

ВЕСЦІ НАЦЫЯНАЛЬнай АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. 2023. Т. 68, №2

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. 2023. Т. 68, №2

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)*

Г л а в н ы й р е д а к т о р

Сергей Антонович Чижик –

Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Р е д а к ц и о н н а я к о л л е г и я

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

И. А. Старостина (ведущий редактор журнала)

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

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

А. Ф. Ильющенко – Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии –
Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, Минск, Республика Беларусь

Б. Каталиннич – Центрально-Европейское отделение Международной инженерной академии, Вена,
Австрийская Республика

- 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. Ласковнѐв** – 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. К. Мышкин** – Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Республика Беларусь
- О. Г. Пенязьков** – 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

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

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ.

Серия физико-технических наук. 2023. Т. 68, №2

Выходит на русском, белорусском и английском языках

Редактор *И. А. Старостина*
Компьютерная верстка *И. В. Счеснюк*

Подписано в печать 19.06.2023. Выход в свет 27.06.2023. Формат 60 × 84 ¹/₈. Бумага офсетная.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 68 экз. Заказ 134.
Цена номера: индивидуальная подписка – 12,66 руб., ведомственная подписка – 29,74 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»,
Вестці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук, 2023

PROCEEDINGS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

PHYSICAL-TECHNICAL SERIES, 2023, vol. 68, no. 2

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
(Associate Editor-in-Chief)

Irina A. Starostsina (lead editor)

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

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

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

Sergei M. Kostromitsky – Radio Engineering Center 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 G. Kravtsov – Presidium 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

Nikolai K. Myshkin – V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

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

Address of the Editorial Office:

I, 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, 2023, vol. 68, no. 2

Printed in Russian, Belarusian and English languages

Editor *I. A. Starostina*

Computer imposition *I. V. Schasniuk*

It is sent of the press 19.06.2023. Appearance 27.06.2023. Format $60 \times 84 \frac{1}{8}$. Offset paper. The press digital.

Printed pages 10,23. Publisher's signatures 11,3. Circulation 68 copies. Order 134.

Number price: individual subscription – 12,66 byn., departmental subscription – 29,74 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, 2023

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

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

- Желудкевич А. Л., Говор Г. А., Ларин А. О., Демиденко О. Ф., Федосюк В. М., Тишкевич Д. И., Бердиев У. Т., Хасанов Ф. Ф., Сунь Хайбо, Чен Дунчу.** Магнитомягкие композиты на основе порошков железа для создания компонентов двухстаторного комбинированного электродвигателя *(на английском языке)* 95
- Миширук О. М., Веремейчик А. И., Девойно О. Г., Нерода М. В., Холодарь Б. Г.** Влияние режимов лазерной закалки на свойства стали 40X13 103
- Рубаник В. В., Багрец Д. А., Рубаник В. В., м.л., Урбан В. И., Дородейко В. Г.** Моделирование деформационного поведения TiNi-сплава с TiN-покрытиями для медицинского применения 113

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

- Жданович Ч. И., Плищ В. Н.** Выбор количества и расположения поддерживающих катков гусеничного трактора на основании анализа колебаний верхней ветви резиноармированной гусеницы 121

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

- Смагина М. Н., Смагин Д. А.** Теплообмен во влажных капиллярно-пористых телах различного состава при конвективном нагревании в паровоздушных средах 137

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

- Ревинская И. И., Камлач П. В., Лещевич Е. И.** Аппаратно-программный комплекс для исследования объемных параметров дыхания *(на английском языке)* 149
- Волчѣк В. С., Стемпицкий В. Р.** Эксплуатационные характеристики транзистора с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия с теплоотводящими элементами на основе нитрида бора *(на английском языке)* 156
- Солонар А. С., Цуприк С. В., Хмарский П. А.** Влияние способа формирования опорного изображения на эффективность бортовой корреляционно-экстремальной системы сопровождения наземных объектов 167

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

- Zheludkevich A. L., Govor G. A., Larin A. O., Demidenko O. F., Fedosyuk V. M., Tishkevich D. I., Berdiev U. T., Khasanov F. F., Sun Haibo, Chen Dongchu.** Magnetically soft composites based on iron powders for creating components of a two-stator combined electric motor 95
- Mishchiruk O. M., Verameichyk A. I., Devoino O. G., Neroda M. V., Kholodar B. G.** Influence of laser hardening modes on the properties of 40X13 steel 103
- Rubanik V. V., Bahrets D. A., Rubanik V. V., jr., Urban V. I., Dorodeiko V. G.** Simulation of deformation behavior of TiNi alloy with TiN coatings for medical applications. 113

MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS

- Zhdanovich Ch. I., Plishch V. N.** Selecting number and location of support rollers of crawler tractor based on analysis of vibrations of upper branch of rubber track. 121

POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

- Smagina M. N., Smagin D. A.** Heat exchange in wet capillary-porous bodies of various compositions during convective heating in vapor-air media 137

RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING

- Revinskaya I. I., Kamlach P. V., Liashchevich E. I.** Hardware-software complex for studying of breathing volume parameters 149
- Volcheck V. S., Stempitsky V. R.** Device characterization of gallium nitride high electron mobility transistor with a boron nitride heat-spreading element 156
- Solonar A. S., Tsuprik S., Khmarskiy P. A.** Influence of the reference image formation method on the efficiency of the onboard correlation-extreme tracking system for tracking ground objects 167

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

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ
MATERIALS SCIENCES AND ENGINEERING, METALLURGY

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-95-102>
UDC 537.622.4:621.318.1



Original article

**Aliaksandr L. Zhaludkevich^{1*}, Gennady A. Govor¹, Artsiom O. Larin¹, Olga F. Demidenko¹,
Valery M. Fedosyuk¹, Daria I. Tishkevich¹, Usan T. Berdiev², Fazil F. Khasanov²,
Sun Haibo³, Chen Dongchu³**

¹*Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus,
19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus*

²*Tashkent State Transport University,
1, Adylhodzhaev Str., 100167, Tashkent, Republic of Uzbekistan*

³*School of Materials Science and Hydrogen Energy, Foshan University,
18, Jiangwan 1st Rd, Chancheng Qu, 528000, Foshan, China*

**MAGNETICALLY SOFT COMPOSITES BASED ON IRON POWDERS FOR CREATING
COMPONENTS OF A TWO-STATOR COMBINED ELECTRIC MOTOR**

Abstract. An experimental prototype of electric motor on permanent (FeNdB) magnets with switchable magnetic flux with two sectioned stators and a rotor using SMC material based on encapsulated metal powders has been developed. The method of manufacture of magnetic cores by powder metallurgy method on the basis of magnetically soft encapsulated titanium dioxide composites has been developed, including computer modeling of magnetic cores components, creation of tooling for their manufacture by pressing and selection of technological modes of pressing. Press set for manufacturing stator components by pressing in the form of a mold was made of hardened 5XHB steel. With its use magnetic components for two-stator combined electric motor are pressed. The main electromagnetic characteristics of the components were measured with an express magnetometer. Complex studies showed that the magnetic components have sufficient strength and the necessary electromagnetic characteristics to create a two-stator combined electric motor of this type. An experimental sample of electric motor with maximum power of 15 kW was created on the basis of manufactured magnetic components. Advantages of composite material over electrical steel and other soft magnetic alloys allow providing their wider application in electric machines in order to increase specific power at high speed of rotation with less losses.

Keywords: magnetically soft composites, insulating coatings, electromagnetic losses, magnetic permeability, electric motor

Acknowledgements. This research was funded by the Guangdong Provincial Science and Technology Program (grant No. 2022A05050082) and by the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (projects No. T21UZBG-023).

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

Information about the authors: *Aliaksandr L. Zhaludkevich** – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Head of Laboratory of Physics of Magnetic Materials, Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0003-1900-0564>. E-mail: zhaludkevich27@gmail.com; *Gennady A. Govor* – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Physics of Magnetic Materials, Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: govor@physics.by; *Artsiom O. Larin* – Researcher of the Laboratory of Physics of Magnetic Materials, Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: new_a-larin@mail.ru; *Olga F. Demidenko* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Physics of Magnetic Materials, Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0002-6201-6281>. E-mail: orion_minsk@tut.by; *Valery M. Fedosyuk* – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, General Director, Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: fedosyuk@physics.by;

* Corresponding author / Автор, ответственный за переписку.

Daria I. Tishkevich – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Senior Researcher of the Laboratory of Physics of Magnetic Films, Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0001-9774-8522>. E-mail: dashachushkova@gmail.com; *Usan T. Berdiev* – Cand. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Electrical Engineering, Tashkent State Transport University. E-mail: berdiev1962@inbox.ru; *Fazil F. Khasanov* – Assistant of the Department of Electrical Engineering, Tashkent State Transport University. E-mail: tashiit_rektorat@mail.ru; *Sun Haibo* – Dr. Sci., Associate Professor, School of Materials Science and Hydrogen Energy, Foshan University. E-mail: sunmyseven@126.com; *Chen Dongchu* – Dr. Sci., Dean, School of Materials Science and Hydrogen Energy, Foshan University. E-mail: Chendc@fosu.edu.cn

