все

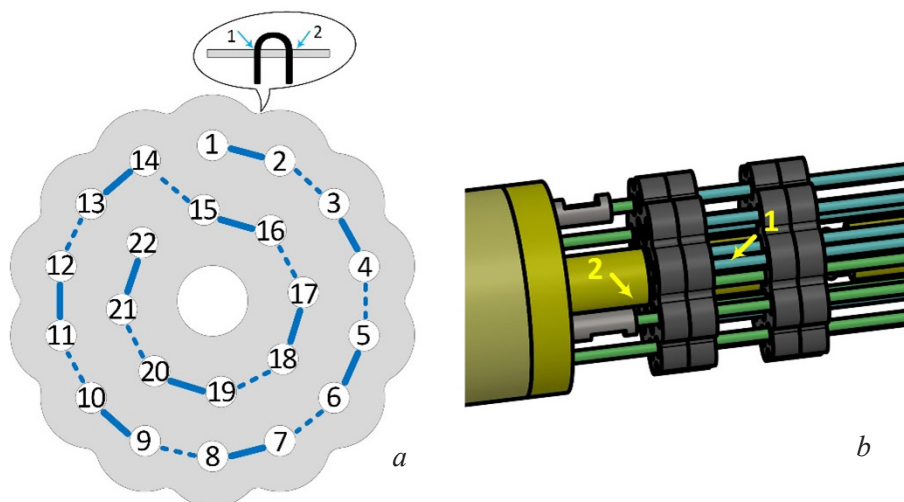


Рис. 5. Нумерация отверстий в керамическом элементе (диске), в которые вставляются прутки из сплава сопротивления, для построения графа (а) и два уровня (1 и 2) в холодной части нагревателя, на которых возможна коммутация прутков нагревателя, что также важно для построения графа (b)

Fig. 5. Numbering of the ceramic element (disk) holes into which the resistance alloy rods are inserted for constructing the graph (a) and two levels (1 and 2) in the cold part of the heater, at which commutation of the heater rods is possible, which is also important for constructing the graph (b)

соединенные прутки, а фактически все отверстия в керамическом элементе (диске), через которые они проходят (см. рис. 5, *a*). Видно, что если падение потенциала на каждом прутке составляет ΔU , а разность номеров между соседними ячейками – N , то между этими ячейками создается разность потенциалов $\Delta U \times N$. В указанном выше примере при последовательной сборке нагревателя максимальная разность потенциалов возникнет между точками 1 и 15 и составит 70 В при напряжении питания нагревателя 110 В (см. рис. 5, *a*). Именно в таких местах возникают пробой нагревателей при эксплуатации.

Несложно заметить, что предложенная нумерация дает алгоритм построения нумерованного упорядоченного графа [8]. Пусть наше рабочее поле (керамический диск) содержит фиксированное всегда четное количество отверстий (вершины графа) и их положение на диске строго задано. При построении графа не допускается исключение вершин из рассмотрения – из каждой вершины должно выходить хотя бы одно ребро. Не допускается также пересечение любых ребер графа. Для рассматриваемой проблемы граф – это совокупность вершин (отверстий в керамике) и ребер (U-образных элементов, соединяющих два соседних отверстия, сплошные линии на рис. 5, *a*). При этом можно отметить, что по физическому смыслу самого объекта, нагревателя, граф должен быть аperiодическим и не должен содержать никаких циклов, кроме одного главного. Последовательность соединения элементов в электрическую цепь представляет собой гамильтонов путь, а сам граф по определению является гамильтоновым графом.

Важным для дальнейшего рассмотрения является факт, что конструктивно основная коммутация прутков осуществляется на первом уровне в холодной части нагревателя (1 на рис. 5, *b*), а дополнительная коммутация для прутков, расположенных на большом расстоянии друг от друга, возможна на уровне 2 (2 на рис. 5, *b*). Это допускает более сложную коммутацию прутков нагревателя с разбиениями на подграфы (группы). В этом случае последовательно соединенные элементы не обязательно должны располагаться в соседних отверстиях керамики. Соответственно, числа в обозначениях элементов нагревателя не обязательно должны располагаться в соседних вершинах графа. Назовем весом графа максимальную разность номеров любых двух соседних вершин данного графа. Например, на рис. 5, *a* вес построенного графа равен $14 = 15 - 1 = 16 - 2$.

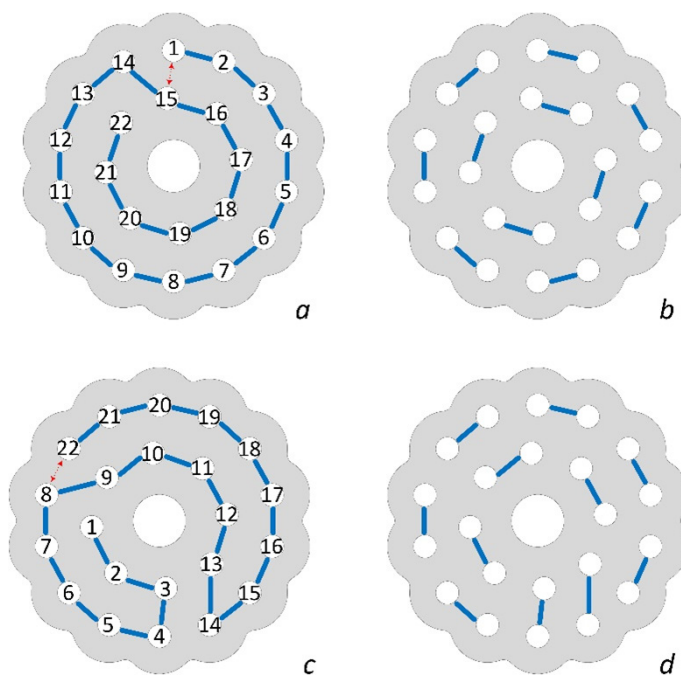


Рис. 6. Граф с весом 14 без разбиения на подграфы на рассматриваемом поле вершин (*a, c*) и общий вид коммутации нагревателя (вид сверху) (*b, d*)

Fig. 6. Graph with weight 14 without subdivision into subgraphs on the considered vertex field (*a, c*) and general view of the heater switching (top view) (*b, d*)

Окончание таблицы

Номер разбиения	Номер слагаемого											Вес графа
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
17	16	2	2	2	–	–	–	–	–	–	–	–
18	14	4	2	2	–	–	–	–	–	–	–	–
19	12	6	2	2	–	–	–	–	–	–	–	–
20	12	4	4	2	–	–	–	–	–	–	–	–
21	10	8	2	2	–	–	–	–	–	–	–	–
22	10	6	4	2	–	–	–	–	–	–	–	–
23	10	4	4	4	–	–	–	–	–	–	–	–
24	8	8	4	2	–	–	–	–	–	–	–	–
25	8	6	6	2	–	–	–	–	–	–	–	–
26	8	6	4	4	–	–	–	–	–	–	–	7
27	6	6	6	4	–	–	–	–	–	–	–	–
28	14	2	2	2	2	–	–	–	–	–	–	–
29	12	4	2	2	2	–	–	–	–	–	–	–
30	10	6	2	2	2	–	–	–	–	–	–	–
31	10	4	4	2	2	–	–	–	–	–	–	–
32	8	8	2	2	2	–	–	–	–	–	–	–
33	8	6	4	2	2	–	–	–	–	–	–	–
34	8	4	4	4	2	–	–	–	–	–	–	–
35	6	6	6	2	2	–	–	–	–	–	–	–
36	6	6	4	4	2	–	–	–	–	–	–	7
37	6	4	4	4	4	–	–	–	–	–	–	–
38	12	2	2	2	2	2	–	–	–	–	–	–
39	10	4	2	2	2	2	–	–	–	–	–	–
40	8	6	2	2	2	2	–	–	–	–	–	–
41	8	4	4	2	2	2	–	–	–	–	–	–
42	6	6	4	2	2	2	–	–	–	–	–	–
43	6	4	4	4	2	2	–	–	–	–	–	–
44	4	4	4	4	4	2	–	–	–	–	–	7
45	10	2	2	2	2	2	2	–	–	–	–	–
46	8	4	2	2	2	2	2	–	–	–	–	–
47	6	6	2	2	2	2	2	–	–	–	–	–
48	6	4	4	2	2	2	2	–	–	–	–	–
49	4	4	4	4	2	2	2	–	–	–	–	–
50	8	2	2	2	2	2	2	2	–	–	–	–
51	6	4	2	2	2	2	2	2	–	–	–	–
52	4	4	4	2	2	2	2	2	–	–	–	–
53	6	2	2	2	2	2	2	2	2	–	–	–
54	4	4	2	2	2	2	2	2	2	–	–	–
55	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	–	–
56	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	7

Работа с возможными разбиениями на заданном поле вершин позволила определить следующую картину. Введение всего одного разбиения позволяет уменьшить вес графа с 14 до 9 (рис. 6, 7), что в данном конкретном случае соответствует уменьшению разности потенциалов на керамике от 70 до 45 В. Такой вес возможно получить на разбиении $22 = 12 + 10$ (см. рис. 7). Дальнейшее увеличение числа подграфов не дает уже такого заметного эффекта. Так, при разбиении на 3 подграфа можно получить вес, равный 8, причем в нескольких вариантах: $22 = 10 + 6 + 6$ (рис. 8)

и $22 = 8 + 8 + 6$ (рис. 9). Дальнейшее увеличение числа подграфов с 3 по 4 позволяет уменьшить вес разбиения только до 7: $22 = 8 + 6 + 4 + 4$ (рис. 10). Данная картина может интуитивно подвигнуть к выводу, что увеличение числа разбиений до максимально возможного (11 раз по 2) позволит уменьшить вес разбиения чуть ли не до 1. Интересным математическим фактом является то обстоятельство, что это не так. У задачи существует нетривиальный минимум по весу разбиения в зависимости от количества подграфов. Вероятно, что на данном поле вершин таким минимумом является разбиение $22 = 8 + 6 + 4 + 4$ на 4 графа с весом 7 (см. рис. 10).

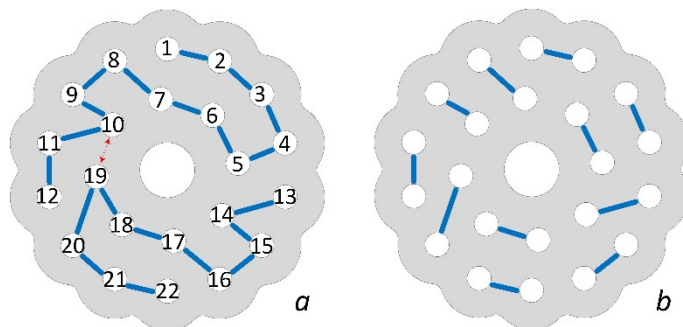


Рис. 7. Разбиение 22 вершин с весом 9 на 2 подграфа {12 + 10} (a) и общий вид коммутации нагревателя (b)

Fig. 7. Partitioning of 22 vertices with weight 9 into 2 subgraphs {12 + 10} (a) and general view of heater switching (b)

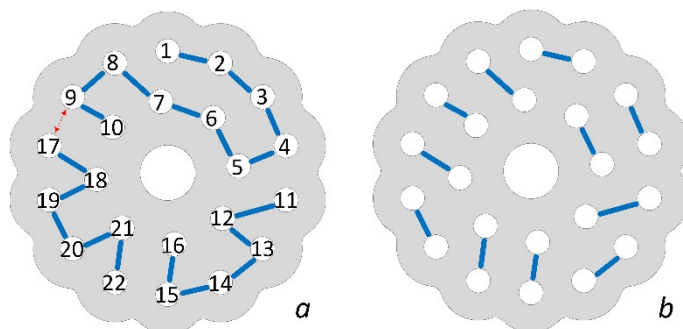


Рис. 8. Разбиение 22 вершин с весом 8 на 3 подграфа {10 + 6 + 6} (a) и общий вид коммутации нагревателя (b)

Fig. 8. Partitioning of 22 vertices with weight 8 into 3 subgraphs {10 + 6 + 6} (a) and general view of heater switching (b)

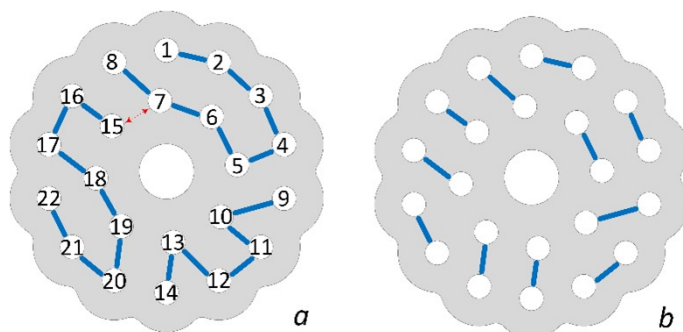


Рис. 9. Разбиение 22 вершин с весом 8 на 3 подграфа {8 + 8 + 6} (a) и общий вид коммутации нагревателя (b)

Fig. 9. Partitioning of 22 vertices with weight 8 into 3 subgraphs {8 + 8 + 6} (a) and general view of heater switching (b)

При увеличении разбиения до 5 слагаемых вес разбиения уже не уменьшается и остается постоянным, равным 7 (см. рис. 10, таблицу). Однако это утверждение не является математически строгим, вероятно, зависит от конфигурации вершин и требует отдельного рассмотрения.

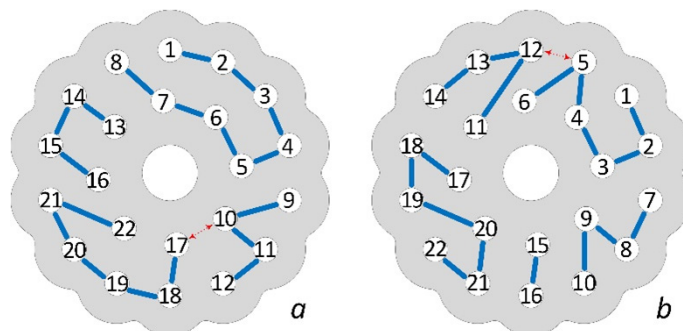


Рис. 10. Разбиение 22 вершин с весом 7 на 4 подграфа $\{8 + 6 + 4 + 4\}$ (a) и разбиение 22 вершин с весом 7 на 5 подграфов $\{6 + 6 + 4 + 4 + 2\}$ (b)

Fig. 10. Partitioning of 22 vertices with weight 7 into 4 subgraphs $\{8 + 6 + 4 + 4\}$ (a) and partitioning of 22 vertices with weight 7 into 5 subgraphs $\{6 + 6 + 4 + 4 + 2\}$

Отметим, что конфигурации графов с минимальным весом при заданном количестве разбиений (подграфов) обладают определенной внутренней симметрией (см. рис. 8, b; 9, b). Это косвенно указывает на корректность полученных решений. Следует упомянуть, что аддитивная теория чисел применялась и ранее для решения задач электрической коммутации [10].

Заключение. Проанализированы основные причины выхода из строя нагревателей типа радиационная труба для промышленных печей. Показано, что основной причиной выхода из строя нагревателей является электрический пробой керамической изоляции, связанный с плотным расположением нагревательных прутков. Предложен алгоритм анализа коммутации таких нагревателей, который позволяет оптимизировать подключение и уменьшить возникающую на электроизоляционной керамике разность потенциалов. Алгоритм основан на использовании теории разбиений из теории чисел и методов теории графов. Работа с разбиениями позволяет уменьшить при прочих равных условиях разность потенциалов на керамическом изоляторе с 70 по 35 В при разбиении прутков нагревателей на 4 группы. Для уменьшения разности потенциалов с 70 по 45 В достаточно разбить нагреватели всего на 2 группы, то есть приварить одну дополнительную перемычку.

Предложенные схемы коммутации и алгоритмы их построения могут применяться для создания высокотемпературных радиационных нагревателей с повышенным сроком службы. Математический алгоритм на основе теории графов и теории разбиений, приведенный в данной работе, может использоваться при построении оптимальной коммутации нагревателей с другой геометрией керамических дисков.

Список использованных источников

1. Гринчук, П. С. О проблемах развития отечественных технологий цементации конструкционных сталей / П. С. Гринчук, В. М. Константинов // Наука и инновации. – 2023. – № 1. – С. 19–23.
2. Гринчук, П. С. Математическое моделирование тепловых режимов работы электропечей сопротивления / П. С. Гринчук // Инженер.-физ. журн. – 2010. – Т. 83, № 1. – С. 28–37.
3. Электротермическое оборудование: справочник / под общ. ред. А. П. Альтгаузена, М. Я. Смелянского, М. С. Шевцова. – М.: Энергия, 1967. – 486, [1] с.
4. Хиппель, А. Р. Диэлектрики и их применение: пер. с англ. / А. Р. Хиппель. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 336 с.
5. Wilson, I. O. Magnesium oxide as a high-temperature insulant / I. O. Wilson // IEE Proceedings A (Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, Reviews). – 1981. – Vol. 128, № 3. – P. 159–164. <https://doi.org/10.1049/ip-a-1.1981.0026>
6. Марковский, Л. Я. Химическая электротермия / Л. Я. Марковский, Д. Л. Оршанский, В. П. Прянишников. – Л.: М.: Госхимиздат, 1952. – 408 с.
7. Огнеупорные материалы на основе вторичных ресурсов и фосфатных соединений / К. Б. Подболотов [и др.] // Новые огнеупоры. – 2018. – № 12. – С. 9–13. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2018-12-9-13>
8. Харари, Ф. Теория графов / Ф. Харари. – М.: Мир, 1973. – 300 с.
9. Эндрюс, Г. Теория разбиений: пер. с англ. / Г. Эндрюс. – М.: Наука, 1982. – 256 с.
10. Brauer, A. A problem of additive number theory and its application in electrical engineering / A. Brauer // Journal of the Elisha Mitchell Scientific Society. – 1945. – Vol. 61, №1/2. – P. 55–66.

References

1. Grinchuk P., Konstantinov V. On the problems of domestic technologies for the structural steels carburizing development. *Nauka i innovatsii = Science and Innovations*, 2023, no. 1, pp. 19–23 (in Russian).
2. Grinchuk P. S. Mathematical modeling of thermal operating regimes of electric resistance furnaces. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2010, vol. 83, no. 1, pp. 30–40. <https://doi.org/10.1007/s10891-010-0316-4>
3. Al'tgauzen A. P., Smelyanskii M. Ya., Shevtsov M. S. (eds.). *Electrothermal Equipment: Handbook*. Moscow, Energia Publ., 1967. 486 p. (in Russian).
4. Von Hippel, A. R. *Dielectric Materials and Applications; Papers by Twenty-Two Contributors*. Cambridge: published jointly by the Technology Press of M.I.T. and Wiley, 1954. 438 p.
5. Wilson I. O. Magnesium oxide as a high-temperature insulant. *IEE Proceedings A (Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, Reviews)*, 1981, vol. 128, no. 3, pp. 159–164. <https://doi.org/10.1049/ip-a-1.1981.0026>
6. Markovsky L. Ya., Orshansky D. L., Pryanishnikov V. P. *Chemical Electrothermy*. Leningrad, Moscow, Goskhimizdat, Publ., 1952. 408 p. (in Russian).
7. Podbolotov K. B., Volochko A. T., Khort N. A., Gusarov S. V. Refractory materials on base of the secondary resources and phosphate compounds. *Novye ognepory = New Refractories*, 2018, no. 12, pp. 9–13 (in Russian). <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2018-12-9-13>
8. Harary F. *Graph Theory*. Addison-Wesley Publishing Company, 1969. IX, 274 p. <https://doi.org/10.21236/ad0705364>
9. Andrews G. E. *The Theory of Partitions*. Cambridge University Press, 1984. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511608650>
10. Brauer A. A problem of additive number theory and its application in electrical engineering. *Journal of the Elisha Mitchell Scientific Society*, 1945, vol. 61, no.1/2, pp. 55–66.