Contribution of the authors: *Aliaksandr L. Zheludkevich* – concept description, experimental research design, manuscript text writing; *Gennady A. Govor* – research planning, data collection and systematization, comparative analysis; *Artsiom O. Laryn* – instrumental research, data collection and systematization; *Olga F. Demidenko* – analysis and synthesis of literature data, application of statistical and mathematical methods for data analysis; *Valery M. Fedosyuk* – interpretation of research results, editing the manuscript text; *Daria I. Tishkevich* – generalization of research results, editing the manuscript text; *Usan T. Berdiev* – interpretation and generalization of research results; *Fazil F. Khasanov* – work with graphic material; *Sun Haibo* – development of prototype design, accumulation of research data, modeling (computer, mathematical); *Chen Dongchu* – modeling (computer, mathematical), manuscript text editing.

For citations: Zheludkevich A. L., Govor G. A., Larin A. O., Demidenko O. F., Fedosyuk V. M., Tishkevich D. I., Berdiev U. T., Khasanov F. F., Sun Haibo, Chen Dongchu. Magnetically soft composites based on iron powders for creating components of a two-stator combined electric motor. *Vestsi Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 2, pp. 96–102. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-95-102>

Received: 12.04.2023

Approved for printing: 25.05.2023

Оригинальная статья

А. Л. Желудкевич^{1*}, Г. А. Говор¹, А. О. Ларин¹, О. Ф. Демиденко¹, В. М. Федосюк¹,
Д. И. Тишкевич¹, У. Т. Бердиев², Ф. Ф. Хасанов², Сунь Хайбо³, Чен Дунчу³

¹Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь

²Ташкентский государственный транспортный университет,
ул. Адылходжаева, 1, 100167, Ташкент, Республика Узбекистан

³Школа материаловедения и водородной энергетики Фошаньского университета,
Цзяннань 1-я ул., 18, Чанченг, 528000, Фошань, Китай

МАГНИТОМЯГКИЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВ ЖЕЛЕЗА ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПОНЕНТОВ ДВУХСТАТОРНОГО КОМБИНИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Аннотация. Разработан экспериментальный образец электродвигателя с переключаемым магнитным потоком с двумя секционированными статорами и ротором на постоянных (FeNdB) магнитах с применением SMC-материала на основе капсулированных металлических порошков. Создана методика изготовления магнитопроводов на основе магнитомягких капсулированных диоксидом титана композитов методом порошковой металлургии, включающая в себя компьютерное моделирование компонентов магнитопроводов, создание оснастки для их изготовления методом прессования и выбор технологических режимов прессования. Оснастка для компонентов статора методом прессования в виде пресс-формы изготовлена из закаленной стали 5ХНВ. С ее применением спрессованы магнитные компоненты для двухстаторного комбинированного электродвигателя. Основные электромагнитные характеристики компонентов измерены с помощью экспресс-магнетометра. Комплексные исследования показали, что магнитные компоненты обладают достаточной прочностью и необходимыми электромагнитными характеристиками для создания двухстаторного комбинированного данного типа электродвигателя. На основе изготовленных магнитных компонентов создан экспериментальный образец электродвигателя с максимальной расчетной мощностью 15 кВт. Преимущества композиционного материала перед электротехнической сталью и другими магнитомягкими сплавами позволяют обеспечить более широкое их применение в электрических машинах с целью повышения удельной мощности при высокой скорости вращения с меньшими потерями.

Ключевые слова: магнитомягкие композиты, изолирующие покрытия, электромагнитные потери, магнитная проницаемость, электродвигатель

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Программы науки и технологий провинции Гуандун (грант № 2022A050505082) и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № T21УЗБГ-023).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Желудкевич Александр Ларионович** – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией физики магнитных материалов, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. <https://orcid.org/0000-0003-1900-0564>. E-mail: zheludkevich27@gmail.com; *Говор Геннадий Антонович* – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник

лаборатории физики магнитных материалов, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. E-mail: govor@physics.by; *Ларин Артем Олегович* – научный сотрудник лаборатории физики магнитных материалов, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. E-mail: new_a-larin@mail.ru; *Демиденко Ольга Федоровна* – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории физики магнитных материалов, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. <https://orcid.org/0000-0002-6201-6281>. E-mail: orion_minsk@tut.by; *Федосюк Валерий Михайлович* – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор физико-математических наук, профессор, генеральный директор, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. E-mail: fedosyuk@physics.by; *Тишкевич Дарья Ивановна* – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. <https://orcid.org/0000-0001-9774-8522>. E-mail: dashachushkova@gmail.com; *Бердиев Усан Турдиевич* – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники, Ташкентский государственный транспортный университет. E-mail: berdiev1962@inbox.ru; *Хасанов Фазил Фархад оглы* – ассистент кафедры электротехники, Ташкентский государственный транспортный университет. E-mail: tashiit_rektorat@mail.ru; *Сунь Хайбо* – доктор наук, доцент, Школа материаловедения и водородной энергетики Фошаньского университета. E-mail: sunmyseven@126.com; *Чен Дунчу* – доктор наук, декан, Школа материаловедения и водородной энергетики Фошаньского университета. E-mail: Chende@fosu.edu.cn

Вклад авторов: *Желудкевич Александр Ларионович* – обоснование концепции, разработка дизайна экспериментального исследования, написание текста рукописи; *Говор Геннадий Антонович* – планирование исследования, сбор и систематизация данных, проведение сравнительного анализа; *Ларин Артем Олегович* – проведение инструментальных исследований, сбор и систематизация данных; *Демиденко Ольга Федоровна* – анализ и обобщение данных литературы, применение статистических, математических методов для анализа данных; *Федосюк Валерий Михайлович* – интерпретация результатов исследования, редактирование текста рукописи; *Тишкевич Дарья Ивановна* – обобщение результатов исследования, редактирование текста рукописи; *Бердиев Усан Турдиевич* – интерпретация результатов исследования, обобщение результатов исследования; *Хасанов Фазил Фархад оглы* – работа с графическим материалом; *Сунь Хайбо* – разработка дизайна прототипа, аккумулирование исследовательских данных, моделирование (компьютерное, математическое); *Чен Дунчу* – моделирование (компьютерное, математическое), редактирование текста рукописи.

Для цитирования: Магнитомягкие композиты на основе порошков железа для создания компонентов двухстороннего комбинированного электродвигателя / А. Л. Желудкевич [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэх. навук. – 2023. – Т. 68, № 2. – С. 95–102. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-95-102>

Поступила в редакцию: 12.04.2023

Утверждена к печати: 25.05.2023

Introduction. In today's environment, electric motors play a very important role for both industrial and domestic applications. With the continuing trend of development of electric transport, more and more requirements are placed on electric motors, such as increased specific power with good heat dissipation, high reliability, cost-effectiveness, etc. [1]. In order to create new types of high-performance electric motors in the world, many scientific teams develop new electromagnetic materials [2]. Over the past years, various types of magnetic materials, such as pure iron-based and its alloys, such as Fe-Ni, Fe-Ni-P, Fe-Nd-B, Fe-Si and Fe-Si-Cr, etc., have been used [3–8]. An information analysis of a large amount of data on the study of technological schemes for obtaining powder magnetically soft materials and the study of the magnetic and physico-mechanical properties of experimental samples shows that one of the promising directions for the further development of such materials is the creation of materials based on nanocrystalline powders [9]. A unique combination of magnetic properties is observed in nanocrystalline alloys based on the Fe-Si-B system of the “Finemet” type ($\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$) [10] with a mixed amorphous-crystalline structure and a grain size of ~ 10 nm, which makes it possible to obtain saturation induction not less than 1.0 T and high initial magnetic permeability. The absence of a domain structure ensures a low coercive force (5–10 A/m), a correspondingly small area of the hysteresis loop, and, as a consequence, low magnetization reversal losses in such materials [11].

Among many advanced magnetic materials, magnetically soft composite (SMC) seems very promising for the development of new electric motors due to its unique properties such as magnetic and thermal isotropy, very low eddy current losses and the prospect of inexpensive mass production [12–14]. SMC can be described as particles of ferromagnetic powder surrounded by an electrically insulating coating [9]. SMC components are typically manufactured by powder metallurgy methods in combination with new technologies such as two-step pressing, hot pressing, multi-stage and magnetic annealing followed by heat treatment at relatively low temperatures. Using proven powder metallurgy methods, SMC components can be pressed to the desired shape and size in the mold, so no further processing is required and production costs can be significantly reduced [15, 16].

These composites have a number of advantages over traditional multi-layer cores based on electrical steel. They have unique properties that include: three-dimensional (3D) isotropic ferromagnetic behavior, very low eddy current losses, relatively low total core losses at medium and high frequencies, opportunities to improve thermal performance, simplified motor design and assembly, and prospects for significantly reduced weight and manufacturing costs. With such composites it is possible to reduce the weight and size of electrical engine components. Magnetic isotropy and negligible eddy current losses offer great design advantages as the limitations of electrical steel are removed. Radically different configurations can be used to make full use of space, resulting in a very high power density or power-to-volume ratio [17, 18].