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**
RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-318-328>
УДК 621.37Оригинальная статья**А. В. Гусинский, И. И. Забеньков*, М. С. Свирид, Д. А. Кондрашов, С. С. Солонович***Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, б. 220013, Минск, Республика Беларусь***РАДИОВЫСОТОМЕРЫ С ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ
ЗОНДИРУЮЩЕГО СИГНАЛА**

Аннотация. Представлены математические модели излучаемого, отраженного и разностного радиосигналов, используемых в радиовысотомерах, во временной и частотной областях на основе аналитического метода Габора в квадратурной форме. Рассмотрены симметричный и несимметричный виды линейных частотно-модулированных радиосигналов и ограничения, используемые при их аналитическом применении, а также сигналов, использующих синусоидальный вид модулирующего напряжения. Приведены временной, частотный, корреляционный и счета нулей способы построения. Каждому из методов соответствует одноименный принцип построения. Даны подробные структуры радиовысотомеров, рассмотрены их достоинства и недостатки, а также приведены рекомендации по их использованию.

Ключевые слова: устройства ближней радиолокации, радиовысотомеры, модели разностного сигнала, методы построения радиовысотомеров

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Гусинский Александр Владимирович* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных измерительных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. E-mail: avggus@mail.ru; *Забеньков Игорь Иванович* – доктор технических наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. E-mail: zabenkov@bsuir.by; *Свирид Максим Сергеевич* – заместитель директора Научно-инновационного центра 1.9 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. E-mail: maxim_sv@tut.by; *Кондрашов Денис Александрович* – директор Научно-инновационного центра 1.9 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. E-mail: denis_kondrashov@yahoo.co.uk; *Солонович Сергей Сергеевич* – магистр, научный сотрудник Научно-инновационного центра 1.9 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. E-mail: solonovichse@gmail.com

Вклад авторов: *Гусинский Александр Владимирович* – постановка задач, обсуждение результатов, выводы; *Забеньков Игорь Иванович* – решение аналитических задач, разработка корреляционного метода, написание текста статьи; *Свирид Максим Сергеевич* – разработка моделей симметричного и несимметричного сигналов; *Кондрашов Денис Александрович* – синтез структур радиовысотомеров временного метода; *Солонович Сергей Сергеевич* – синтез структур радиовысотомеров частотного метода, подготовка иллюстративного материала.

Для цитирования: Радиовысотомеры с частотной модуляцией зондирующего сигнала / А. В. Гусинский [др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 4. – С. 318–328. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-318-328>

Поступила в редакцию: 25.10.2024

Утверждена к публикации: 16.12.2024

Подписана в печать: 23.12.2024

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Original article

**Aleksandr V. Gusinskiy, Igor I. Zabenkov*, Maxim S. Svirid,
Denis A. Kondrashov, Sergey S. Solonovich**

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus*

RADIOALTIMETERS WITH FREQUENCY MODULATION OF THE PROBING SIGNAL

Abstract. Mathematical models of radiated, reflected and differential radio signals used in radio altimeters in the time and frequency domains based on the analytical Gabor method in quadrature form are presented. Symmetric and asymmetric types of linear frequency-modulated radio signals and limitations used in their analytical application, as well as signals using a sinusoidal type of modulating voltage, are considered. The time, frequency, correlation and zero counting methods of construction are given. Each of the methods corresponds to the same principle of construction. Detailed structures of radio altimeters are given, their advantages and disadvantages are considered, and recommendations for their use are given.

Keywords: short-range radar devices, radio altimeters, difference signal models, methods for constructing radio altimeters

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Information about the authors: *Aleksandr V. Gusinskiy* – Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Information Measuring Systems at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. E-mail: avgus@mail.ru; *Igor I. Zabenkov* – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. E-mail: zabenkov@bsuir.by; *Maxim S. Svirid* – Deputy Director of the Scientific and Innovation Center 1.9 at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. E-mail: maxim_sv@tut.by; *Denis A. Kondrashov* – Director of the Scientific and Innovation Center 1.9 at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. E-mail: denis_kondrashov@yahoo.co.uk; *Sergey S. Solonovich* – Master of Science, Researcher of the Scientific and Innovation Center 1.9 at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. E-mail: solonovichse@gmail.com

Contribution of the authors: *Aleksandr V. Gusinskiy* – setting tasks, discussing results, conclusions; *Igor I. Zabenkov* – solving analytical problems, developing a correlation method, writing the text of the article; *Maxim S. Svirid* – development of models of symmetrical and asymmetrical signals; *Denis A. Kondrashov* – synthesis of structures of radio altimeters of the time method; *Sergey S. Solonovich* – synthesis of structures of radio altimeters of the frequency method, preparation of illustrative material.

For citation: Gusinskiy A. V., Zabenkov I. I., Svirid M. S., Kondrashov D. A., Solonovich S. S. Radioaltimeters with frequency modulation of the probing signal. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 4, pp. 318–328 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-318-328>

Received: 25.10.2024

Approved for publication: 16.12.2024

Signed to the press: 23.12.2024

Введение. Наряду с непрерывным увеличением дальности действия радиолокационных устройств определилась тенденция внедрения радиолокационных принципов в области, требующей решение задач при малых расстояниях. Специфические требования в особенности технических решений в этой области привели к формированию научного и технического направления систем ближней радиолокации. Характерной особенностью систем ближней радиолокации является соизмеримость дальности действия с геометрическими размерами взаимодействующих объектов и с ошибками выдачи результатов измерений. Измерение высоты полета объектов – неотъемлемая часть информационной составляющей систем обслуживания летательных аппаратов и авиационных устройств. Наиболее часто встречающимся методом радиовысотометрии является радиолокационный на основе применения радиосигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) [1–3]. Интерес к данной теме исследования заметен в публикациях последних лет [4–7].

Определим ограничения, в рамках которых будем рассматривать аналитические выводы и рекомендации в данной статье:

а) анализ проводится для непрерывных сигналов с линейной частотной модуляцией пилообразным или симметричным треугольным напряжением;

б) анализ проводится для объектов, работающих в СВЧ-области радиочастот и ограниченной скорости их движения, где можно пренебречь эффектом Доплера и при этом приращение частоты отраженного сигнала за счет эффекта Доплера не превышает величину нестабильности опорного генератора передатчика;

Отличительной особенностью типовой структуры радиовысотомера с ЛЧМ (рис. 1) является совмещение функций генератора передатчика и гетеродина приемника, в результате чего система становится когерентной. При преобразовании напряжений излучаемого передающей антенной сигнала и принятого приемной антенной отраженного сигнала в смесителе приемника после обработки фильтром выделяется напряжение разностной частоты: $F_{\text{раз}} = f_{\text{изл}} - f_{\text{отр}}$.

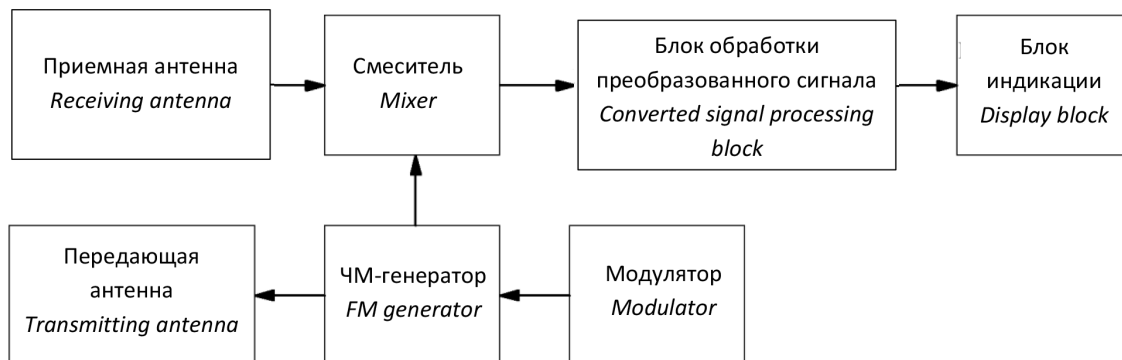


Рис. 1. Типовая структурная схема радиовысотомера

Fig. 1. Typical structural diagram of a radio altimeter

Рассмотрим технические характеристики ЛЧМ-сигналов. На рис. 2 показаны сигналы с несимметричной (рис. 2, а) и симметричной (рис. 2, б) треугольными модуляциями (далее симметричный и несимметричный сигналы).

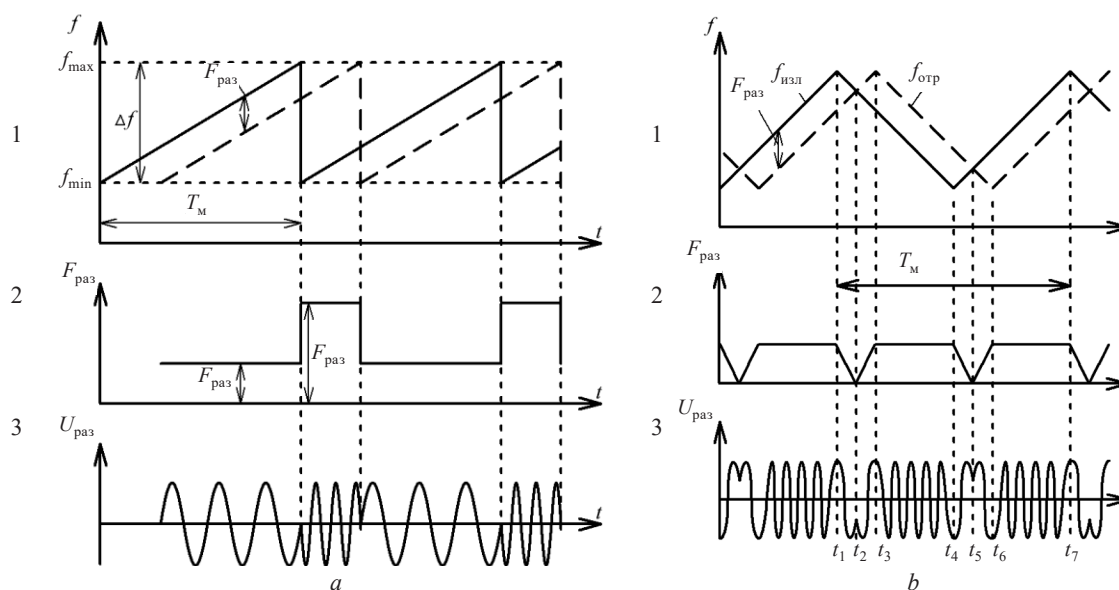


Рис. 2. Непрерывные ЛЧМ-сигналы с несимметричной (а) и симметричной (б) треугольными модуляциями;

$$1 - f_{\text{изл}}(t), f_{\text{отр}}(t); 2 - F_{\text{раз}}(t); 3 - U_{\text{раз}}(t)$$

Fig. 2. Continuous chirp signals with asymmetric (a) and symmetrical (b) triangular modulations;

$$1 - f_{\text{изл}}(t), f_{\text{отр}}(t); 2 - F_{\text{раз}}(t); 3 - U_{\text{раз}}(t)$$

Аналитика частотно-модулированных сигналов. Под аналитикой ЧМ понимаем представление частотно-модулированных сигналов с различными законами модуляции моделями во временной и частотной областях с использованием метода аналитического сигнала по Габору [8]. Для ЛЧМ линейный закон модуляции частоты $\omega = at$ определяет фазу сигнала интегральным ее преобразованием: $\omega = \int_{-\infty}^{\infty} at \cdot dt + C = at^2 / 2 + \omega_0$. В этом случае аналитическая модель излучаемого сигнала с ЛЧМ во временной области может быть представлена в показательной форме:

– при несимметричной модуляции в пределах $t = nT_M$, $n = 1, 2, 3, \dots$ и симметричной в пределах $t = n(0 - T_M/2)$, $n = 1, 2, 3, \dots$:

$$U_{\text{изл}}(t) = A_{\text{изл}}(t)e^{j[\omega_{\text{изл}} \cdot t + at^2/2 + \varphi_0]}, \quad (1)$$

– для симметричной ЛЧМ в пределах $t = n(T_M/2 - T_M)$:

$$U_{\text{изл}}(t) = A_{\text{изл}}(t)e^{j[\omega_{\text{изл}} \cdot t - at^2/2 + \varphi_0]}. \quad (2)$$

Модели (1) и (2) излучаемого сигнала в квадратурной форме можно представить, используя оператор Гильберта. Применим преобразование Эйлера $e^{ix} = \cos x + j\sin x$ и запишем:

$$U_{\text{изл}}(t) = A_{\text{изл}}(t)[\cos(\omega_{\text{изл}} \cdot t + at^2/2 + \varphi_0) + j\sin(\omega_{\text{изл}} \cdot t + at^2/2 + \varphi_0)];$$

$$U_{\text{изл}}(t) = A_{\text{изл}}(t)[\cos(\omega_{\text{изл}} \cdot t + at^2/2 + \varphi_0) + j\sin(\omega_{\text{изл}} \cdot t - at^2/2 + \varphi_0)];$$

$$U_{\text{изл}}(t) = A_{\text{изл}}(t)[\cos(\omega_{\text{изл}} \cdot t - at^2/2 + \varphi_0) + j\sin(\omega_{\text{изл}} \cdot t - at^2/2 + \varphi_0)].$$

Далее по аналогии с (1) и (2) модель отраженного сигнала запишется в виде:

– для несимметричной модуляции в пределах $t = nT_M$, $n = 1, 2, 3, \dots$ и симметричной в пределах $t = n(0 - T_M/2)$, $n = 1, 2, 3, \dots$:

$$U_{\text{отр}}(t) = B_{\text{отр}}(t)e^{j[\omega_{\text{отр}} \cdot t + at^2/2 + \varphi_0]}, \quad (3)$$

– для симметричной ЛЧМ в пределах $n(T_M/2 - T_M)$:

$$U_{\text{отр}}(t) = B_{\text{отр}}(t)e^{j[\omega_{\text{отр}} \cdot t - at^2/2 + \varphi_0]}. \quad (4)$$

Модели (3) и (4) излучаемого сигнала в квадратурной форме:

$$U_{\text{отр}}(t) = B_{\text{отр}}(t)[\cos(\omega_{\text{отр}} \cdot t + at^2/2 + \varphi_0) + j\sin(\omega_{\text{отр}} \cdot t + at^2/2 + \varphi_0)];$$

$$U_{\text{отр}}(t) = B_{\text{отр}}(t)[\cos(\omega_{\text{отр}} \cdot t - at^2/2 + \varphi_0) + j\sin(\omega_{\text{отр}} \cdot t - at^2/2 + \varphi_0)].$$

Для упрощения записи опустим далее φ_0 .

Рассмотрим дальнейшие преобразования отраженного сигнала. В структуре рис. 1 смеситель использует принцип перемножения двух сигналов – излучаемого и отраженного. Для этого он должен иметь квадратичную передаточную функцию вида

$$U_{\text{вых}}(t) = kU_{\text{вх}}^2(t). \quad (5)$$

Тогда выходной сигнал смесителя можно записать в виде:

$$U_{\text{вых}}(t) = k[U_{\text{изл}}(t) + U_{\text{отр}}(t)]^2.$$

После несложных преобразований выделим напряжение разностного (преобразованного) сигнала $U_{\text{раз}}(t)$, являющееся одной из основных информационных характеристик для радиовысо-томера:

– для симметричной модуляции в пределах $t = n(t_1 - t_2)$ и $n(t_4 - t_5)$, $n = 1, 2, 3, \dots$ (см. рис. 2, *b*, 2):

$$U_{\text{раз}}(t) = 2k \cdot A(t) \cdot B(t)e^{j[\Omega_{\text{раз}}t - b(nt)^2/2]}; \quad (6)$$

– для симметричной модуляции в пределах $t = n(t_2 - t_3)$ и $n(t_5 - t_6)$, $n = 1, 2, 3, \dots$ (см. рис. 2, *b*, 2):

$$U_{\text{раз}}(t) = 2k \cdot A(t) \cdot B(t) e^{j[b(n)^2/2 + \pi]}; \quad (7)$$

– для симметричной модуляции в пределах $t = n(t_3 - t_4)$ и $n(t_6 - t_7)$, $n = 1, 2, 3, \dots$ (см. рис. 2, *b*, 2):

$$U_{\text{раз}}(t) = 2k \cdot A(t) \cdot B(t) e^{j(\Omega_{\text{раз}} t)}. \quad (8)$$

Заметим, что напряжение разностной частоты выделяется на выходе смесителя с помощью фильтра нижних частот, частота среза которого определяется максимальным значением частоты разностного сигнала.

В частотной области модели излучаемого, отраженного и разностного сигналов можно записать в виде преобразований Фурье уравнений (6)–(8):

$$S_{\text{изл}}(j\omega) = \int_0^\infty A_{\text{изл}}(t) e^{j\left[\omega_{\text{изл}} t - \frac{at^2}{2} + \varphi_0\right]} \cdot e^{-j\omega} \cdot d\omega; \quad (9)$$

$$S_{\text{отр}}(j\omega) = \int_0^\infty B_{\text{отр}}(t) e^{j\left[\omega_{\text{отр}}(t-\tau) - \frac{a(t-\tau)^2}{2} + \varphi_0\right]} \cdot e^{-j\omega} \cdot d\omega; \quad (10)$$

$$S_{\text{раз}}(j\Omega) = \int_0^T k \cdot A(t) \cdot B(t) e^{ja \cdot n^2/2} \cdot d\Omega. \quad (11)$$

Представляет интерес применение частотно модулированного колебания с синусоидальным законом модуляции для измерения (фиксации) высоты, рассмотренное в [1]. При синусоидальной модуляции спектр разностного сигнала имеет дискретный характер, пропорциональный частоте модуляции. При этом соотношение амплитуд гармоник в спектре зависит от высоты объекта, а максимумы их амплитуд появляются на различных высотах. Однако при рассматриваемой синусоидальной модуляции зависимость каждой из гармоник от высоты не резкая. Поэтому для снижения погрешности измерений высоты закон модуляции должен быть более сложным, например пилообразным (см. рис. 2, *a*).

Наличие у колебания разностной частоты при треугольной модуляции двух участков с разными частотами приводит к тому, что его спектр имеет дискретный характер, его компоненты кратны частоте модулирующего сигнала. Спектр высокочастотного модулированного сигнала имеет сложный характер [9, 10] и практически его можно считать сплошным. В зависимости от высоты в его составе выделяется та компонента, которая наиболее близка к разностной частоте F_p (см. рис. 2, *a*). Путем подбора закона модуляции и расчета его параметров можно обеспечить подчеркивание одной гармоники частоты модуляции при исчезающе малых величинах остальных.

Структуры радиовысотомеров. Во всех рассматриваемых структурах радиовысотомеров их высокочастотная часть, включающая приемную и передающую антенны, ЧМ-генератор и смеситель, является неизменной основой. Поэтому методы построения радиовысотомеров основываются на методах построения модуляторов, блоков обработки разностного сигнала и индикации (см. рис. 1).

Перечислим эти методы: частотный (спектральный), временной, корреляционный, метод счета переходов через нуль. Каждому из методов соответствует одноименный принцип построения.

Частотный метод построения является классическим и основан на фильтровом способе выделения из спектра разностного сигнала заданной его гармоники. При синусоидальном законе модуляции максимум первой гармоники имеет место при $h = \sim 0,17/T_M$; второй – при $h = \sim 0,26/T_M$;

третьей – $h = \sim 0,34/T_M$ и т. д. [1]. Это дает возможность, измеряя и сравнивая амплитуды гармоник, измерять или фиксировать измеренную высоту объекта. Структура такого радиовысотомера показана на рис. 3.