The laminated sheet metal core has a much lower thermal conductivity in the direction perpendicular to the lamination plane than the thermal conductivity inside the laminated sheet, so the heat in laminated cores is almost completely transferred to the lamination edge. SMC cores dissipate heat in all directions, which provides high flexibility in thermal design [19]. In addition, most attractive advantage of SMC may be its environmental friendliness. Material waste in production is kept to a minimum. In addition, used SMC-based motors can easily be shredded to separate and reuse valuable materials such as copper, providing much better recyclability than laminated steel-based motors.

Worldwide industry standards determine magnetic properties only for individual sheets of electrical steel [20]. However, measurements are made for an individual sheet before it is laid, and it is known that there are discrepancies between calculated values and actual measurements of motor performance [21]. This is because the magnetic properties are degraded due to deformation caused by stress and thermal deformation that occurs during stamping, caulking and welding. On the other hand, the SMC magnetic properties are measured on a sample created using the same compacting method as the final product. Thus, the gaps between the design values and the actual motor performance measurements are small. In addition, the SMC has excellent high-frequency characteristics. So, the SMC used in the motor can suppress the high-frequency noise generated by the inverter [22–25].

The most common approach to increasing the torque of power systems is to use electric motors with an external rotor and mechanical gears. However, the use of a mechanical gear leads to a decrease in drive power and creates additional problems with lubrication, cooling and maintenance of the mechanical gear [26]. It is more convenient to use a combination of two stators and one rotor in one electric motor with double air gap [27–29]. This motor has a variety of applications, with higher power and torque. The use of two stators further increases reliability, in addition, two stators can potentially reduce torque ripple. Synchronous motors are widely used because of their high efficiency and ease of control, and they have the advantages of simple design and control.

This paper focuses on the development of a switchable magnetic flux motor with two sectioned stators and a rotor on permanent (NdFeB) magnets using SMC material based on encapsulated metal powders.

Experimental results. As the base of the obtained magnetically soft composite, the extra pure Swedish water-atomized iron powder ABC100.30 was chosen. An insulating layer was deposited on the surface of the powder particles using a combined technique [30]. The thickness of the coatings depended on the deposition time on the powder particles and the concentration of the alcoholic acid solution. The advantage of the above technique of oxide coatings obtaining by decomposition of metal sulfates and nitrides is its relative simplicity and low cost [31].

Measurement of composites electromagnetic characteristics was carried out in a wide range of magnetic fields change at a frequency of 1 kHz using an express magnetometer developed and manufactured in the laboratory of physics of magnetic materials. From the field dependencies of magnetization obtained with the express magnetometer (Figure 1), the value of electromagnetic losses and the value of induction were calculated. In our case, eddy currents are practically absent due to the insulating of each powder particle by titanium dioxide oxide layer. Thus, with increasing magnetic induction the value of electromagnetic losses increases almost linearly (Figure 2) due to hysteresis losses in the entire measurement range. For induction $B = 1.9$ T the hysteresis losses in composites are $P = 105$ W/kg which is lower than similar losses of electrical steel $P = 120$ W/kg. It can be concluded from the data analysis that the developed composite magnetically soft materials have a high value of magnetic induction of 1.88 T in the field of 21 kA/m.

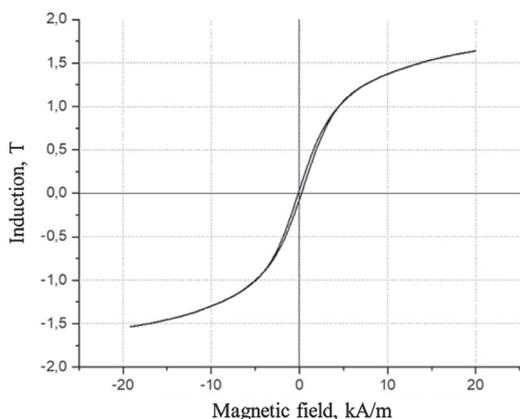


Figure 1. Magnetization loops at 1 kHz of titanium oxide-encapsulated composite

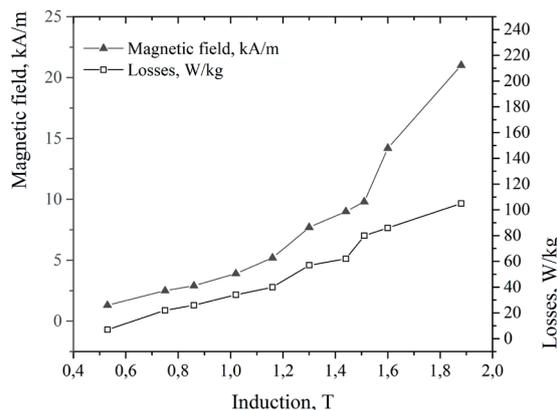


Figure 2. Magnetization dependences measured at 1 kHz and field dependencies of hysteresis losses for a composite based on iron powder encapsulated with titanium oxide coating