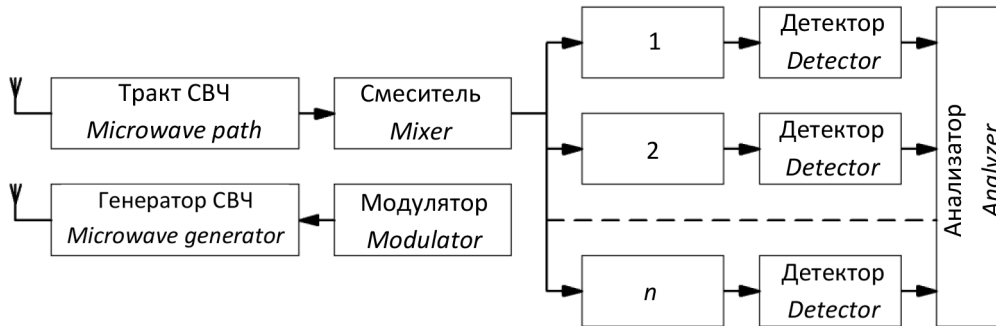


Рис. 3. Структурная схема радиовысотомера с частотным методом построения

Fig. 3. Structural diagram of a radio altimeter with a frequency method of construction

В рассматриваемой структуре предполагается параллельный метод обработки. Увеличение числа гармоник в спектре разностного сигнала требует увеличение числа каналов либо увеличивает потери мощности полезного сигнала. При этом индекс частотной модуляции должен быть выбран таким, чтобы число гармоник разностного сигнала L соответствовало числу фильтровых каналов обработки. В таблице [11] представлена зависимость L от Ψ_M .

L	2	4	5	6	7	9	Примечание
Ψ_M	1	2	3	4	5	6	$\Psi_M = \Delta f/F_{M \max}$

Если задаться количеством гармоник L в спектре F_p , то из таблицы можно определить индекс модуляции Ψ_M , который может быть рассчитан путем вариации отношением девиации частоты излучаемого сигнала к частоте синусоидальной модуляции.

Как было показано выше, при пилообразном законе модуляции возможно использование только одного канала обработки по структуре (см. рис. 3) при наличии полосового фильтра разностной частоты F_p . В [11, с. 233–234] приводится структура такого радиовысотомера, в котором устройство состоит из последовательно соединенных звукового генератора, частотного модулятора, генератора радиочастоты и передающей антенны, а также последовательно соединенных приемной антенны, балансного смесителя, усилителя низкой частоты и измерителя частоты, причем второй вход балансного смесителя соединен с выходом генератора радиочастоты.

Работа радиодальномера основана на использовании непрерывных ЛЧМ зондирующих сигналов и гомодинной обработке отраженных от радиолокационных объектов сигналов. При этом процесс излучения и приема отраженного сигнала совмещен во времени и информация о дальности до отражающего объекта содержится в спектре сигнала биений. Этот сигнал формируется как разность «мгновенных» частот излученного и отраженного от объекта сигналов. Измерителем частоты в радиодальномере является частотный детектор. Амплитуда напряжения на выходе частотного детектора после фильтра низких частот (ФНЧ) линейно связана с измеряемой высотой. Аналитическое уравнение связи измеряемой высоты и параметров ЛЧМ-сигнала имеет вид:

$$H = F_{\text{раз}} \cdot T_M \cdot c/\Delta f. \quad (12)$$

Временной метод построения радиовысотомеров применим для радиосигналов с симметричным ЛЧМ-сигналом и основан на измерении временного интервала задержки отраженного сигнала относительно излучаемого в данный момент времени. Этот интервал времени соответствует разности $\Delta t_1 = t_2 - t_1 = t_3 - t_2$, как показано на рис. 2. Измеряемая высота находится из уравнения $H = \Delta t_1 \cdot c$ (м).

Другим вариантом временного метода измерения высоты является отсчет интервала времени $\Delta t_2 = t_4 - t_3$. Тогда искомая величина высоты находится из уравнения

$$H = (T_M - \Delta t_2) \cdot c \text{ (м)}.$$

В рассматриваемых случаях изменяется структура блока обработки, так как появляется необходимость четкого определения границ отсчетных временных интервалов. В этом случае используем дифференциальный способ определения интервалов. Он состоит из введения в блок обработки дифференциатора, как показано на рис. 4, а.

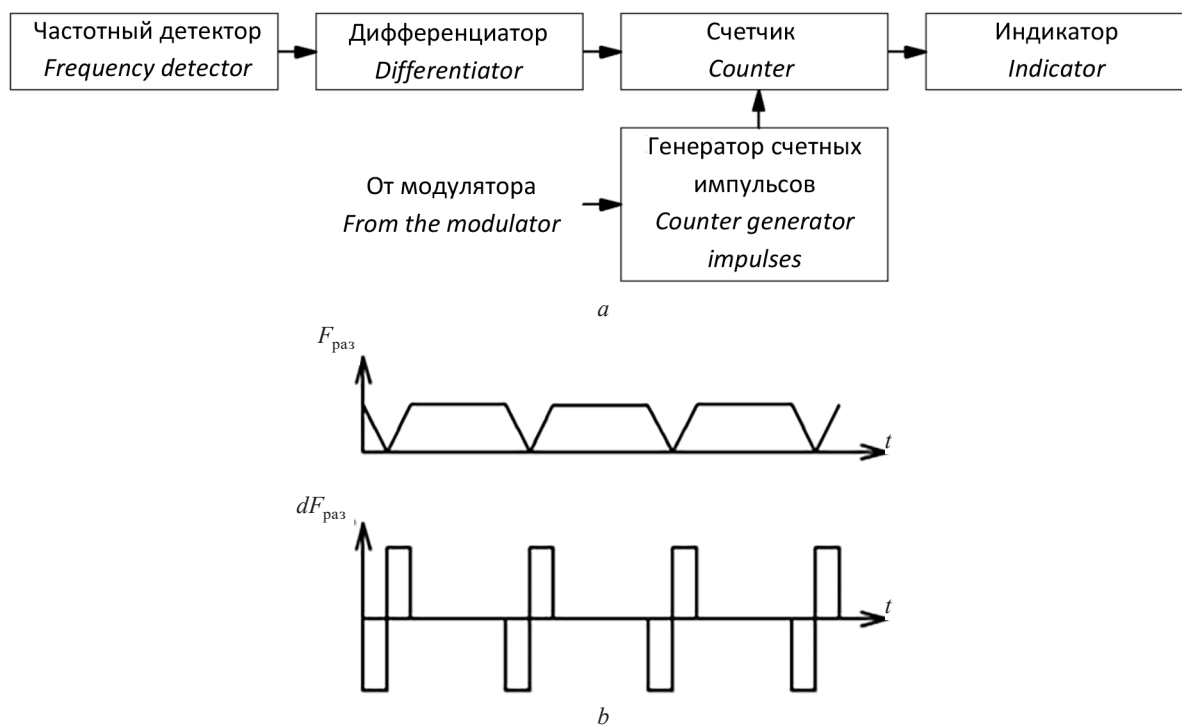


Рис. 4. Блок обработки разностного сигнала при временном методе измерений:
а – структура блока; б – осциллограммы $F_{\text{раз}}$ и $dF_{\text{раз}}$

Fig. 4. Block for processing the difference signal with the time measurement method:
а – block structure; б – oscillograms of $F_{\text{раз}}$ and $dF_{\text{раз}}$

Основной сущностью определения заданной высоты полета объекта над поверхностью является свойство однозначности соответствия любой высоты полета временной форме (осциллограмме) разностного сигнала. В типовой структуре радиовысотомера блок обработки преобразованного сигнала выполняется в соответствии со структурой, показанной на рис. 4, а. Разностный сигнал проходит частотный детектор, после которого приобретает вид, показанный на рис. 4, б. Далее этот сигнал подвергается дифференцированию. После дифференциатора формируется импульсный сигнал (см. рис. 4, б). Длительность первого импульса соответствует разности $\Delta t_1 = t_2 - t_1$. Передний фронт импульса запускает счетчик коротких импульсов, поступающих от синхронизированного с модулятором генератора счетных импульсов. Задний фронт импульса прекращает счет, а число отсчитанных импульсов счета пропорционально времени $\tau/2$, что позволяет определить высоту объекта над поверхностью.

Корреляционный метод основан на указанном в [1] свойстве когерентности излучаемого и отраженного ЛЧМ-радиосигналов. При этом производится корреляционная обработка отраженного ЛЧМ-сигнала с неизвестным временем запаздывания (τ) с известным сигналом для определения степени их схожести. Получаемая функция имеет аргументом относительное расстояние между сигналами на оси времени, а ее математическое выражение – различный вид для случаев аналоговой и цифровой обработки сигналов.

Для аналоговых сигналаў эта функцыя прадстаўляе сабой неперывную сумму (інтэграл) произведенияў супадаючых (перакрываючых друг друга) частей двух сигналаў:

$$K(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} U_{\text{изл}}(t) \cdot U_{\text{отр}}(t - \tau) \cdot dt.$$

Для дыскрэтных ці цифровых сигналаў – это сумма произведенияў супадаючых (перакрываючых друг друга) субимпульсов:

$$K(m\tau) = \sum_{m=0}^{m=\infty} \{ [U_{\text{изл}}(nt) \cdot U_{\text{отр}}[(n-m)t]] \}.$$

Корреляцыйны метад измерения ці фіксацыі вышыты прадусматривает два спосаба нахождения корреляцыйнага інтэграла. Первый спосаб основан на перемножении отраженного СВЧ-радиосигнала, принятого приемной антенной, и излучаемого СВЧ-радиосигнала, задержанного на время τ . Как показано на рис. 5, а, в типовую структуру радиовысотомера вводится блок регулируемой задержки, а в качестве перемножителя используется смесительный каскад. Время задержки позволяет рассчитать измеряемую высоту $H = \tau/2 \cdot c$ (м).

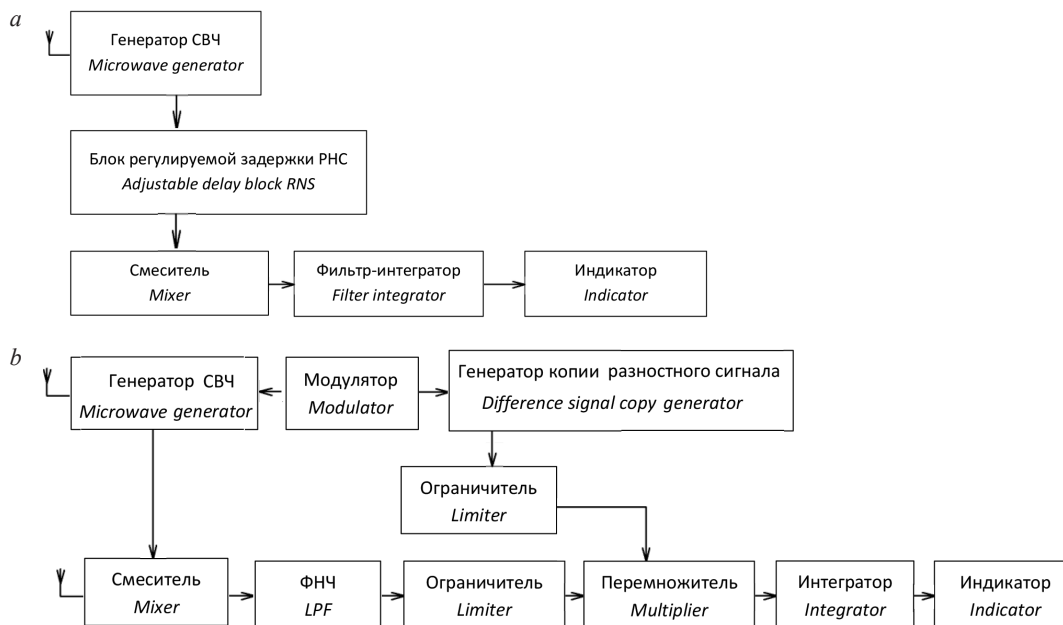


Рис. 5. Структура корреляционного радиовысотомера: а – структура коррелятора радиосигнала; б – структура коррелятора разностного сигнала

Fig. 5. Structure of the correlation radio altimeter: а – structure of the radio signal correlator; б – structure of the difference signal correlator

Функцию интегратора выполняет фильтр нижних частот. Перестраивая блок задержки, можно добиться максимального показания корреляционного индикатора. При этом отсчет соответствующего показания времени задержки позволяет рассчитать измеряемую высоту $H = \tau/2 \cdot c$ (м).

Второй способ предполагает нахождение корреляционного интеграла на разностной частоте, как показано на рис. 5, б. Для этого в известную структуру блока обработки вводится генератор копии разностного сигнала, напряжение с которого после ограничения подается на перемножитель. На второй вход перемножителя поступает разностный сигнал. Последующие блоки интегратора и индикатора выделяют и фиксируют максимальное значение корреляционного интеграла, а показания времени задержки прямо пропорциональны измеряемой высоте.

Метод счета переходов через нуль использует однозначную связь переходов через нулевое значение амплитуды разностного сигнала с величиной измеряемой высоты. Так, авторы патента РФ

№ 2313107 «Частотный радиовысотомер»¹ (В. А. Заренков, Д. В. Заренков, В. И. Дикарев, Б. В. Койнаш) приводят структуру измерителя малых расстояний, в которой используется шумовой сигнал для дополнительной модуляции ЛЧМ-радиосигнала. По мнению авторов патента, вводимая так называемая антикорреляционная обработка позволяет обострить корреляционную характеристику.

Достижимым техническим результатом изобретения является повышение точности и чувствительности частотного радиовысотомера при измерении малых высот. Частотный радиовысотомер (рис. 6) содержит генератор шумового сигнала, RC-фильтр, модулятор, частотно-модулированный генератор, передающую антенну, приемную антенну, смеситель, усилитель разностной частоты, ограничитель, счетный каскад, обеспечивающий выходное напряжение, пропорциональное средней частоте пересечений разностным напряжением нулевого уровня, усилитель постоянного тока и индикатор высоты. Следует заметить, что зависимость высоты от числа переходов через нуль неравномерная, что позволяет использовать данный метод только для фиксации заданной высоты полета.

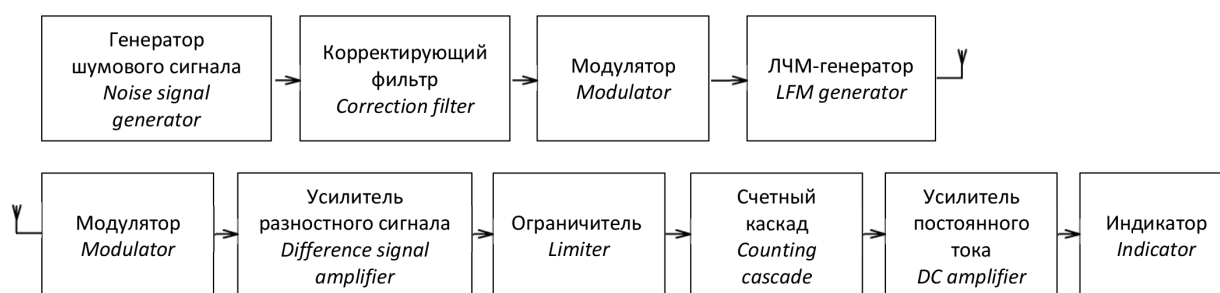


Рис. 6. Структура радиовысотомера с шумовым модулирующим сигналом

Fig. 6. Structure of a radio altimeter with a noise modulating signal

Дополнительным преимуществом использования шумовой модуляции является возможность идентификации конкретного устройства среди множества подобных, находящихся в ограниченном пространстве.

Заключение. Благодаря простоте своей технической реализации наибольшее применение в технике радиовысотометрии находит частотный метод измерения высоты. С целью повышения точности измерений или фиксации высоты рекомендуется использовать варианты временного метода и метода счета нулей. В случае необходимости работы большого количества радиовысотометров в ограниченном пространстве авторами предлагается использовать корреляционные методы с дополнительной шумовой компонентой модулирующего сигнала.

Принятые в статье обозначения / The designations accepted in the article

- $F_{\text{раз}}$ – разностная частота, Гц / difference frequency, Hz;
 $\Omega_{\text{раз}} = 2\pi F_{\text{раз}}$ – круговая разностная частота, рад / circular difference frequency, rad;
 $f_{\text{изл}}, f_{\text{отр}}$ – соответственно излучаемая и отраженная частоты, Гц / respectively the emitted and reflected frequencies, Hz;
 $\omega_{\text{изл}} = 2\pi f_{\text{изл}}, \omega_{\text{отр}} = 2\pi f_{\text{отр}}$ – соответственно круговые излучаемая и отраженная частоты, Гц / respectively the emitted and reflected frequencies, Hz;
 $T_{\text{м}}, F_{\text{м}}$ и $\Omega_{\text{м}} = 2\pi F_{\text{м}}$ – соответственно период (с), частота (Гц) и круговая частота (рад) модулирующего колебания / respectively, the period (s), frequency (Hz) and circular frequency (rad) of the modulating oscillation;
 τ – время задержки при прохождении излучаемого сигнала до объекта и обратно, с, $\tau = 2H/c$ (H – измеряемая высота, м; c – скорость света), $\tau \leq \tau = 2H/c$ – для несимметричной модуляции и $\tau \leq T_{\text{м}}/2$ – для симметричной модуляции / delay time for the transmitted signal to reach the object and back, s, $\tau = 2H/c$ (H is the measured height, m; c is the speed of light), $\tau \leq \tau = 2H/c$ – for asymmetric modulation and $\tau \leq T_{\text{м}}/2$ – for symmetric modulation;
 $\omega_{\text{max}}, \omega_{\text{min}}$ – соответственно максимальная и минимальная круговые частоты излучения (отражения), рад;
 $\omega_{\text{max}} = 2\pi f_{\text{max}}, \omega_{\text{min}} = 2\pi f_{\text{min}}$ / respectively, the maximum and minimum circular frequencies of radiation (reflection), rad;
 $\omega_{\text{max}} = 2\pi f_{\text{max}}, \omega_{\text{min}} = 2\pi f_{\text{min}}$;

¹ Частотный радиовысотомер: пат. № 2313107 Рос. Федерация. Заявл. 07.04.2006; опубл. 20.12.2007.

$a = (\omega_{\max} - \omega_{\min})/T_M = \Delta\omega/T_M$ – крутизна модуляцыі для несимметричнага сігналу, рад/с / the steepness of the modulation for an unbalanced signal, rad/s;

$a = (\omega_{\max} - \omega_{\min})/2T_M = \Delta\omega/T_M$ – крутизна модуляцыі для симметричнага сігналу, рад/с / the steepness of the modulation for a symmetric signal, rad/s;

$b = 2 F_{\text{раз}}/\tau$ – крутизна наклону функцыі разностной частоты, рад/с / slope of the difference frequency function, rad/s;

$\Delta\omega = 2\pi \Delta f$ – дэвіяцыя частоты, Гц / frequency deviation, Hz;

L – количество гармоник в спектре / number of harmonics in the spectrum;

ψ_m – индекс частотной модуляции / frequency modulation index;

$K(\tau)$ – коэффициент корреляции / correlation coefficient;

k – коэффициент преобразования / conversion coefficient;

$U_{\text{вых}}$ и $U_{\text{вх}}$ – функция и аргумент в уравнениях передачи / function and argument in transmission equations;

$m\tau$ – временная задержка, с / time delay, s.

Список использованных источников

1. Коган, И. М. Ближняя радиолокация: теоретические основы / И. М. Коган. – М.: Совет. радио, 1973. – 272 с.
2. Комаров, И. В. Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно-модулированных колебаний / И. В. Комаров, С. М. Смольский. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 360 с.
3. Купряшкин, И. Ф. Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением / И. Ф. Купряшкин, В. П. Лихачев, Л. Б. Рязанцев. – М.: Радиотехника, 2020. – 288 с.
4. Лихачев, В. П. Ближняя радиотехническая навигация беспилотных летательных аппаратов малого класса с использованием широкополосных линейно-частотно-модулированных сигналов / В. П. Лихачев, А. В. Нагалин, А. А. Павлюк // Радиотехника. – 2022. – Т. 86, № 2. – С. 109–118. <https://doi.org/10.18127/j00338486-202202-13>
5. Соколик, Н. В. Определение скорости движения и дальности быстро движущихся объектов в РЛС с непрерывным линейно-частотно-модулированным излучением с использованием автокорреляционной схемы / Н. В. Соколик // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 63–72. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-2-63-72>
6. Barbarossa, S. Analysis of Multicomponent LFM signals by a Combined Wigner-Hough Transform / S. Barbarossa // IEEE Trans. Signal Process. – 1995. – Vol. 43, Iss. 6. – P. 1511–1515. <https://doi.org/10.1109/78.388866>
7. Multicomponent LFM signal detection and parameters estimation based on Radon-ambiguity transform / A.-F. Liu [et al.] // J. Nanjing Univ. Sci. Technol. – 2004. – Vol. 28, Iss. 4. – P. 409–413.
8. Gabor, D. Theory of Communication / D. Gabor // J. Inst. Electric. Eng. Part III: Radio and Communication. – 1946. – Vol. 93, № 26. – P. 429–457. <https://doi.org/10.1049/ji-3-2.1946.0076>
9. Курулев, А. П. Преобразование спектров сигналов в электрорадиосетях / А. П. Курулев. – Минск: БГУИР, 2017. – 176 с.
10. Новаковский, С. В., Техника частотной модуляции в радиовещании / С. В. Новаковский, Г. П. Самойлов. – М.: Л.: Госэнергоиздат, 1952. – 304 с.
11. Бакулев, П. А. Радиолокационные системы / П. А. Бакулев. – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.

References

1. Kogan I. M. *Short-Range Radar: Theoretical Foundations*. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1973. 272 p. (in Russian).
2. Komarov I. V., Smol'skii S. M. *Fundamentals of the Theory of Radar Systems with Continuous Emission of Frequency-Modulated Oscillations*. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2010. 360 p. (in Russian).
3. Kupryashkin I. F., Likhachev V. P., Ryazantsev L. B. *Small-Sized Multifunctional Radars with Continuous Frequency-Modulated Radiation*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2020. 288 p. (in Russian).
4. Likhachev V. P., Nagalin A. V., Pavlyuk A. A. Short-range radio-technical navigation of small-class unmanned aerial vehicles using broadband linear frequency-modulated signals. *Journal Radioengineering*, 2022, vol. 86, no. 2, pp. 109–118. <https://doi.org/10.18127/j00338486-202202-13>
5. Sokolik N. V. Determination of Fast-Moving Objects' Speed and Range with Linear Frequency Modulation Continuous Wave Radar Using Autocorrelation Scheme. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2020, vol. 23, no. 2, pp. 63–72 (in Russian). <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-2-63-72>
6. Barbarossa S. Analysis of Multicomponent LFM signals by a Combined Wigner-Hough Transform. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1995, vol. 43, iss. 6, pp. 1511–1515. <https://doi.org/10.1109/78.388866>
7. Liu A.-F., Zhu X.-H., Lu J.-H., Liu Z. Multicomponent LFM signal detection and parameters estimation based on Radon-ambiguity transform. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2004, vol. 28, iss. 4, pp. 409–413.

8. Gabor D. Theory of communication. *Journal of the Institution of Electrical Engineers. Part III: Radio and Communication*, 1946, vol. 93, no. 26, pp. 429–457. <https://doi.org/10.1049/ji-3-2.1946.0076>
9. Kurulev A. P. *Conversion of Signal Spectra in Electric Radio Circuits*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2017. 176 p. (in Russian).
10. Novakovskii S. V., Samoilov G. P. *Frequency Modulation Technique in Radio Broadcasting*. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1952. 304 p. (in Russian).
11. Bakulev P. A. *Radar Systems*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004. 320 p. (in Russian).

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-329-339>
УДК 621.382.232.087.6:004.925.83(045)



Оригинальная статья

Н. Л. Лагунович

*Филиал «Научно-технический центр “Белмикросистемы” Открытого акционерного общества “ИНТЕГРАЛ” – управляющая компания холдинга “ИНТЕГРАЛ”»,
ул. Корженевского, 12, 220108, Минск, Республика Беларусь*

ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ $p-n^+$ -ПЕРЕХОДА В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ И ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СИСТЕМАХ КООРДИНАТ

Аннотация. Выполнено приборно-технологическое моделирование кремниевого $p-n^+$ -перехода как в прямоугольной (декартовой), так и в цилиндрической системах координат. В данной полупроводниковой структуре p -область является базой, а n^+ -область выполняет функцию эмиттера в биполярном транзисторе $n-p-n$ -типа. Структура исследованного перехода получена в соответствии с технологическим процессом его изготовления, разработанным с помощью двухмерного моделирования с применением программы *TSuprem4*, входящей в состав программного комплекса фирмы *Synopsys*. Технологическое моделирование позволило определить конструктивно-технологические параметры исследуемой структуры $p-n^+$ -перехода, что дало возможность провести ее приборное проектирование в цилиндрической и в декартовой системах координат с применением программы *Medici*, которая также входит в состав комплекса программ фирмы *Synopsys*. С помощью *Medici* рассчитаны прямые и обратные ветви вольт-амперной характеристики $p-n^+$ -перехода для случаев моделирования в указанных типах систем координат и, соответственно, определен ряд электрофизических параметров структуры перехода. Путем сравнения данных, полученных методом приборно-технологического моделирования, установлено, что рассматриваемая структура может рассчитываться в обоих типах систем координат с высокой степенью точности, так как разброс конструктивно-технологических параметров, определенных при технологическом моделировании для разных систем координат, составил 2,6–7,4 %, а разброс электрофизических параметров, вычисленных в процессе приборного моделирования, – 0,09–8,64 %. Результаты исследования были применены при проектировании новых изделий электронной техники, в основе которых лежит один и более $p-n$ -переходов, при разработке и оптимизации технологических маршрутов их изготовления.

Ключевые слова: $p-n$ -переход, приборно-технологическое моделирование, система координат, технологический процесс, конструктивно-технологический параметр, электрофизический параметр, вольт-амперная характеристика

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторе: Лагунович Наталья Леонидовна – кандидат технических наук, ведущий инженер Филиала «Научно-технический центр “Белмикросистемы” Открытого акционерного общества “ИНТЕГРАЛ” – управляющая компания холдинга “ИНТЕГРАЛ”». <https://orcid.org/0009-0007-9370-8006>. E-mail: n_dudarby@tut.by

Для цитирования: Лагунович, Н. Л. Приборно-технологическое моделирование $p-n^+$ -перехода в прямоугольной и цилиндрической системах координат / Н. Л. Лагунович // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 4. – С. 329–339. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-329-339>

Поступила в редакцию: 27.02.2024

Доработанный вариант: 26.11.2024

Утверждена к публикации: 16.12.2024

Подписана в печать: 23.12.2024

Original article

Nataliya L. Lagunovich

*Affiliate Research & Design Center “Belmicrosystems” of Openly Joint-Stock Company “INTEGRAL” – “INTEGRAL”
Holding Managing Company, 12, Korzhenevskii Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus*

THE DEVICE-PROCESS SIMULATION OF $p-n^+$ JUNCTION IN RECTANGULAR AND CYLINDRICAL COORDINATE SYSTEMS

Abstract. The silicon $p-n^+$ junction device-process modeling in both rectangular (Cartesian) and cylindrical coordinate systems was executed. In this semiconductor structure the p -region is the base and the n^+ -region performs the function of an

emitter in an $n-p-n$ -type bipolar transistor. The structure of the $p-n^+$ junction explored in this work was obtained in accordance with the manufacturing process by two-dimensional modeling using the *TSuprem4* program, which is part of the *Synopsys* software package. The process simulation allowed determination of constructive-technological parameters of investigated $p-n^+$ junction structure, which made it possible to carry out its device modeling in cylindrical and Cartesian coordinate systems using the *Medici* program, which is also part of the *Synopsys* software package. Direct and reverse branches of the $p-n^+$ junction current-voltage characteristic were computed for modeling cases in these types of coordinate systems and, accordingly, a number of the junction structure electrophysical parameters were determined as a result of calculations performed by *Medici*. By comparing the data obtained by the method of device-process modeling it was found that the considered structure can be calculated in both types of coordinate systems with a high degree of accuracy, since the dispersion of constructive-technological parameters defined by technological modeling in different coordinate systems was 2.6–7.4 %, and the dispersion of electrophysical parameters calculated by in device simulation was 0.09–8.64 %. The obtained research results were applied in the design of new electronic products based on one or more $p-n$ junctions, in the development and optimization of its making process flows.

Keywords: $p-n$ junction, device-process simulation, coordinate system, technological process, constructive-technological parameter, electrophysical parameter, volt-ampere characteristic

Conflict of interest: the author declare that there is no conflict of interest.

Information about the author: *Nataliya L. Lagunovich* – Cand. Sci. (Engineering), Advanced Engineer at Affiliate Research & Design Center “Belmicrosystems” of Open Join-Stock Company “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company. <https://orcid.org/0009-0007-9370-8006>. E-mail: n_dudarby@tut.by

For citation: Lagunovich N. L. The device-process simulation of $p-n^+$ junction in rectangular and cylindrical coordinate systems. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 4, pp. 329–339 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-329-339>

Received: 27.02.2024

Modified: 26.11.2024

Approved for publication: 16.12.2024

Signed to the press: 23.12.2024

Введение. Моделирование выступает важным этапом в процессе разработки и освоения в серийном производстве новых изделий электронной техники, так как сложность интегральных схем и дискретных приборов постоянно возрастает, а их проектные нормы и размеры – уменьшаются. С помощью моделирования в условиях так называемого «виртуального производства» можно получать конкретные образцы полупроводниковых приборных структур [1, 2] с требуемыми электрофизическими характеристиками и параметрами еще до этапа изготовления их реальных экспериментальных образцов. В настоящее время уже разработаны и широко используются программы и программные комплексы, предназначенные для одно-, двух- и трехмерного приборно-технологического моделирования полупроводниковых структур¹.

Исследуемый в данной статье $p-n$ -переход часто служит основной активной областью диодов, стабилитронов, варикапов [3–8] и иных простейших приборных структур, основанных на данном переходе. Однако, находясь в составе биполярных $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторов [3, 4, 9], МДП-структур [3, 4] и других более сложных приборов, $p-n$ -переходы выполняют функции уже отдельных их областей. Например, они являются эмиттерными и коллекторными переходами биполярных транзисторов, выполняют функции истоковых и стоковых областей в МДП-структурах и т. д. [9, 10]. $p-n^+$ -Переход является эмиттерным в составе биполярного $n-p-n$ -транзистора [3, 4, 9], где p -область – его база, а n^+ -область выполняет функцию эмиттера, причем степень легирования n^+ -области на два-три порядка превышает уровень легирования p -области прибора, обеспечивая тем самым требуемую величину коэффициента усиления транзистора по току. Пробивное напряжение такой структуры является пробивным напряжением эмиттер-база $n-p-n$ -транзистора – одного из наиболее значимых параметров полупроводникового устройства, что и обусловило актуальность проведенных в работе исследований.

Для получения более полной информации об электрофизических характеристиках и параметрах прибора и изучения их особенностей необходимо выполнить моделирование эмиттерного перехода в двух типах системы координат: прямоугольной (декартовой) и цилиндрической.

¹ Design Vision User Guide / SYNOPSIS. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/view/17411297/design-vision-user-guide> (date of access: 11.07.2022); Guide to using TCAd with examples (Linux and Unix version) / SILVACO. 2009. URL: <https://silvaco.com/wp-content/uploads/product/pdf/GuideTCAD.pdf> (date of access: 17.03.2022).

Моделирование рассматриваемого $p-n^+$ -перехода в цилиндрической системе координат может оказаться более целесообразным, так как его структура симметрична относительно оси Y , что позволяет использовать только половину конструкции при расчетах, приводя к снижению количества узлов сетки, на которую она разбивается, а следовательно, и к уменьшению затрат машинного времени, необходимого для проектирования. Снижение временных затрат на проектирование является важным критерием, так как часто необходимо провести большое количество численных экспериментов в ограниченные сроки. Кроме того, следует определить, насколько высока точность расчетов, выполненных в различных системах координат и насколько велико отличие результатов, полученных в указанных типах систем координат.

Таким образом, *целью настоящей работы* было выполнение приборно-технологического моделирования $p-n^+$ -перехода кремниевого транзистора в декартовой и цилиндрической системах координат, получение предварительных значений конструктивно-технологических и электрофизических параметров прибора, а также сравнение результатов вычислений, полученных в двух указанных типах систем координат.

Методы моделирования $p-n^+$ -перехода и материалы, используемые при его изготовлении. Применение в рамках настоящего исследования пакета программ фирмы *Synopsys* (Design Vision User Guide. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/view/17411297/design-vision-user-guide>) дало возможность осуществить как технологическое, так и приборное моделирование структуры рассматриваемого $p-n^+$ -перехода и получить предварительную оценку его конструктивно-технологических и электрофизических параметров. В процессе технологического моделирования, выполненного с применением программы для двухмерного проектирования *TSuprem4*, область базы p -типа задавалась не операциями ионного легирования и последующего отжига примеси бора, а путем задания соответствующих параметров акцепторной области $p-n^+$ -перехода. В частности, были указаны размеры данной области и концентрация примеси бора в ней. Эта часть структуры перехода считалась равномерно легированной.

Программа для двухмерного моделирования электрических характеристик прибора *Medici* позволила осуществить приборное проектирование $p-n^+$ -перехода как в цилиндрической системе координат, так и в прямоугольной. Изображения исследуемой структуры и ее вольт-амперных характеристик (ВАХ), полученные путем приборно-технологического проектирования в среде программ *TSuprem4* и *Medici*, выводятся на экран с помощью визуализатора результатов моделирования *TaurusVisual*, который также является частью программного комплекса фирмы *Synopsys*. Кроме перечисленного в состав указанного комплекса входит так называемая «виртуальная фабрика» по производству полупроводниковых структур *WorkBench* (Design Vision User Guide. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/view/17411297/design-vision-user-guide>), с помощью которой пользователь может подготовить и осуществить численный эксперимент.

Рассматриваемый в данной статье $p-n^+$ -переход – это часть биполярного транзистора, изготавливаемого на основе кремния, который является основным материалом, применяемым на производствах ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». При изготовлении реальных образцов биполярных транзисторов с указанным эмиттерным (или коллекторным в случае $p-n-p$ -транзистора) переходом область p -типа получают путем ионного легирования бором и его последующей высокотемпературной разгонки, а n^+ -область формируют с помощью ионного легирования фосфором и его последующих отжигов при температуре 850 °С.

Результаты технологического моделирования и их обсуждение. Технологический маршрут изготовления биполярного $n-p-n$ -транзистора включает в себя достаточно большое количество операций, а рассматриваемый в рамках данной статьи $p-n^+$ -переход формируется путем ионного легирования фосфором в область базы p -типа. Таким образом, технологический процесс создания перехода состоял из следующих основных операций:

- 1) формирование базы p -типа, имеющей концентрацию примеси бора в ее области $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$;
- 2) создание n^+ -эмиттера с помощью ионного легирования фосфором дозой $D \approx 4,06 \cdot 10^{15} \text{ ион/см}^2$ с энергией $E = 60 \text{ кэВ}$ в области базы.

После получения непосредственно p - и n^+ -областей перехода их формирование не заканчивается, так как они являются лишь частью приборных структур, имеющих в своей конструкции $p-n^+$ -переход. Поэтому после выполнения указанных выше этапов следуют еще несколько высокотемпературных отжигов, способных оказать существенное влияние на параметры исследуемых областей:

- 1) отжиг в среде O_2 при температуре $850\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 мин;
- 2) отжиг в среде N_2 при температуре $850\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 60 мин;
- 3) отжиг в среде O_2 при температуре $850\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 мин;
- 4) отжиг в среде O_2 при температуре $850\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 мин;
- 5) отжиг в среде O_2 при температуре $850\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 мин.

Таким образом, в соответствии с вышеописанным технологическим процессом, моделирование которого выполнено в среде *TSuprem4*, была сформирована структура $p-n^+$ -перехода с конкретными конструктивно-технологическими параметрами, после чего осуществлено его приборное моделирование как в прямоугольной (рис. 1), так и в цилиндрической (рис. 2) систе-

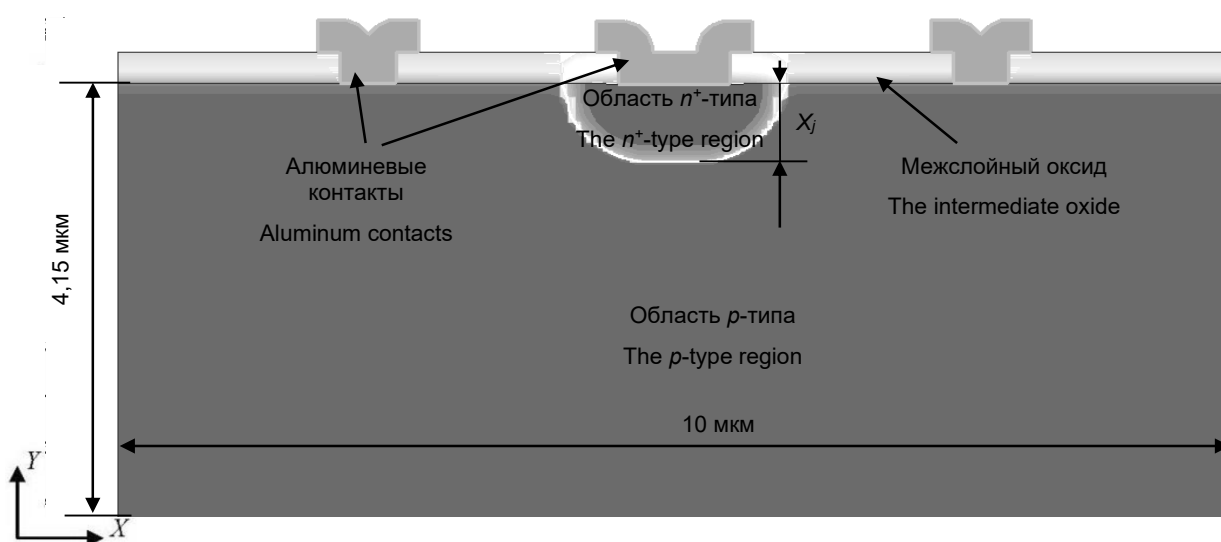


Рис. 1. Полная структура $p-n^+$ -перехода, полученная для приборного моделирования в прямоугольной системе координат

Fig. 1. The complete structure of the $p-n^+$ junction obtained for device modeling in a rectangular coordinate system

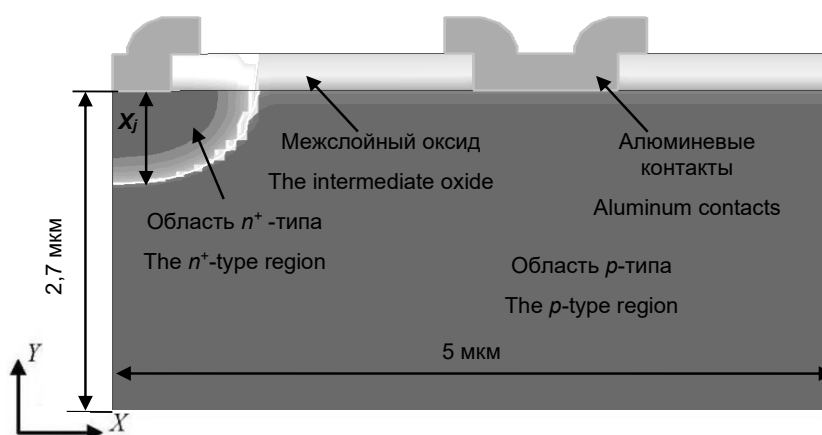


Рис. 2. Половина структуры $p-n^+$ -перехода, полученная для приборного моделирования как в прямоугольной, так и в цилиндрической системах координат

Fig. 2. Half of the $p-n^+$ junction structure obtained for device simulation in both rectangular and cylindrical coordinate systems

мах координат. Размеры активных областей структуры, изображенной на рис. 2, равны половине размеров тех же областей структуры, приведенной на рис. 1, и ее приборное моделирование выполнено как в цилиндрической, так и в прямоугольной системах координат.