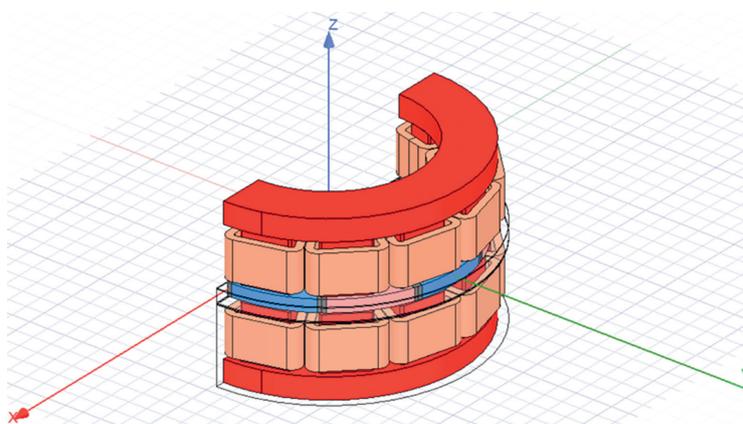


Figure 3. A view of the calculation model of the axial airflow motor: red corresponds to the powder SMC material, blue and pink to magnets, black to the non-magnetic non-conductive rotor carcass, and orange to copper

Advantages of composite magnetic material over electrical steel and other soft magnetic alloys allow providing their wider application in electric machines in order to increase specific power at high rotational speed with less losses. Significant increase in the efficiency of electric machines (electric motors, generators, etc.) is possible by changing the design solutions, for example, creation of so-called double-stator axial electric motor-generator. Such a solution involves changing the direction of magnetic flux in the magnetic core. On the basis of traditional materials, such as electrical steel, it is impossible to implement such a solution. Developed new composite material allows making cores on its basis, which allow changing the direction of magnetic field.

Technique of magnetic cores manufacturing includes computer modeling of magnetic cores components, creation of tooling for their manufacturing by pressing method and selection of technological modes of pressing. At the first stage, taking into account electromagnetic parameters of composites, simulation of synchronous motor with excitation from permanent magnets of axial magnetic flux with double stator and magnetic core made of magnetically soft composite material is performed. Figure 3 shows the appearance of the model of the magnetic circuit of the motor under study. In order to reduce the simulation time it is preferable to calculate the model reduced by 2 times, containing 6 magnets on the rotor and 7 teeth on each stator with setting of appropriate boundary conditions. In Table are presented the calculated electrical parameters of the two-stator motor.

The calculations show that the average torque value is 48.4 N·m, which translates to a power output of 15.340 W. This mode of operation is short-lived due to the high current density (14.77 A/mm², see Table). Long-term operation while maintaining maximum power is possible only with water cooling. Normal conditions and typical values of current density for long-term operation are 8–10 A/mm² with a proportional power reduction to 10 kW.

Electrical parameters of the motor

Parameter	Value
Power supply voltage, V	24–72
Maximum phase current (pc), A	210
Current density (RMS), A/mm ²	14.77
Rotation speed, min ⁻¹	5000
Maximum capacity, kW	15
Nominal capacity, kW	10

The amplitude of torque pulsations is less than 2 H·m, which is less than 5 % of the average torque developed by the motor, which is a low value and means little noise and no vibration during motor operation. The small torque pulsation is a consequence of the inherent advantage of the chosen ratio of stator teeth z to the number of rotor magnets $2p$: $z = 2p \pm 2$. The losses in the stator magnetic core have an average steady-state value of about 170 W and are the least significant among all losses. The main component of losses in stator magnetic core is remagnetization losses of hysteresis loop, which were about 150 W, losses on eddy currents are insignificant, their value was 20 W.

At the second stage, taking into account computer modeling, tooling for manufacturing stator components by pressing method was created. The tooling is a mold consisting of an inner part and a supporting mandrel made of 5XHB steel hardened to Rockwell hardness of 55–60 and 45–50 HRC, respectively.