Особенностью моделирования в цилиндрической системе координат в среде программы *Medici* является то, что расчет ведется для конструкции, получаемой путем вращения структуры, созданной с помощью *TSuprem4*. С целью приведения в соответствие результатов приборного моделирования в указанных типах систем координат (в прямоугольной и цилиндрической), в процессе технологического моделирования координаты областей были заданы таким образом, чтобы получить не полную структуру (см. рис. 1), а ее половину (см. рис. 2). Конструкция, приведенная на рис. 2, была использована в дальнейшем для приборного моделирования в цилиндрической системе координат. Кроме того, было выполнено приборное моделирование полученной половины структуры $p-n^+$ -перехода (см. рис. 2) еще и в прямоугольной системе координат для проведения сравнительного анализа результатов расчетов.

Структуры, изображенные на рис. 1, 2, предназначенные для приборного моделирования как в декартовой (структура на рис. 1), так и в цилиндрической и декартовой (структура на рис. 2) системах координат, имеют одинаковые конструктивно-технологические параметры и размеры в поперечном сечении, но различаются по площади в планарной плоскости $p-n^+$ -перехода. В ходе моделирования был получен ряд значений конструктивно-технологических параметров, порогового и пробивного напряжений рассматриваемого $p-n^+$ -перехода (таблица).

Значения конструктивно-технологических параметров, порогового и пробивного напряжений $p-n^+$ -перехода, полученные в результате моделирования

Values of structural and technological parameters, threshold and breakdown stresses of the $p-n^+$ junction obtained as a result of modeling

Тип структуры, используемой для моделирования	Значения конструктивно-технологических параметров областей			Значения порогового напряжения при токе, протекающем через $p-n^+$ -переход, $U_{пор}$, В	Значения пробивного напряжения при токе, протекающем через $p-n^+$ -переход, $U_{проб}$, В
	Область p -типа	Область n^+ -типа			
	Удельное сопротивление, ρ , Ом·см	Поверхностное сопротивление, R_s , Ом/кв	Глубина $p-n^+$ -перехода, X_j , мкм		
Полная структура в прямоугольной системе координат	0,062	27	0,74	0,88 (при токе $1 \cdot 10^{-4}$ А)	8,73 (при токе $1 \cdot 10^{-6}$ А)
Половина структуры в прямоугольной системе координат	0,062	25	0,76	0,81 (при токе $1 \cdot 10^{-4}$ А)	8,78 (при токе $1 \cdot 10^{-6}$ А)
Структура в цилиндрической системе координат	0,062	25	0,76	0,88 (при токе $1 \cdot 10^{-4}$ А)	8,65 (при токе $1 \cdot 10^{-6}$ А)

Исходя из данных, приведенных в таблице, можно рассчитать разницу в значениях поверхностного сопротивления (R_s) области n^+ -типа, полученных в результате моделирования полной структуры в прямоугольной системе координат, а также в результате моделирования половины структуры в прямоугольной и цилиндрической системах координат. Такая разница составила $27 \text{ Ом/кв} - 25 \text{ Ом/кв} = 2 \text{ Ом/кв}$ ($\sim 7,4 \%$). Различие в значениях глубины залегания $p-n^+$ -перехода X_j , рассчитанных в результате моделирования полной структуры в декартовой системе координат и при моделировании ее половины в прямоугольной и цилиндрической системах координат, составило $0,76 \text{ мкм} - 0,74 \text{ мкм} = 0,02 \text{ мкм}$ ($\sim 2,6 \%$).

Таковыми небольшими разбросами в полученных результатах можно пренебречь, так как они, вероятней всего, обусловлены различиями в сетке, на которые разбиваются моделируемые структуры в процессе выполнения вычислений, как показано на рис. 3.

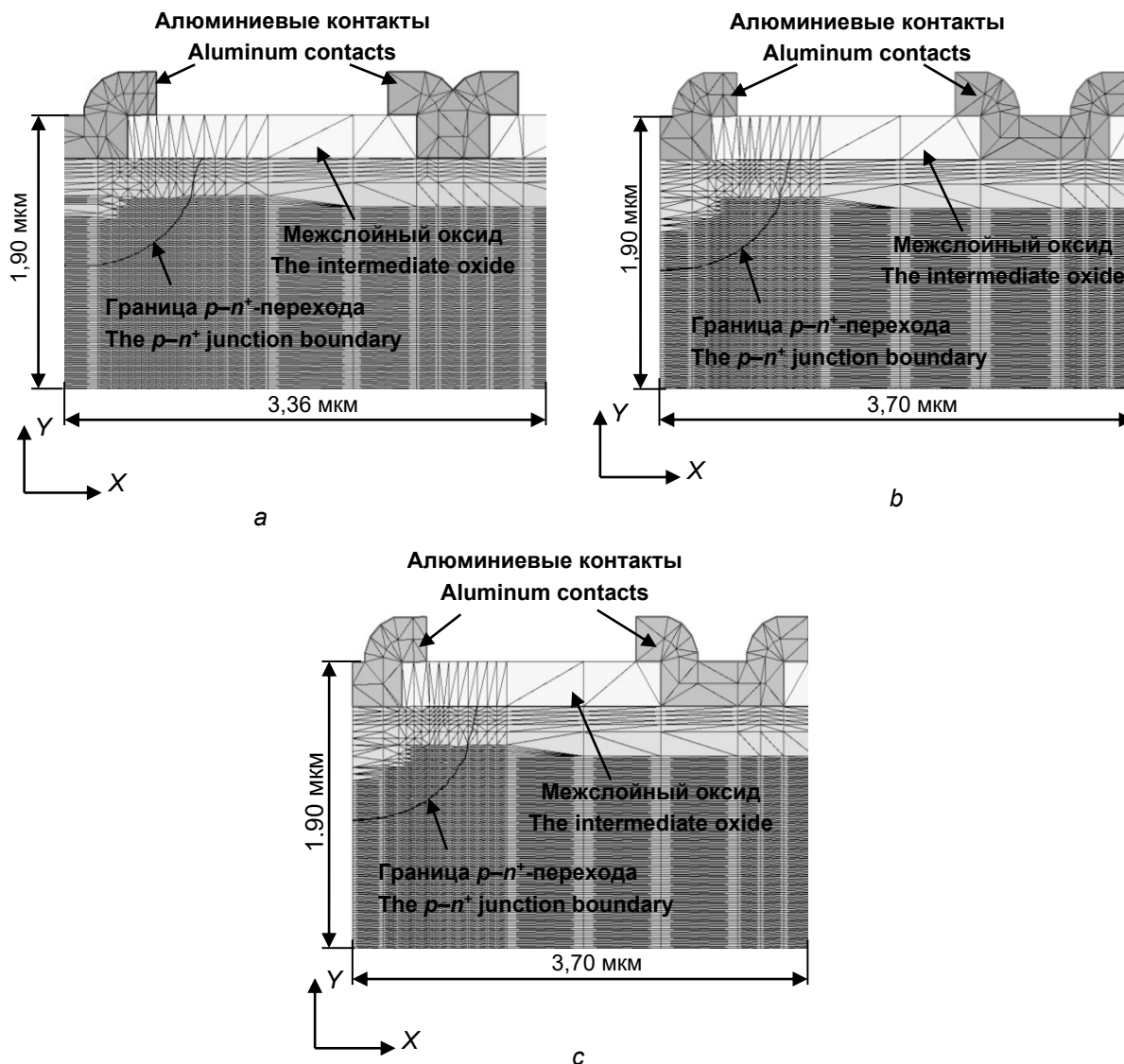


Рис. 3. Фрагмент структуры $p-n^+$ -перехода, показанной на рис. 1, полученной в результате моделирования в прямоугольной системе координат (a); фрагмент структуры $p-n^+$ -перехода, показанной на рис. 2, полученной в результате моделирования в прямоугольной системе координат (b); фрагмент структуры $p-n^+$ -перехода, показанной на рис. 2, полученной в результате моделирования в цилиндрической системе координат (c), с изображением сетки

Fig. 3. The $p-n^+$ junction structure fragment shown in Fig. 1, obtained as a result of modeling in a rectangular coordinate system (a); the $p-n^+$ junction structure fragment shown in Fig. 2, obtained as a result of modeling in a rectangular coordinate system (b); the $p-n^+$ junction structure fragment shown in Fig. 2, obtained as a result of modeling in a cylindrical coordinate system (c), with a grid image

Установлено, что размер моделируемой части исследованного в рамках данной работы $p-n^+$ -перехода оказывает некоторое влияние на значения его конструктивно-технологических параметров. Определенные в значениях параметров различия, вероятней всего, обусловлены погрешностью расчетов, выполненных в среде программы *TSuprem4*. Данная погрешность, в частности, возникает из-за разницы в значениях шагов сетки, на которые разбивается структура в процессе вычислений конечно-разностным методом [2], что, например, можно увидеть на рис. 3. Так, сетки на рис. 3, b, c (2 рисунка – 2 сетки) визуально почти одинаковы, но заметно отличаются от сетки, представленной (1 рисунок – 1 сетка) на рис. 3, a. Как уже было упомянуто, на параметры сетки могут оказать влияние геометрические размеры структуры, на которые, в свою очередь, влияет тип системы координат, что и обусловило разброс в значениях конструктивно-технологических параметров. Следует также отметить, что использованное в рамках данной

работы программное обеспечение способно самостоятельно задавать параметры ячеек, на которые разбивается структура, с целью повышения точности вычислений и сходимости итерационных процессов.

Обсуждение результатов приборного моделирования. С помощью программы *Medici*, предназначенной для двухмерного моделирования электрических характеристик прибора, было осуществлено приборное проектирование структур, полученных в среде программы *TSuprem4* и приведенных на рис. 1, 2, в прямоугольной системе координат, а также структуры, изображенной на рис. 2, – в цилиндрической системе координат. Итоги приборного моделирования, выводимые на экран с помощью визуализатора результатов моделирования *TaurusVisual*, представлены на рис. 4, 5 и в таблице.

Из рис. 4, где приведены зависимости протекающего через исследуемую структуру тока от прямого напряжения смещения, можно определить пороговые напряжения ($U_{\text{пор}}$) $p-n^+$ -перехода для рассматриваемых случаев моделирования. Значение $U_{\text{пор}}$, определяемого при токе 100 мкА ($1 \cdot 10^{-4} \text{ А}$), структур, показанных на рис. 1, 2, полученное в результате расчетов в декартовой системе координат, составило $0,88 \text{ В}$ (кривые 1, 2 на рис. 4); значение $U_{\text{пор}}$ структуры, представленной на рис. 2, рассчитанное в цилиндрической системе координат, оказалось равным $0,81 \text{ В}$ при том же значении силы тока (100 мкА) (кривая 3 на рис. 4). Значения $U_{\text{пор}}$ $p-n^+$ -перехода как для конструкции, изображенной на рис. 1, так и для структуры, показанной на рис. 2, приведены в предпоследнем столбце таблицы для обоих случаев моделирования в разных типах системы координат. На рис. 3 видно, что с ростом прямого напряжения смещения различия зависимости I от графиков 2 и 3 существенно возрастают, что может быть обусловлено размерами модели-

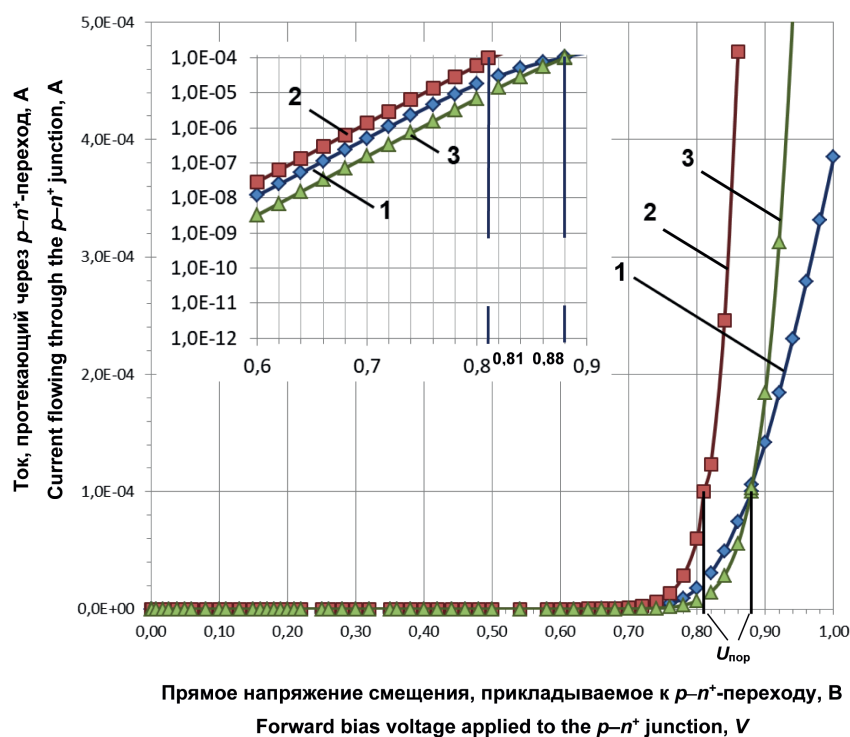


Рис. 4. Прямая ветвь ВАХ $p-n^+$ -перехода конструкции, показанной на рис. 1, в результате моделирования в прямоугольной системе координат (кривая 1); прямая ветвь ВАХ $p-n^+$ -перехода конструкции, показанной на рис. 2, полученная в результате моделирования в прямоугольной системе координат (кривая 2); прямая ветвь ВАХ $p-n^+$ -перехода конструкции, показанной на рис. 2, полученная в результате моделирования в цилиндрической системе координат (кривая 3)

Fig. 4. The volt-ampere characteristic direct branch of the design $p-n^+$ junction shown in Fig. 1, obtained as a result of simulation in a rectangular coordinate system (curve 1); the volt-ampere characteristic direct branch of the design $p-n^+$ junction shown in Fig. 2, obtained as a result of modeling in a rectangular coordinate system (curve 2); the volt-ampere characteristic direct branch of the design $p-n^+$ junction shown in Fig. 2, obtained as a result of modeling in a cylindrical coordinate system (curve 3)

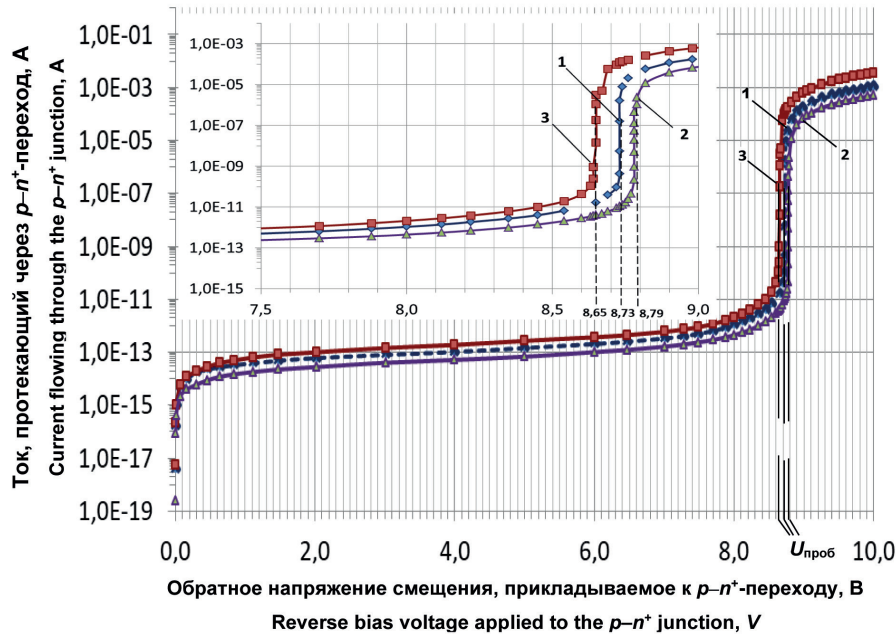


Рис. 5. Пробивная характеристика исследуемого $p-n^+$ -перехода конструкции, показанной на рис. 1, полученная в результате моделирования в прямоугольной системе координат (кривая 1); пробивная характеристика $p-n^+$ -перехода конструкции, показанной на рис. 2, полученная в результате моделирования в прямоугольной системе координат (кривая 2); пробивная характеристика $p-n^+$ -перехода конструкции, показанной на рис. 2, полученная в результате моделирования в цилиндрической системе координат (кривая 3)

Fig. 5. The breakdown characteristic of the observable $p-n^+$ junction with structure shown in Fig. 1, obtained as a result of simulation in a rectangular coordinate system (curve 1); the breakdown characteristic of the observable $p-n^+$ junction with structure shown in Fig. 2, obtained as a result of modeling in a rectangular coordinate system (curve 2); the breakdown characteristic of the observable $p-n^+$ junction with structure shown in Fig. 2, obtained as a result of modeling in a cylindrical coordinate system (curve 3)

руемых структур и отличиями в значениях шага ячейки, на которые разбиваются исследуемые варианты $p-n^+$ -перехода.

Указанные различия в размерах структур и, соответственно, ячеек, на которые они делятся, привели, вероятней всего, к разным значениям поверхностных R_s и, соответственно, удельного сопротивления (ρ_v) области n^+ -типа, что, в свою очередь, обусловило отличие наклона зависимости I от наклонов кривых 2 и 3 на рис. 4. Большее сопротивление n^+ -области структуры, изображенной на рис. 1, обусловило больший наклон прямой ветви ВАХ (кривая 1 на рис. 4) по отношению к наклонам зависимостей токов, протекающих через $p-n^+$ -переход, от прямого напряжения смещения (кривые 2 и 3 на рис. 4), особенно, при высоких уровнях инжекции. То есть, ток, протекающий через конструкцию, изображенную на рис. 1, растет медленней, чем через структуру, представленную на рис. 2, для случаев моделирования последней в разных типах систем координат. При этом следует отметить, что сопротивление p -области задано изначально одинаковым для обеих конструкций. Наклоны зависимостей 2 и 3 на рис. 4 при высоких уровнях инжекции приблизительно одинаковы, так как удельные сопротивления их n^+ -областей также равны между собой. Однако, как видно из рис. 4, зависимости 2 и 3 отличаются значениями $U_{пор}$, что можно объяснить различиями в погрешности вычислений, осуществленных для структуры, показанной на рис. 2, в разных типах системы координат. Структура, изображенная на рис. 2, в случае ее приборного моделирования в декартовой системе координат имеет площадь в планарной плоскости $5 \text{ мкм} \cdot 1 \text{ мкм} = 5 \text{ мкм}^2$, а случае ее приборного моделирования в цилиндрической системе координат – $\pi \cdot (5 \text{ мкм})^2 \approx 78,5 \text{ мкм}^2$.

В целом полученные величины $U_{пор}$ достаточно близки для рассматриваемых условий расчетов, и их разброс оказался небольшим при заданных значениях тока ($1 \cdot 10^{-4}$ А) через структуру: $0,88 \text{ В} - 0,88 \text{ В} = 0 \text{ В}$ (0 %) и $0,88 \text{ В} - 0,81 \text{ В} = 0,07 \text{ В}$ ($\approx 8,6$ %).

На рис. 5 приведены зависимости тока, протекающего через $p-n^+$ -переход (см. рис. 1, 2) от обратного напряжения смещения, полученные в результате моделирования в прямоугольной и цилиндрической системах координат. Из них можно определить величины пробивного напряжения $p-n^+$ -перехода $U_{\text{проб}}$ при токе, протекающем через переход, равном 1 мкА.

Как видно из рис. 5, пробивное напряжение ($U_{\text{проб}}$) структуры, показанной на рис. 1, после расчетов, выполненных в прямоугольной системе координат, составило 8,73 В (кривая 1) при токе $1 \cdot 10^{-6}$ А; значение $U_{\text{проб}}$ $p-n^+$ -перехода, изображенного на рис. 2, после моделирования также в прямоугольной системе координат оказалось равным 8,79 В (кривая 2) при токе $1 \cdot 10^{-6}$ А; в результате моделирования в цилиндрической системе координат структуры, приведенной на рис. 2, величина $U_{\text{проб}}$ при токе, равном $1 \cdot 10^{-6}$ А (кривая 3), составило 8,65 В. Значения $U_{\text{проб}}$ исследуемого $p-n^+$ -перехода как для структуры, показанной на рис. 1, так и для структуры, изображенной на рис. 2, приведены в последнем столбце таблицы для обоих случаев моделирования в указанных типах системы координат.