Further, the choice of technological modes of pressing the magnetic components was made. The operation of pressing magnetic components includes lubrication of encapsulated iron powder with addition of peat wax solution (Peat wax), direct manufacturing of stator components by hydrostatic pressing of encapsulated iron powder in a mold under pressure 8–10 t/cm² under normal conditions and heat treatment of manufactured components to normalize their physical parameters. The components are annealed at a temperature of 400 °C during 1 hour in special autoclaves. Under such technological regimes the density of the pressed composite is of the order of 7.5–7.8 g/cm³.

To create the stator of an electric motor, 12 teeth were made, a photo of one of them is shown in Figure 4, *a* (insert).

The strength characteristics of magnetic components are evaluated using Brinell hardness measurements. This method is important when evaluating the mechanical properties of products and their components during operation, during the current state control of structures and during emergency investigations. It is especially important for detecting and estimating the condition of locally deformed zones of structures, which have an increased hardness as compared to the hardness of the original material. Such zones are the sources of initiation and development of cracks. Magnetic components of the developed composites have HB hardness values from 83.16 to 101.86, which is higher than the hardness value for pure iron HB60. This indicates that the products have an increased tensile strength, and the absence of cracks indicates that the material is highly resistant to the occurrence and development of cracks. Studies have shown that the magnetic components have sufficient strength and the necessary electro-magnetic characteristics to create a two-stator combined motor.

Experimental sample of two-stator electric motor is made using prepared two stators with wound coils (Figure 4, *a*) and rotor. Calculation of the stator winding data and the main parameters of the power supply was performed for operation with induction at maximum of the order of 1.5 T and the motor power supply directly. To achieve the value of magnetic induction in the pulse equal to 1.5 T the value of magnetic field strength is of the order of 7–8 kA/m. According to these conditions and the possibility of the power supply the number of turns of the stator winding is determined. The electric motor housing is made of duralumin disks with holes for fixing screws (Figure 4, *b*). Diameter of discs was 15 cm. Before assembly, fourteen NdFeB magnets with the following parameters were glued on the rotor made on the basis of the developed soft magnetic material: residual induction 1.15 T, coercive force of magnetization 850 kA/m, magnetic permeability 1.05. The shaft of the two-stator motor is made of stainless steel.

The obtained scientific results indicate the possibility of creating components for various electrical devices on the basis of new magnetically soft composite materials. The possibility of application of stator and rotor made of powder composite magnetically soft material for manufacturing of two-stator electric motor has been investigated. Such requirements are satisfied by composite materials based on metal

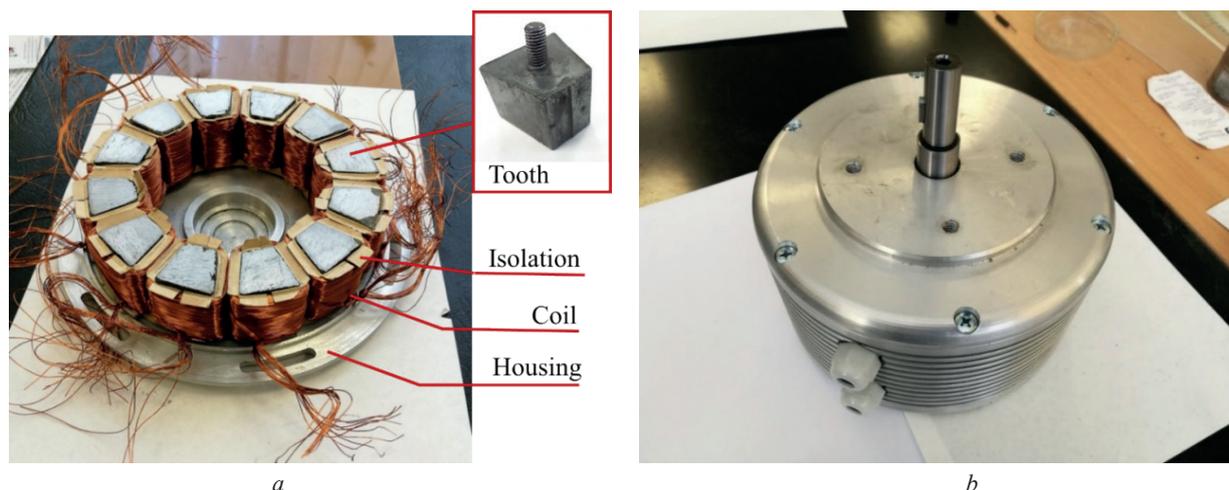


Figure 4. Winding motor stator (a), and the assembled electric motor (b)

powders, the particles of which are covered with a very thin layer with electrical insulation. Application of insulating layers provides reduction of electromagnetic losses and increases the quality factor of composites.