Как видно из таблицы, в случае приборного моделирования полупроводниковых структур с применением программы *Medici* выбор системы координат оказывает влияние на результаты расчетов, причиной чего, вероятней всего, послужили различия в размерах используемой конструкции (см. рис. 1, 2), вызвавшие разницу в параметрах шагов ячеек, на которые структура разбивается. Однако разбросы в значениях пробивных напряжений ($U_{\text{проб}}$), полученные в результате приборного моделирования в разных системах координат (прямоугольной и цилиндрической), незначительны и составляют $8,73 \text{ В} - 8,65 \text{ В} = 0,08 \text{ В}$ ($\sim 0,9 \%$) и $8,79 \text{ В} - 8,65 \text{ В} = 0,14 \text{ В}$ ($\sim 1,6 \%$).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что приборное моделирование, выполняемое с применением программы *Medici*, дает результаты с высокой степенью точности как в случае вычислений в прямоугольной системе координат, так и в случае расчетов в цилиндрической системе, а полученной в процессе моделирования разницей в значениях $U_{\text{пор}}$ и $U_{\text{проб}}$ можно пренебречь.

Заключение. В ходе работ, выполненных в рамках данного исследования, было осуществлено приборно-технологическое моделирование структуры кремниевого $p-n^+$ -перехода, p -область которого является базой, а n^+ -область – эмиттером биполярного $n-p-n$ -транзистора как в прямоугольной, так и в цилиндрической системах координат. В результате моделирования, проведенного в соответствии с разработанным в рамках данной работы технологическим маршрутом изготовления, были определены конструктивно-технологические параметры исследуемой структуры, ее пороговые и пробивные напряжения. В процессе сравнительного анализа результатов вычислений установлено, что разброс значений поверхностного сопротивления (R_s) области n^+ -типа для случаев моделирования полной структуры $p-n^+$ -перехода в прямоугольной системе координат и его половины в прямоугольной и цилиндрической системах координат невелик и составляет $\sim 7,4 \%$. Однако различия в значениях R_s , а следовательно, и удельного сопротивления (ρ_v) привели к разнице наклонов прямой ветви ВАХ, полученной в результате моделирования полной структуры в прямоугольной системе координат и в результате расчетов для половины конструкции, выполненных как в прямоугольной, так и в цилиндрической системах координат. Полученное различие в значениях глубины залегания (X_j) $p-n^+$ -перехода в случае моделирования полной структуры перехода в прямоугольной системе координат и в случае моделирования его половины в прямоугольной и цилиндрической системах координат составило $\sim 2,6 \%$. Разница в значениях конструктивно-технологических параметров, полученных в результате технологического моделирования, является небольшой, а на величину параметров влияет геометрический размер моделируемой части структуры, на который, в свою очередь, оказывает свое воздействие система координат. Различия в общих размерах моделируемых структур, связанных с особенностями вычислений в двух указанных типах систем координат, повлекли за собой разницу в размерах ячеек, на которые делится исследуемый переход в процессе расчетов.

Сравнение данных, полученных в результате приборного моделирования с применением программы *Medici*, позволило установить, что при расчетах прямой ветви ВАХ разброс значений $U_{\text{пор}}$ для рассмотренных случаев моделирования составил от 0 % до $\sim 8,6 \%$ и может быть вызван

различиями в размерах ячеек сетки, на которые разбивается моделируемая структура. Также было установлено, что при моделировании обратной ветви ВАХ на результаты расчетов свое воздействие оказывает тип системы координат, который определяет размер моделируемой конструкции. При этом полученные в результате вычислений в прямоугольной и цилиндрической системах координат значения $U_{\text{проб}}$ мало отличались друг от друга, а разница их величин для случаев моделирования в двух указанных типах систем координат составила $\sim 0,9\%$ или $\sim 1,6\%$. Погрешность приборов, с помощью которых выполняют измерения характеристик и показателей экспериментальных образцов, составляет $\pm 10\%$, и полученные разбросы в значениях конструктивно-технологических и электрофизических параметров $\sim 0,9\text{--}8,6\%$, обусловленные различиями в размерах ячеек сетки, на которые разбивается моделируемая структура, незначительны и ими можно пренебречь.

Таким образом, выполненное с помощью программы *Medici* приборное моделирование структуры исследуемого кремниевого $p\text{--}n^+$ -перехода позволяет достаточно точно получать значения его пороговых и пробивных напряжений как в прямоугольной, так и в цилиндрической системах координат.

Проведенные в рамках данной работы исследования можно использовать при проектировании новых конструкций дискретных приборов и элементов интегральных схем, основанных на $p\text{--}n$ -переходах, а также при разработке и оптимизации технологических маршрутов их изготовления.

Список использованных источников

1. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов / П. Антонетти [и др.]; под общ. ред. П. Антонетти. – М.: Радио и связь, 1988. – 490 с.
2. Абрамов, И. И. Лекции по моделированию элементов интегральных схем / И. И. Абрамов. – М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. – 152 с.
3. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 кн.: пер. с англ. / С. Зи. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Мир, 1984. – Кн. 1. – 456 с.
4. Маллер, Р. Элементы интегральных схем / Р. Маллер, Т. Кейминс. – М.: Мир, 1989. – 630 с.
5. Дудар, Н. Л. Моделирование электрических характеристик и расчет конструктивных параметров кремниевого стабилитрона с напряжением стабилизации 6,5 В / Н. Л. Дудар, В. С. Сякерский, Н. Н. Коротко // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2009. – № 3. – С. 10–12.
6. Дудар, Н. Л. Приборно-технологическое моделирование дискретного кремниевого стабилитрона с напряжением стабилизации 6,5 Вольт / Н. Л. Дудар, В. М. Борздов // Электроника-инфо. – 2011. – № 2. – С. 77–80.
7. Лагунович, Н. Л. Моделирование влияния типа эпитаксиальной пленки на электрические характеристики высоковольтных кремниевых диодов / Н. Л. Лагунович, А. С. Турцевич, В. М. Борздов, // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2015. – № 2. – С. 98–102.
8. Лагунович, Н. Л. Моделирование высоковольтного кремниевого диода, построение зависимостей его плотности тока от температуры / Н. Л. Лагунович // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем: сб. тр. IX Всерос. науч.-техн. конф., Москва, 5–8 окт., 2020 г.: в 4 вып. – М., 2020. – Вып. 2. – С. 22–28.
9. Dudar, N. L. The Simulation of PNP-Transistor as an Element of High-Voltage Integrated Circuits by Various Parameters of Epitaxial Film / N. L. Dudar, V. M. Borzdov // 8th Proc. of IEEE East-West Design & Test Symposium, St. Petersburg, Russia, September 17–20, 2010. – P. 262–263.

References

1. Antonetti P., Antoniadis D. A., Dutton R. W., Oldham W. G. (eds.). *Process and Device Simulation for MOS-VLSI Circuits*. Springer, 1983. 636 p. (NATO Science Series E: Applied Science; no. 62).
2. Abramov I. I. *Lectures on Simulation of Integrated Circuits Elements*. Moscow, Izhevsk, NITS “Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika” Publ., 2005, 152 p. (in Russian).
3. Sze S. *Physics of Semiconductor Devices*. 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd., 1981. xiv, 812 p.
4. Muller R. S., Kamins T. I. *Device Electronics for Integrated Circuits*. 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd., 1986. 524 p.
5. Dudar N. L., Syakerskiy V. S., Korytko N. N. The electric characteristics simulation and structural parameters calculation of Si based stabilatron with stabilizing voltage 6.5 V. *Tekhnologiya i konstruirovanie v elektronnoi apparature* [Technology and Construction in Electronic Equipment], 2009, no. 3, pp. 10–12 (in Russian).

6. Dudar N. L., Borzdov V. M., Korytko N. N. The device-technological simulation of the discrete Si based stabilitrone with stabilizing voltage 6.5 V. *Elektronika-info* [Electronics-Info], 2011, no. 2, pp. 77–80 (in Russian).

7. Lagunovich N. L., Turtsevich A. S., Borzdov V. M. Simulation of influence of epitaxial film type on electrical characteristics of high-voltage silicon diodes. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2015, no. 2, pp. 98–102 (in Russian).

8. Lagunovich N. L. High-voltage silicon diode simulation, the dependences of its current density from temperature construction. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem: sbornik trudov IX Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Moskva, 5–8 oktyabrya, 2020 g.* [Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development: Collection of Works of the IX All-Russian Scientific and Technical Conference, Moscow, October 5–8, 2020]. Moscow, 2020, Iss. 2, pp. 22–28 (in Russian).

9. Dudar N. L., Borzdov V. M. The Simulation of PNP-Transistor as an Element of High-Voltage Integrated Circuits by Various Parameters of Epitaxial Film. *8th Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium*. St. Petersburg, 2010, pp. 262–263.

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)**ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ
И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ****DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL
AND ENVIRONMENT SYSTEMS**<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-340-352>
УДК 51-72+622.83+539.3+004.942Оригинальная статья**С. Н. Лопатин^{1,2*}, М. А. Журавков¹, П. С. Передрий¹**¹Белорусский государственный университет,
пр. Независимости 4, 220030, Минск, Республика Беларусь,²Харбинский политехнический университет,
ул. Сидаджи, 150001, Харбин, Китайская Народная Республика**КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ
ВЫРАБОТОК ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

Аннотация. Продемонстрирована методика комплексной оценки устойчивости подземных горных выработок в массивах соляных пород. Рассмотрены различные варианты залегания пластов полезного ископаемого, а также наиболее популярные меры охраны подземных выработок, такие как анкеры, компенсационные щели и железобетонные крепи. Предлагаемая методика основана на использовании гибридного численно-аналитического метода для расчета напряженно-деформированного состояния горнотехнических систем, а также применении оригинального комплексного критерия оценки предельного состояния массивов горных пород. В результате обобщения выполненных исследований выделены основные факторы, влияющие на устойчивость подземных выработок: глубина расположения выработки, физико-механические свойства массива горных пород и его горно-геологическое строение, а также применяемые меры охраны. Установлена степень влияния каждого из этих факторов на устойчивость рассматриваемых выработок. На примере решения ряда модельных задач показано, что предлагаемая методика может использоваться для полной и достоверной оценки состояния массивов горных пород в окрестности подземных выработок, а также прогнозирования устойчивости подземных горнотехнических сооружений при различных условиях.

Ключевые слова: горные выработки, массив горных пород, напряженно-деформированное состояние, предельное состояние, метод конечных элементов

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Лопатин Сергей Николаевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики Белорусского государственного университета; научный сотрудник, факультет мехатроники Харбинского политехнического университета. <https://orcid.org/0000-0001-5958-7799>. E-mail: lopatinsn@tut.by; Журавков Михаил Анатольевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики Белорусского государственного университета. <https://orcid.org/0000-0002-7420-5821>. E-mail: zhuravkov@bsu.by; Передрий Павел Сергеевич – стажер младшего научного сотрудника научно-исследовательской лаборатории прикладной механики Белорусского государственного университета. E-mail: ravelpiaredriy@gmail.com

Вклад авторов: Лопатин Сергей Николаевич – создание концепции, компьютерных моделей и проведение численных экспериментов, анализ и обобщение результатов исследования, написание и редактирование текста рукописи; Журавков Михаил Анатольевич – создание концепции, анализ и обобщение результатов исследования, написание и редактирование текста рукописи; Передрий Павел Сергеевич – построение компьютерных моделей и проведение численных экспериментов, работа с литературой и графическое оформление статьи, написание и редактирование текста рукописи.

© Лопатин С. Н., Журавков М. А., Передрий П. С., 2024

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Для цитирования: Лопатин, С. Н. Комплексная оценка устойчивости подземных горных выработок при различных горнотехнических условиях / С. Н. Лопатин, М. А. Журавков, П. С. Передрий // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 4. – С. 340–352. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-340-352>

Поступила в редакцию: 14.10.2024

Доработанный вариант: 30.11.2024

Утверждена к публикации: 16.12.2024

Подписана в печать: 23.12.2024

Original article

Siarhei N. Lapatsin^{1,2*}, Michael A. Zhuravkov¹, Pavel S. Piaredryi¹

¹Belarusian State University, 4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus

²Harbin Institute of Technology, Xidazhi Str., 150001, Harbin, China

COMPLEX ESTIMATION OF THE UNDERGROUND EXCAVATIONS STABILITY IN VARIOUS MINING AND GEOLOGICAL CONDITIONS

Abstract. The paper demonstrates a methodology of a complex stability estimation for underground mining excavations located in salt rock masses. Various geological structures of the rock mass, as well as the most popular safety measures for underground excavations support such as anchors, expansion gaps and reinforced concrete are considered. The proposed methodology is based on a hybrid numerical-analytical method for the determination of the stress-strain state of geotechnical systems as well as on an original complex limit state criterion for rock masses. As the result of the study the main factors influencing the stability of excavations were highlighted and generalized. These factors are: mining depth, mechanical properties of rock mass, its geological structure and safety measures. The degree of the importance of each mentioned factor is established. A number of model problems are solved to prove the efficiency of the proposed method for complete and reliable estimation of rock mass state in the vicinity of underground excavations, as well as predicting the stability of geotechnical structures under various conditions.

Keywords: mining excavations, rock mass, stress-strain state, limit state, finite element method

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: *Siarhei N. Lapatsin* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics at Belarusian State University; Postdoctoral Researcher of School of Mechatronics Engineering at Harbin University of Technology. <https://orcid.org/0000-0001-5958-7799>. E-mail: lopatsin@tut.by; *Michael A. Zhuravkov* – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Theoretical and Applied Mechanics at Belarusian State University. <https://orcid.org/0000-0002-7420-5821>. E-mail: zhuravkov@bsu.by; *Pavel S. Piaredryi* – Junior Researcher trainee of the Applied Mechanics Laboratory at Belarusian State University. E-mail: pavelpiaredryi@gmail.com

Contribution of the authors: *Siarhei N. Lapatsin* – conceptualizing, creating computer models and conducting numerical experiments, analyzing and summarizing the results of the study, writing and editing the text of the manuscript; *Michael A. Zhuravkov* – conceptualizing, analyzing and summarizing the results of the study, writing and editing the text of the manuscript; *Pavel S. Piaredryi* – developing computer models and conducting numerical experiments, working with literature and graphic design of the article, writing and editing the text of the manuscript.

For citation: Lapatsin S. N., Zhuravkov M. A., Piaredryi P. S. Complex estimation of the underground excavations stability in various mining and geological conditions. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 4, pp. 340–352 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-340-352>

Received: 14.10.2024

Modified: 30.11.2024

Approved for publication: 16.12.2024

Signed to the press: 23.12.2024

Введение. Проблема прогнозирования устойчивости подземных горнотехнических сооружений, таких как горные выработки, подземные инженерные конструкции и т. д., является одной из ключевых в геомеханике и геотехнике, поскольку корректное решение данной задачи обеспечивает безопасность эксплуатации горнотехнических сооружений, а также эффективность добычи полезных ископаемых в шахтах и рудниках [1, 2].

Подходов к решению задач данного класса предложено достаточно много, вместе с тем проблема точного и достоверного прогнозирования устойчивости подземных сооружений актуальна и сегодня и широко обсуждается в научной и технической литературе [2–4]. В настоящее время при решении задач данного класса одним из наиболее популярных и эффективных методов является численное моделирование поведения массивов горных пород в окрестности горных выработок в различных горнотехнических условиях [3, 5, 6]. Помимо этого, достаточно представительным является класс работ, в которых строятся стохастические и вероятностные модели прогнозирования устойчивости выработок на основе обработки данных экспериментальных исследований (см., например, [7, 8]). Значительное количество исследований связано с совершенствованием и разработкой новых подходов и методик к решению такого типа задач, к построению новых аналитических решений [9, 10].

Несмотря на повышенный интерес к проблеме достоверного и надежного прогнозирования устойчивости и долговечности подземных выработок, до сих пор не существует универсального метода решения задач данного класса. Поэтому актуальным направлением исследований является разработка универсального алгоритма оценки предельного состояния горнотехнических сооружений, основанного на применении комплексного критерия предельного состояния.

Следует отметить, что в геомеханике понятия прочности и устойчивости отличаются от общепринятых классических определений, принятых в строительной механике и сопротивлении материалов [12, 13]. Данное обстоятельство связано с тем, что нарушение сплошности, которое проявляется в виде образования макротрещин или систем трещин, а также формирования блочной структуры в рассматриваемой области массива горных пород, не всегда приводит к полному разрушению всей области и не во всех случаях рассматривается как эксплуатационно-непригодное состояние горнотехнической системы [12–15]. Так, при решении прикладных задач механики горных пород и массивов образование локальных зон нарушения сплошности массива (зон разрушения) является допустимым, если это не приводит к нарушению глобальной устойчивости всей выделенной области массива горных пород [14, 15].

Цель работы – построение методики оценки устойчивости подземных выработок при различных горнотехнических условиях.

К задачам исследования относятся построение расчетных методик определения напряженно-деформированного состояния (НДС) рассматриваемых горнотехнических систем и оценка их предельного состояния.

Постановка задачи об устойчивости подземного сооружения при различных горнотехнических условиях. Под *устойчивостью подземных сооружений* в работе понимается способность таких сооружений сохранять эксплуатационно-пригодное состояние на заданный срок без перехода вмещающего массива горных пород в предельное состояние под действием внешних нагрузок [11–13]. При этом под *предельным состоянием* (ПС) породных массивов и горнотехнических систем понимается такое их состояние, при котором в рассматриваемой области массива горных пород или в элементах горнотехнического сооружения имеют место значительные по размерам зоны нарушения критериев ПС (зоны нарушения сплошности, разрушения, трещиноватости и т. д.), совокупность которых может привести к полному разрушению, потере устойчивости рассматриваемой области массива горных пород или переходу породной толщи в данной области в новое структурное состояние [14, 15].

Оценку устойчивости горнотехнической системы «подземная выработка – вмещающий массив» выполняли при различных горнотехнических условиях, к которым относятся геометрия и размеры поперечного сечения выработки, применяемые меры охраны¹ (анкерное крепление, компенсационные щели, железобетонная крепь и др.), а также геологическое строение вмещающего массива и его физико-механические свойства [16].

¹ Инструкция по охране и креплению горных выработок на Старобинском месторождении: утв. ОАО «Беларуськалий» 17.04.18: по состоянию на 31 янв. 2022 г. Солигорск: СИПР, 2018. 206 с.

В рамках исследования для демонстрации эффективности использования разработанного алгоритма комплексной оценки НДС и ПС горнотехнических систем выполнены численные расчеты для одиночной протяженной выработки арочного поперечного сечения в массиве калийных пород. Рассматривались различные ситуации расположения выработки в массиве горных пород.

На рис. 1 схематично представлены характерные примеры модельных схем расположения выработки. Моделируемые ситуации размещения выработок в массиве горных пород являются распространенными при проведении горных работ на калийных месторождениях Республики Беларусь¹ и других стран [13, 14].

Выработка в случаях, приведенных на рис. 1, *a, b*, располагается в мощном слое соляных пород. Мощность слоя в данном случае составляет более 10 м, что позволяет рассматривать вмещаю-

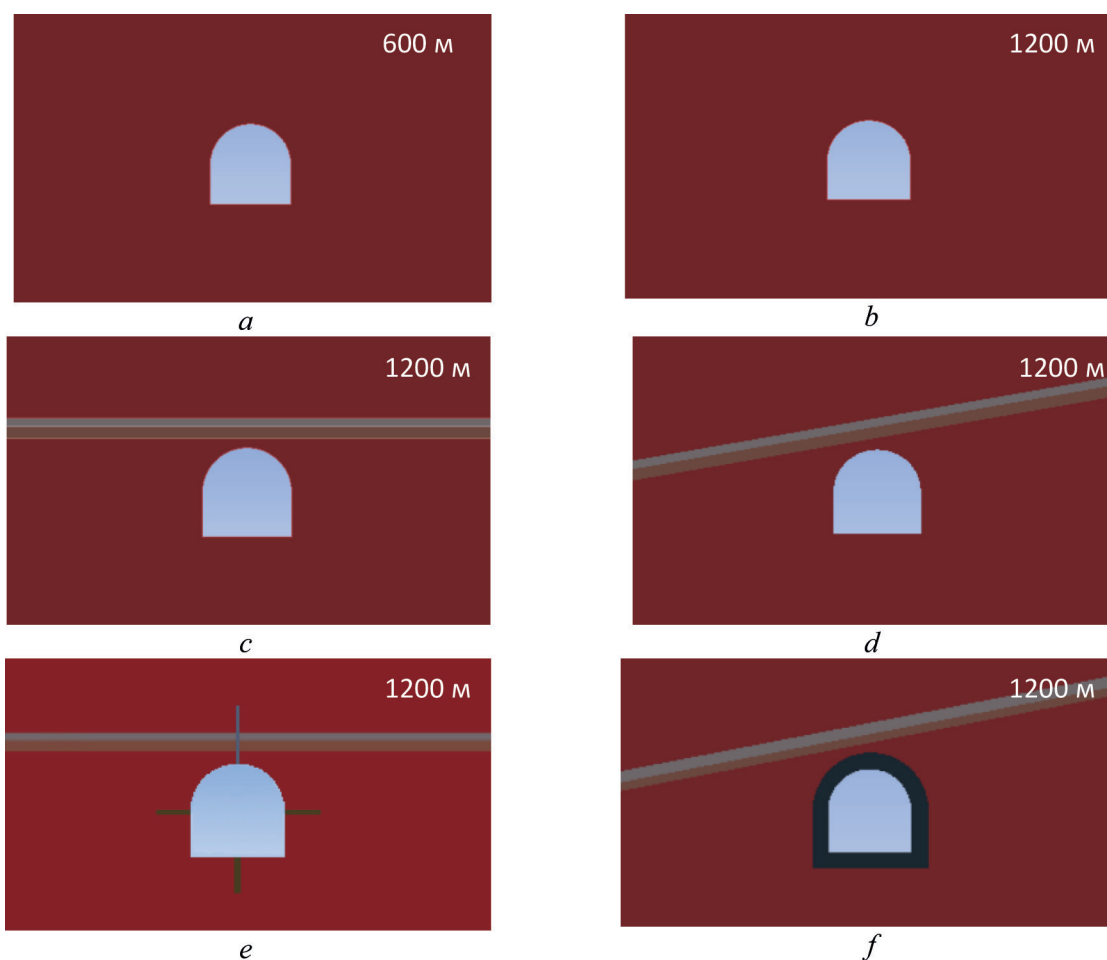


Рис. 1. Примеры схем рассматриваемых горнотехнических систем: *a* – выработка в мощном слое каменной соли на глубине 600 м; *b* – выработка в мощном слое каменной соли на глубине 1200 м; *c* – выработка в слоистом соляном массиве на глубине 1200 м; *d* – выработка в слоистом соляном массиве на глубине 1200 м с наклонными слоями; *e* – выработка в слоистом соляном массиве на глубине 1200 м, охраняемая анкерами и компенсационными щелями; *f* – выработка в слоистом соляном массиве с наклонными слоями на глубине 1200 м, закрепленная железобетонной крепью

Fig. 1. Examples of considered geotechnical systems: *a* – excavation in the rock salt mass at the depths of 600 m; *b* – excavation in the rock salt mass at the depths of 1200 m; *c* – excavation in a multilayered salt rock mass at the depths of 1200 m; *d* – excavation in a multilayered salt rock mass at the depths of 1200 m in the case of inclined layers; *e* – excavation in a multilayered salt rock mass at the depths of 1200 m supported by anchors and compensational holes; *f* – excavation in a multilayered salt rock mass at the depths of 1200 m in the case of inclined layers, supported by reinforced concrete

¹ Инструкция по охране и креплению горных выработок на Старобинском месторождении.

ший массив как однородный при моделировании. В остальных случаях в кровле выработок моделируется наличие слоистости. При этом выработки также располагаются в мощном слое соляных пород, а слоистость представлена несколькими слоями мощностью 0,3–0,5 м с различными физико-механическими свойствами. В частности, рассматривалось прослаивание сильвинита, глины аргиллитоподобной и каменной соли. Сама выработка во всех рассматриваемых случаях находится в мощном слое каменной соли. Над выработкой на расстоянии 0,3 м располагается слой глины аргиллитоподобной мощностью 0,4 м, который переслаивается со слоем сильвинита мощностью 0,3 м. Над слоем сильвинита снова располагается мощный слой каменной соли. Отметим, что такое геологическое строение массива неблагоприятно для ведения горных работ по причине наличия неустойчивого слоя пластичной глины, который имеет низкие прочностные характеристики. В ситуациях, представленных на рис. 1, *c, d*, слои залегают горизонтально, а в случаях, показанных на рис. 1, *e, f*, слои располагаются под углом 10° к горизонту. В схеме на рис. 1, *e* показана ситуация наличия по контуру выработки компенсационных щелей и анкерного крепления. Длина компенсационных щелей составляет 1,1 м, ширина – 0,13 м. Щели пройдены в боках и в почве выработки. Крепь анкерная металлическая винтовая (КАМВ) длиной 1,8 м установлена в кровле выработки¹. В случае, представленном на рис. 1, *f*, в качестве меры охраны используется железобетонная крепь мощностью 0,6 м на основании бетона класса В30².

Определение НДС горнотехнических систем согласно схемам расположения выработок на рис. 1, *a, b* достаточно широко представлено в научно-технической литературе (см., например, [17, 18]). Данные ситуации рассматриваются главным образом с целью сравнения результатов моделирования и для демонстрации использования предлагаемого алгоритма расчета областей ПС. Расчет НДС систем, представленных на рис. 1, *c, d*, является сложной задачей по причине необходимости прямого учета слоистости массива горных пород. В схемах на рис. 1, *e, f* присутствуют конструкционные элементы крепей горных выработок, что требует разработки специальных технологий выполнения численного моделирования. Определение НДС горнотехнических систем в этом случае значительно усложнено существенно различными свойствами породного массива и конструкционных элементов крепи выработки, а также необходимостью учета взаимодействия всех элементов горнотехнического сооружения друг с другом и со вмещающим массивом. Помимо этого, дополнительную сложность вызывает различие масштабов собственно горнотехнического сооружения и применяемых мер охраны и крепления. Так, характерные размеры сечений выработок и рассматриваемых участков вмещающего массива могут достигать метров или даже десятков метров, в то время как диаметр анкеров и ширина компенсационных щелей имеют размерность на порядок или несколько порядков меньше. Данное обстоятельство значительно усложняет генерацию конечно-элементных сеток и требует разработки специальных гибридных численно-аналитических алгоритмов расчета НДС таких систем (см., например, [17, 18]). Таким образом, расчет НДС сложных горнотехнических систем, представленных на рис. 1, *e, f*, является достаточно сложной задачей. Более того, расчет НДС не является конечным итогом решения задачи об определении устойчивости горнотехнической системы. Для определения устойчивости подземного сооружения на основании рассчитанного НДС выполняется анализ зон ПС.

В табл. 1 приведены физико-механические свойства используемых конструкционных материалов и горных пород, составляющих массив. Данные табл. 1 были использованы при проведении численных экспериментов для расчета НДС рассматриваемых горнотехнических систем.

Алгоритм решения задачи и комплексный критерий предельного состояния. Алгоритм расчета НДС горнотехнических систем рассматриваемого типа на основании метода конечных элементов и применения комплексного критерия предельного состояния описан в [14, 15]. Приведем его ключевые пункты:

¹ Инструкция по охране и креплению горных выработок на Старобинском месторождении. С. 59–67.

² Там же. С. 11.

Т а б л и ц а 1. Физико-механические свойства горных пород и конструкционных материалов

Table 1. Mechanical properties of rocks and structural materials

Порода (материал)	Плотность, кг/м ³	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Предел на сжатие, МПа	Предел на растяжение, МПа	Угол внутреннего трения, рад	Коэффициент сцепления, МПа
Глина аргиллитоподобная	2150	0,5616	0,4	6,30	1,0	0,81	1,25
Каменная соль	2300	22,8	0,19	22,8	1,8	1,047	3,8
Сильвинит	2300	1,64	0,29	32,0	1,0	1,22	2,83
Подстилаяющая соль	2300	2,00	0,35	35,2	2,0	1,10	4,20
Дерево	540	9	0,085	–	–	–	–
Бетон В30	2500	32,5	0,25	30	1	–	–
Сталь С250	7850	210	0,3	250	250	–	–

1) решение задачи об определении естественного НДС рассматриваемой области породного массива;

2) решение задачи об определении НДС породного массива при проходке исследуемой выработки;

3) решение задачи об определении НДС рассматриваемой горнотехнической системы при установке мер охраны и конструктивных элементов подземного сооружения;

4) определение зон предельного состояния во вмещающем массиве с использованием комплексного критерия предельного состояния;

Первые три этапа являются стандартными при решении рассматриваемого класса задач механики горных пород и массивов. Решение модельных задач на данных этапах выполнялось с использованием модели Гука упругого поведения изотропной среды и модели Кулона–Мора, позволяющей выявить в массиве области развитых линий скольжения [11, 12]. Оценка зон предельного состояния на этапе 4 осуществлялась при помощи комплексного критерия предельного состояния, математическая форма записи которого имеет следующий вид [14, 15]:

$$\begin{cases} [\sigma_3 \leq \sigma_c, \varepsilon_3 \leq \varepsilon_c] \text{ при } \mu \in (0,5; 1] \\ [|\sigma_1 - \lambda\sigma_3| \leq \sigma_c, \sqrt{I_2} \leq \alpha I_1 + s, \varepsilon_1 - \varepsilon_3 \leq \varepsilon_c] \text{ при } \mu \in [-0,5; 0,5]. \\ [\sigma_1 \leq \sigma_t, \varepsilon_1 \leq \varepsilon_t] \text{ при } \mu \in (-0,5; -1] \end{cases} \quad (1)$$

Здесь σ_1, σ_3 – минимальное и максимальное главные напряжения; σ_c, σ_t – пределы прочности на сжатие и растяжение; $\varepsilon_1, \varepsilon_3$ – максимальная и минимальная главные деформации; $\varepsilon_c, \varepsilon_t$ – предельные деформации на сжатие и растяжение; $\lambda = \sin\varphi/(1 - \sin\varphi)$; I_1, I_2 – первый и второй инварианты тензора напряжений соответственно; α и s – экспериментально выведенные параметры, зависящие от угла внутреннего трения φ и удельного сцепления C ; μ – коэффициент Надаи–Лоде, вычисляемый по следующей формуле [11, 12]:

$$\mu = \frac{2(\sigma_2 - \sigma_3)}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1. \quad (2)$$

Значения коэффициента Надаи–Лоде находятся в интервале $[-1; 1]$. При этом, если μ принадлежит интервалу $[-1; -0,5)$, то напряженное состояние соответствует состоянию обобщенного растяжения, в интервале $[-0,5; 0,5]$ – состоянию обобщенного сдвига, а в интервале $(0,5; 1,0)$ – состоянию обобщенного сжатия.

Описанный алгоритм является достаточно универсальным и позволяет оценивать прочность, устойчивость и долговечность различных типов подземных горнотехнических сооружений при широком диапазоне горнотехнических условий.

Оценка устойчивости и долговечности исследуемых горных выработок. На рис. 2 приведены картины распределения коэффициента Надаи–Лоде (2) для всех рассматриваемых схем. Видно, что в окрестности выработок в массиве формируется сложное напряженное состояние. Преобладающим является состояние обобщенного сжатия. Вместе с тем присутствуют значительные по размерам зоны обобщенного сдвига и обобщенного растяжения.

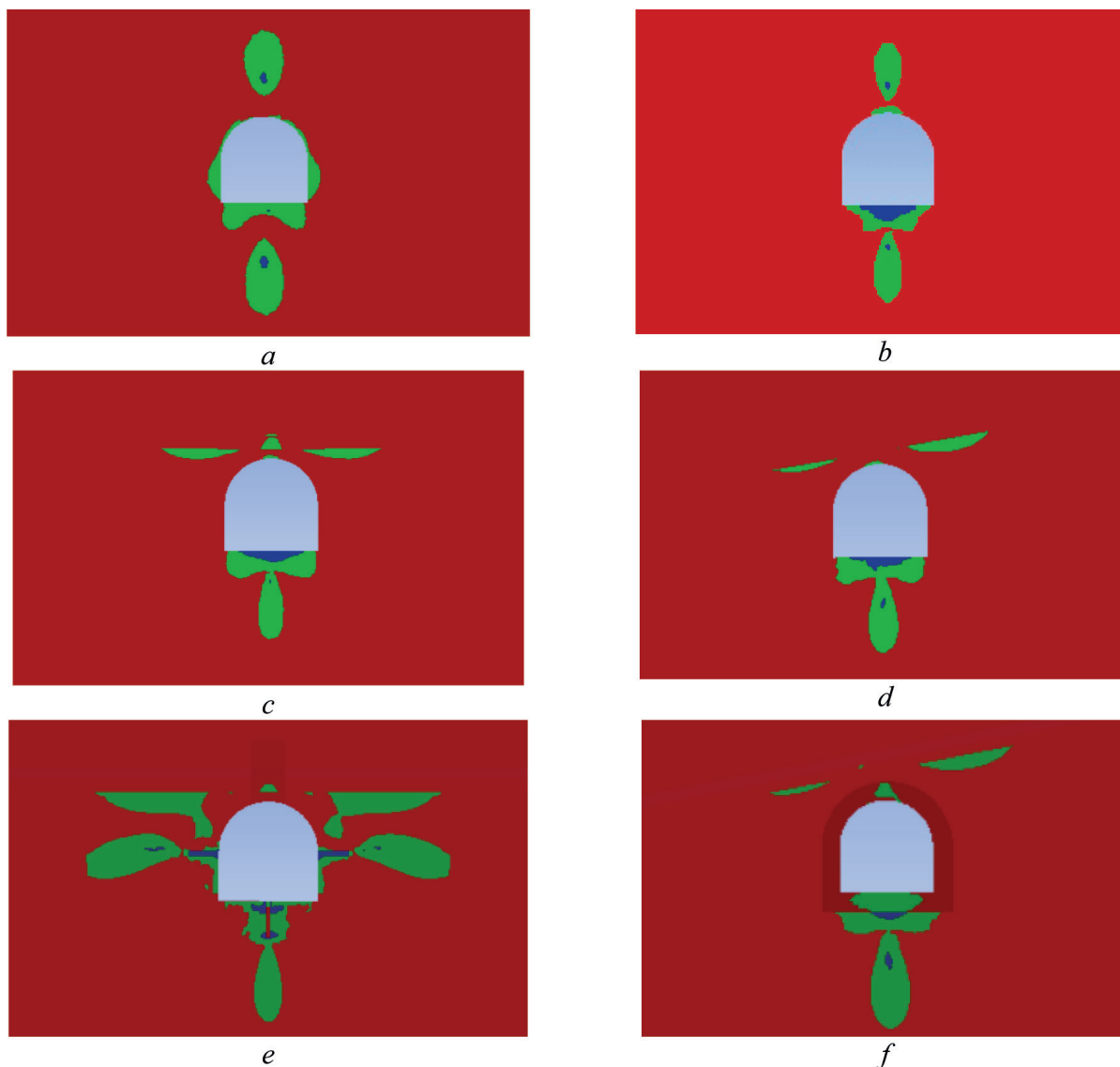


Рис. 2. Распределение коэффициента Надаи–Лоде в окрестности выработок: *a* – в окрестности выработки в мощном слое каменной соли на глубине 600 м; *b* – в окрестности выработки в мощном слое каменной соли на глубине 1200 м; *c* – в окрестности выработки в слоистом соляном массиве на глубине 1200 м; *d* – в окрестности выработки в слоистом соляном массиве на глубине 1200 м с наклонными слоями; *e* – в окрестности выработки в слоистом соляном массиве на глубине 1200 м, охраняемой анкерами и компенсационными щелями; *f* – в окрестности выработки в слоистом соляном массиве с наклонными слоями на глубине 1200 м, закрепленной железобетонной крепью. Красный цвет – зоны обобщенного сжатия, зеленый цвет – зоны обобщенного сдвига, синий цвет – зоны обобщенного растяжения

Fig. 2. Distribution of the Nadai–Lode coefficient in the vicinity of excavations: *a* – in the vicinity of excavation in the rock salt mass at the depths of 600 m; *b* – in the vicinity of excavation in the rock salt mass at the depths of 1200 m; *c* – in the vicinity of excavation in a multilayered salt rock mass at the depths of 1200 m; *d* – in the vicinity of excavation in a multilayered salt rock mass at the depths of 1200 m in the case of inclined layers; *e* – in the vicinity of excavation in a multilayered salt rock mass at the depths of 1200 m supported by anchors and compensational holes; *f* – in the vicinity of excavation in a multilayered salt rock mass at the depths of 1200 m in the case of inclined layers, supported by reinforced concrete. Red colour – zones of generalized compression, green colour – zones of generalized shear, blue colour – zones of generalized tension

Данное обстоятельство подтверждает тот факт, что оценка состояния выработок должна производиться в соответствии с комплексным критерием, а не с использованием только одного какого-то критерия. Отметим, что глубина расположения выработки в массиве влияет на формирование сложного НДС во вмещающем массиве. Чем глубже находится выработка, тем более значительные по размерам зоны обобщенного растяжения формируются в ее подошве, что может

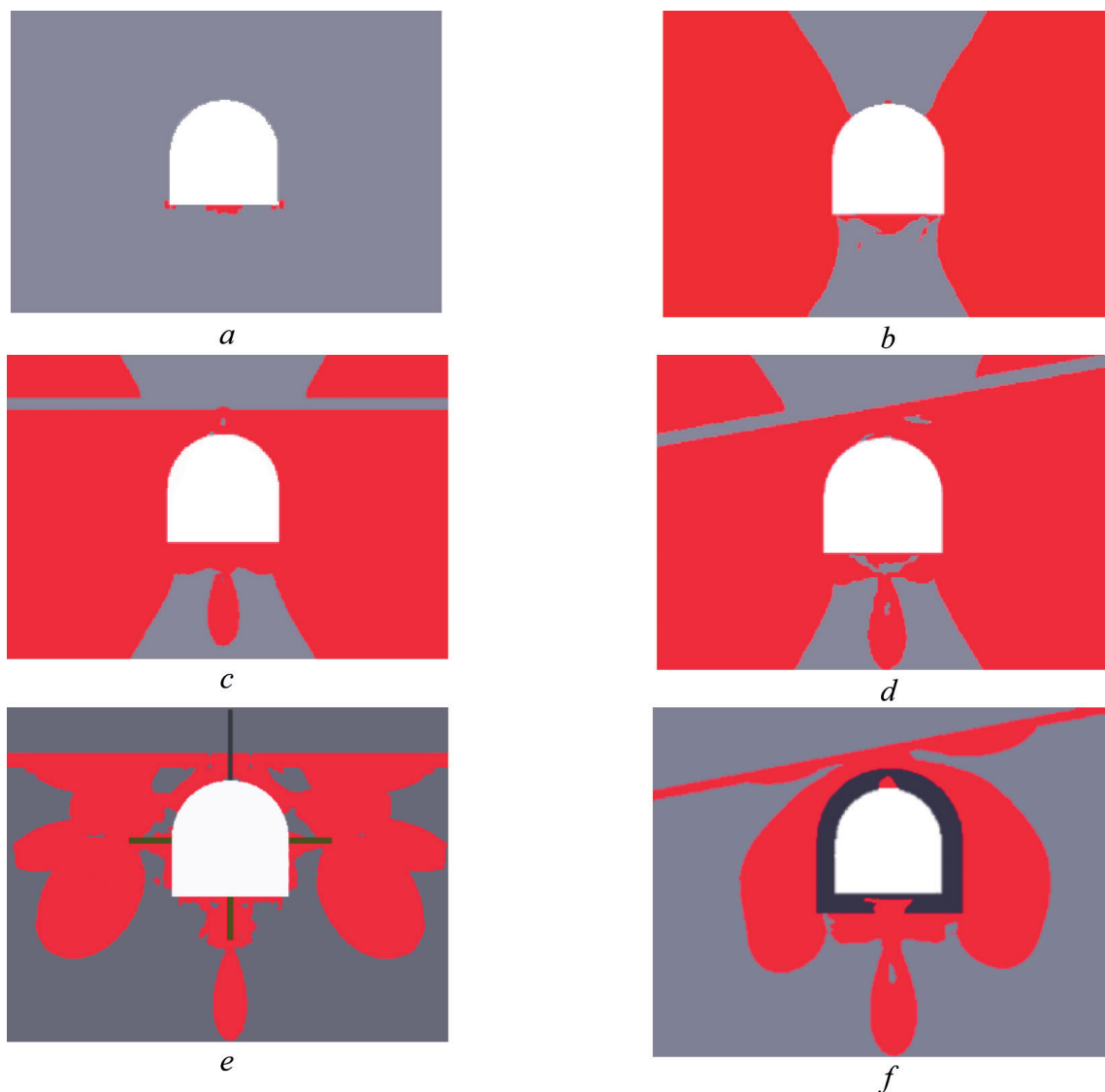


Рис. 3. Распределение зон предельного состояния для всех моделируемых схем горнотехнических систем в соответствии с критерием (1): *a* – в окрестности выработки в мощном слое каменной соли на глубине 600 м; *b* – в окрестности выработки в мощном слое каменной соли на глубине 1200 м; *c* – в окрестности выработки в слоистом соляном массиве на глубине 1200 м; *d* – в окрестности выработки в слоистом соляном массиве на глубине 1200 м с наклонными слоями; *e* – в окрестности выработки в слоистом соляном массиве на глубине 1200 м, охраняемой анкерами и компенсационными щелями; *f* – в окрестности выработки в слоистом соляном массиве с наклонными слоями на глубине 1200 м, закрепленной железобетонной крепью. Красный цвет – зоны предельного состояния, другие цвета – безопасные зоны

Fig. 3. Distribution of the limit state zones for all considered schemes of geotechnical systems according to criterion (1): *a* – in the vicinity of excavation in the rock salt mass at the depths of 600 m; *b* – in the vicinity of excavation in the rock salt mass at the depths of 1200 m; *c* – in the vicinity of excavation in a multilayered salt rock mass at the depths of 1200 m; *d* – in the vicinity of excavation in a multilayered salt rock mass at the depths of 1200 m in the case of inclined layers; *e* – in the vicinity of excavation in a multilayered salt rock mass at the depths of 1200 m supported by anchors and compensational holes; *f* – in the vicinity of excavation in a multilayered salt rock mass at the depths of 1200 m in the case of inclined layers, supported by reinforced concrete. Red colour – limit state zones, other colours – safe zones

обуславливать значительные деформации и смещения породных масс в области подошвы выработки (пучение почвы). Помимо этого, на форму и размеры зон обобщенного сдвига в окрестности выработки оказывает влияние геологическое строение вмещающего массива, что также подтверждается рис. 2.

Оценки зон ПС для всех рассматриваемых горнотехнических систем показаны на рис. 3. Как следует из представленных изображений, предложенная методика оценки состояния подземных горнотехнических систем позволяет определить форму и размеры зон ПС в массиве в окрестности подземной выработки и в ее конструктивных элементах, используемых для охраны и крепления.

В табл. 2 отображены результаты сравнительного анализа размеров зон ПС. На основе выполненных модельных исследований можно сделать вывод о том, что размеры и места локализации зон ПС существенным образом зависят от горнотехнических условий, в которых находится подземное сооружение.

Анализируя результаты численного моделирования (см. рис. 3), можно сделать вывод о том, что отдельные области вмещающего массива в окрестности рассматриваемых выработок относятся к категории устойчивых пород (обозначены на рис. 3 серым цветом), а некоторые области – к категории неустойчивых (обозначены красным цветом). Таким образом, в случае, представленном на рис. 3, *a*, выработка, расположенная на глубине 600 м, является устойчивой. В случаях, показанных на рисунках 3, *b–d*, выработки являются неустойчивыми, поскольку они находятся в массиве неустойчивых породных масс с прогнозируемой мощностью зон нарушения сплошности, превышающих характерный размер сечения выработки. При этом суммарная площадь зон ПС в случае прямых (см. рис. 3, *c*) и наклонных (см. 3, *d*) слоев увеличивается на 11 % и 16 % соответственно (см. табл. 2) в сравнении со случаем отсутствия слоистости (см. рис. 3, *b*, табл. 2).

В ситуациях, изображенных на рис. 3, *e, f*, применяются меры охраны, что уменьшает размеры зон предельного состояния, а также изменяет их форму и локализацию. Применение мер охраны в виде анкеров и компенсационных щелей (см. рис. 3, *e*) снижает площадь зон предельного состояния на 20 % (см. табл. 2), создавая безопасные зоны в окрестности выработки, мощностью, приблизительно равной глубине компенсационных щелей (1,1 м), что повышает устойчивость выработки, особенно в долгосрочной перспективе. Важным в данном случае является то обстоятельство, что, несмотря на наличие достаточно заметных зон ПС, в случае, представленном на рис. 3, *e*, данные зоны локализуются на удалении от контура выработки, что также положительно

Т а б л и ц а 2. Сравнение размеров зон предельного состояния в массиве горных пород в окрестности выработок

T a b l e 2. Comparison of limit state zone size in the vicinity of excavations

Глубина расположения выработки	Максимальный линейный размер зоны предельного состояния в кровле выработки, м	Максимальный линейный размер зоны предельного состояния в подошве выработки, м	Максимальный линейный размер зоны предельного состояния на стенке выработки, м	Общая площадь зоны предельного состояния, м
600 м	–	0,21	0,1	0,2
1200 м	0,08	0,5	> 3	16,4
1200 м в слоистом массиве	0,8	3	> 3	18,4
1200 м в слоистом массиве с наклонными слоями	0,8	3	> 3	19,6
1200 м в слоистом массиве и анкерным креплением	0,7	3,7	> 3	13,1
1200 м в слоистом массиве с наклонными слоями, закрепленная железобетонной крепью	0,7	3,8	> 3	15,4

влияет на устойчивость выработки. Таким образом, применение анкеров и компенсационных щелей в данном случае обеспечивает устойчивость выработки, за исключением некоторых зон неустойчивости в кровле выработки.

При использовании железобетонной постоянной крепи (см. рис. 3, *f*) она возводится в неустойчивом массиве горных пород. Причем напряжения, приходящие на железобетонную крепь со стороны массива, вызывают формирование в ней областей разрушения, обусловленных, главным образом, сдвиговыми напряжениями. Размер зон ПС при данном условии в массиве практически не изменяется. Площадь данных зон в двухметровой окрестности выработки уменьшается только на 6 %. Однако крепь принимает на себя нагрузку со стороны массива. Это свидетельствует о том, что выработка является устойчивой, поскольку полное разрушение крепи не прогнозируется, хотя при этом в кровле и подошве железобетонной крепи могут образовываться незначительные зоны трещиноватости, обусловленные растягивающими напряжениями (см. рис. 3, *f*).

Отметим, что выполненный прогноз верен для рассмотренных выработок, находящихся в конкретных горнотехнических условиях. Вместе с тем описанный алгоритм расчета НДС, определения зон ПС и прогнозирования устойчивости выработок является достаточно общим.

Важный вывод из выполненных исследований состоит в том, что определение НДС в горнотехнической системе не является достаточным для оценки ее прочности, устойчивости или долговечности. Для того чтобы выполнить такой прогноз, необходимо сначала оценить зоны ПС по комплексному критерию, а затем уже исследовать устойчивость горнотехнической системы, взяв в расчет размеры зон предельного состояния, и построить новые специальные модельные расчетные схемы. В частности, в зонах ПС следует учитывать формирование дискретной структуры массива, то есть переход массива в новое структурное состояние. Сделать это можно, например, при помощи решения локальных задач в таких зонах методом блочных элементов [19, 20]. Это позволит напрямую смоделировать поведение массива в зонах ПС и оценить не только устойчивость пород, но и вычислить фактическую мощность вывалов породы. Определение формирования блочной среды в зонах ПС при этом можно при помощи критериев трещиноватости.

Заключение. В статье описан алгоритм оценки устойчивости и долговечности подземных сооружений, находящихся в различных горнотехнических условиях. Данный алгоритм основан на использовании комплексного критерия оценки ПС массивов горных пород. Эффективность работы предложенного алгоритма продемонстрирована на примере решения серии задач по оценке устойчивости одиночной выработки, находящейся в различных горнотехнических условиях с различными мерами охраны.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. В окрестности подземных выработок формируется сложное НДС, которое включает в себя как зоны обобщенного сдвига, так и зоны обобщенного растяжения и сжатия. Данный факт обуславливает необходимость оценки ПС и устойчивости горнотехнических систем в соответствии с комплексным критерием предельного состояния.

2. Горно-геологическое строение массива, применение различных мер охраны и глубина расположения выработки оказывают существенное влияние на формирование сложного НДС, что, в свою очередь, значительно сказывается на устойчивости выработок.

3. При одинаковом поперечном сечении определяющим фактором формирования в массиве зон ПС является глубина расположения выработки.

4. Значимым фактором, существенно влияющим на формирование зон ПС в массиве горных пород с подземным сооружением, является горно-геологическое строение массива и физико-механические свойства слоев. В частности, показано, что размеры зон ПС увеличиваются на 11–16 % в случае наличия слоистости в кровле массива по сравнению со случаем монолитного вмещающего массива. Таким образом, слоистое строение массива в кровле выработок снижает их устойчивость.

5. Применение различных мер охраны оказывает значительное влияние на повышение устойчивости выработок. Так, использование анкеров и компенсационных щелей снижает размеры зон ПС на 20 %, а также изменяет форму и локализацию этих зон даже в неблагоприятных горнотехнических условиях (при наличии прослоек пластичной глины с низкими прочностными характеристиками). В частности, применение компенсационных щелей обеспечивает удаление зон ПС от контура выработки, что положительно сказывается на ее устойчивости. Применение железобетонной крепи снижает размеры зон ПС на 6 %, однако данная крепь способна удерживать породный массив даже в случае вывалов. При этом в самой крепи могут образовываться незначительные зоны трещиноватости, обусловленные растягивающими напряжениями. Однако наличие упомянутых зон не приводит к переходу всей крепи в предельное состояние, что обеспечивает устойчивость выработки в данном случае. Таким образом, очевидно, что использование мер охраны позволяет повысить устойчивость выработок, особенно в долгосрочной перспективе.

6. Определение НДС в горнотехнической системе не является достаточным для оценки ее устойчивости или долговечности. Авторы предлагают учитывать формирование дискретной структуры массива при помощи решения локальных задач в зонах ПС методом блочных элементов, а формирование блочной среды в зонах ПС определять при помощи критериев трещиноватости.

Предложенный алгоритм оценки устойчивости горнотехнических систем может быть использован для обеспечения безопасности и надежности ведения горных работ на калийных месторождениях. В частности, с использованием данного алгоритма можно проводить расчеты устойчивости других подземных сооружений, имеющих более сложную пространственную геометрию.

Список использованных источников

1. Stability Assessment for Underground Excavations and Key Construction Techniques / Hanhua Zhu [et al.]. – Springer, 2017. – 174 p. <http://doi.org/10.1007/978-981-10-3011-6>
2. Stability of Geotechnical Structures: Theoretical and Numerical Analysis / Y. M. Cheng [et al.]. – Bentham Science Publ., 2017. – 411 p. <http://doi.org/10.2174/97816810830321160101>
3. Sloan, S. W. Geotechnical stability analysis / S. W. Sloan // Geotechnique. – 2013. – Vol. 63, Iss. 7. – P. 531–571. <http://doi.org/10.1680/geot.12.RL.001>
4. Gudehus, G. On the stability of geotechnical systems and its fractal progressive loss / G. Gudehus, A. Touplikiotis // Acta Geotech. – 2018. – Vol. 13, Iss. 2. – P. 317–328. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0549-x>
5. Predicting the excavation damaged zone within brittle surrounding rock masses of deep underground caverns using a comprehensive approach integrating *in situ* measurements and numerical analysis / D. P. Xu [et al.] // Geoscience Frontiers. – 2022. – Vol. 13, Iss. 2. – Art. ID 101273. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101273>
6. A numerical study on mechanical behavior of jointed rock masses after tunnel excavation / W. Zhang [et al.] // Arab. J. Geosci. – 2020. – Vol. 13. – Art. ID 416. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05358-y>
7. Azarfar, B. Stability analysis of rock structure in large slopes and open-pit mine: numerical and experimental fault modeling / B. Azarfar, S. Ahmadvand, J. Sattarvand // Rock Mech. Rock Eng. – 2019. – Vol. 52, № 12. – P. 4889–4905. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01915-4>
8. Time-dependent crack development processes around underground excavations / Penghai Deng [et al.] // Tunneling and Underground Space Technology. – 2020. – Vol. 103. – Art. ID 103518. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103518>
9. Qiang Feng. Analytical solution for stress and deformation of the mining floor based on integral transform / Feng Qiang, Jiang Binsong // Int. J. Sci. Technol. – 2015. – Vol. 25, Iss. 4. – P. 581–586. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.05.010>
10. Liu, K. Analytical and numerical analyses of tunnel excavation problem using an extended Drucker–Prager model / K. Liu, S. L. Chen, X. Q. Gu // Rock Mech. Rock Eng. – 2020. – Vol. 53, Iss. 2. – P. 1777–1790. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01992-5>
11. Упругопластическое деформирование и предельное состояние элементов конструкций с концентраторами напряжений / М. Д. Новопащин [и др.]; под ред. В. Р. Кузьмина. – Новосибирск: Наука, 1995. – 112 с.
12. Фисенко, Г. Л. Предельное состояние горных пород вокруг выработок / Г. Л. Фисенко. – М.: Недра, 1976. – 272 с.

13. Debasis, Deb. *Fundamentals and Applications of Rock Mechanics* / Deb. Debasis, V. A. Kumar. – New Delhi: PHI Learning, 2016. – 492 p.
14. Лопатин, С. Н. Предельное состояние массивов горных пород с подземными сооружениями: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.04 / С. Н. Лопатин. – Минск, 2023. – 181 л.
15. Zhuravkov, M. A. Complex limit state criterion for rock masses / M. A. Zhuravkov, S. N. Lapatsin, S. Ji // *Acta Mech. Sinica*. – 2023. – Vol. 39, Iss. 1. – Art. ID 722194. <https://doi.org/10.1007/s10409-022-22194-x>
16. Substantiating arched support made of composite materials (carbon fiber-reinforced plastic) for mine workings in coal mines / V. I. Bondarenko [et al.] // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* – 2022. – Vol. 1049. – Art. ID 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012026>
17. Миренков, В. Е. Формулировка граничных условий в задачах геомеханики / В. Е. Миренков // *Изв. высш. учеб. заведений. Горн. журнал*. – 2016. – № 2. – С. 67–73.
18. Ставрогин, А. Н. Пластичность горных пород / А. Н. Ставрогин, А. Г. Протосеня. – М.: Недра, 1979. – 301 с.
19. Sharma, V. M. *Distinct Element Modelling in Geomechanics* / V. M. Sharma, K. R. Saxena, R. D. Woods. – CRC Press, 2007. – 234 p.
20. The Stability and Failure of Deep Underground Structures at Potash Mining Deposits / Y. Zhang [et al.] // *Appl. Sci.* – 2024. – Vol. 14. – Art. ID 9434. <https://doi.org/10.3390/app14209434>

References

1. Hanhua Zhu, Mengchong Chen, Yu Zhao, Fusheng Niu. *Stability Assessment for Underground Excavations and Key Construction Techniques*. Springer, 2017. 174 p. <http://doi.org/10.1007/978-981-10-3011-6>
2. Cheng Y. M., Wong H., Leo C. J., Lau C. K. *Stability of Geotechnical Structures: Theoretical and Numerical Analysis*. Bentham Science Publ., 2017. 411 p. <http://doi.org/10.2174/97816810830321160101>
3. Sloan S. W. Geotechnical stability analysis. *Geotechnique*, 2013, vol. 63, iss. 7, pp. 531–571. <http://doi.org/10.1680/geot.12.RL.001>
4. Gudehus G., Touplikiotis A. On the stability of geotechnical systems and its fractal progressive loss. *Acta Geotechnica*, 2018, vol. 13, iss. 2, pp. 317–328. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0549-x>
5. Xu D. P., Huang X., Li S. J., Xu H.S., Qiu S. L., Zheng H., Jiang Q. Predicting the excavation damaged zone within brittle surrounding rock masses of deep underground caverns using a comprehensive approach integrating *in situ* measurements and numerical analysis. *Geoscience Frontiers*, 2022, vol. 13, iss. 2, art. ID 101273. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101273>
6. Zhang W., Xu B., Mei J., Yue G., Shi W. A numerical study on mechanical behavior of jointed rock masses after tunnel excavation. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, vol. 13, art. ID 416. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05358-y>
7. Azarfar B., Ahmadvand S., Sattarvand J. Stability analysis of rock structure in large slopes and open-pit mine: numerical and experimental fault modeling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, vol. 52, no. 12, pp. 4889–4905. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01915-4>
8. Penghai Deng, Quansheng Liu, Hao Ma, Fan He, Qi Liu. Time-dependent crack development processes around underground excavations. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2020, vol. 103, art. ID 103518. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103518>
9. Feng Qiang, Jiang Binsong. Analytical solution for stress and deformation of the mining floor based on integral transform. *International Journal of Science and Technology*, 2015, vol. 25, iss. 4, pp. 581–586. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.05.010>
10. Liu K., Chen S. L., Gu X. Q. Analytical and numerical analyses of tunnel excavation problem using an extended Drucker–Prager model. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, vol. 53, no. 2, pp. 1777–1790. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01992-5>
11. Novopashin M. D. *Elastoplastic Deformation and Limit State of Structural Elements with Stress Concentrations*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1995. 112 p. (in Russian).
12. Fisenko G. L. *Limit State of Rock Masses in the Vicinity of Workings*. Moscow, Nedra Publ., 1976. 272 p. (in Russian).
13. Debasis Deb., Kumar V. A. *Fundamentals and Applications of Rock Mechanics*. New Delhi, PHI Learning, 2016. 492 p.
14. Lapatsin S. N. *Limit State of Rock Massifs with Underground Structures* [dissertation]. Minsk, 2023. 181 p. (in Russian).
15. Zhuravkov M. A., Lapatsin S. N., Ji S. Complex limit state criterion for rock masses. *Acta Mechanica Sinica*, 2023, vol. 39, iss. 1, art. ID 722194. <https://doi.org/10.1007/s10409-022-22194-x>
16. Bondarenko V. I. Substantiating arched support made of composite materials (carbon fiber-reinforced plastic) for mine workings in coal mines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1049, art. ID 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012026>

17. Mirenkov V. E. Formulation of boundary conditions in geomechanics problems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*, 2016, no. 2, pp. 67–73 (in Russian).
18. Stavrogin A. N., Protosenya A. G. *Plasticity of Rocks*. Moscow, Nedra Publ., 1979. 301 p. (in Russian).
19. Sharma V. M., Saxena K. R., Woods R. D. *Distinct Element Modelling in Geomechanics*. CRC Press. 2007. 234 p.
20. Zhang Y., Lapatsin S., Zhurvakov M., Yu G., Karpovich I. The Stability and Failure of Deep Underground Structures at Potash Mining Deposits. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, art. ID 9434. <https://doi.org/10.3390/app14209434>