The developed method allows creation of magnetic cores for electric motors from soft magnetic composite materials by the powder metallurgy method. The advantages of composite magnetic material over electrical steel and other soft magnetic alloys allow providing their wider application in electric machines in order to increase the specific power at high rotation speed with less losses.

Conclusions. Magnetic components for a two-stator combined electric motor were produced by the powder metallurgy method on the basis of magnetically soft encapsulated titanium dioxide composites. The density of the manufactured components is $7.5\text{--}7.8\text{ g/cm}^3$. Measurements of the main electromagnetic characteristics of the magnetic components were made on an express magnetometer at a frequency of 1 kHz. At intensity $H = 21\text{ kA/m}$ the value of magnetic induction of magnetic components is $B_m = 1.88\text{ T}$. The value of hysteresis losses of components is on the order of $P = 105\text{ W/kg}$ for the induction value $B = 1.9\text{ T}$, which is lower than the value of similar losses for electrical steel $P = 120\text{ W/kg}$. Complex studies have shown that the magnetic components have sufficient strength and the necessary electromagnetic characteristics to create a two-stator combined electric motor with a rated power of about 10 kW. Calculation of stator winding data and basic parameters of power supply unit was made for operation with induction at maximum of about 1.5 T and power supply of the motor directly. Experimental sample of two-stator electric motor is assembled from prepared stators with winded coils and rotor.

References

1. Fernandes J. F. P., Bhagubai P. P. C., Branco P. J. C. Recent Developments in Electrical Machine Design for the Electrification of Industrial and Transportation Systems. *Energies*, 2022, vol. 15, art. ID 6390. <https://doi.org/10.3390/en15176390>
2. Sun X., Shi Z., Cai Y., Lei G., Guo Y., Zhu J. Driving-Cycle-Oriented Design Optimization of a Permanent Magnet Hub Motor Drive System for a Four-Wheel-Drive Electric Vehicle. *IEEE Transaction on Transportation Electrification*, 2020, vol. 6, pp. 1115–1125. <https://doi.org/10.1109/TTE.2020.3009396>
3. Xia C., Peng Y., Yi X., Yao Z., Zhu Y., Hu G. Improved magnetic properties of FeSiCr amorphous soft magnetic composites by adding carbonyl iron powder. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2021, vol. 559, art. ID 120673. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.120673>
4. Liu D., Liu X., Wang J., Mao X., Xu X., Fan X. The influence of Fe nanoparticles on microstructure and magnetic properties of Fe-6.5wt%Si soft magnetic composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, vol. 835, art. ID 155215. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155215>
5. Guo Z., Wang J., Chen W., Chen D., Sun H., Xue Z., Wang C. Crystal-like microstructural Finemet/FeSi compound powder core with excellent soft magnetic properties and its loss separation analysis. *Materials & Design*, 2020, vol. 192, art. ID 108769. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108769>
6. Hasegawa M., Tanaka N., Chiba A., Fukao T. The Operation Analysis and Efficiency Improvement of Switched Reluctance Motors with High Silicon Steel. *Proceedings of the IEEE Power Conversion Conference-Osaka*, Osaka, Japan, 2002, pp. 981–986. <https://doi.org/10.1109/pcc.2002.998102>

7. Fan T., Li Q., Wen X. Development of a High Power Density Motor Made of Amorphous Alloy Cores. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, vol. 61, no. 9, pp. 4510–4518. <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2290766>
8. Guo Y., Liu L., Ba X., Lu H., Lei G., Sarker P., Zhu J. Characterization of Rotational Magnetic Properties of Amorphous Metal Materials for Advanced Electrical Machine Design and Analysis. *Energies*, 2022, vol. 15, art. ID 7798. <https://doi.org/10.3390/en15207798>
9. Ashby M. F., Ferreira P., Schodek D. L. *Nanomaterials, Nanotechnologies and Design: An Introduction for Engineers and Architects*. Butterworth-Heinemann, 2009. 560 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8149-0.X0001-3>
10. Gheiratmand T., Madaah Hosseini H. R. Finemet nanocrystalline soft magnetic alloy: Investigation of glass forming ability, crystallization mechanism, production techniques, magnetic softness and the effect of replacing the main constituents by other elements. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, vol. 408, pp. 177–192. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.02.057>
11. Nishiyama N., Tanimoto K., Makino A. Outstanding efficiency in energy conversion for electric motors constructed by nanocrystalline soft magnetic alloy “NANOMET” cores. *AIP Advances*, 2016, vol. 6, art. ID 055925. <https://doi.org/10.1063/1.4944341>
12. *Soft Magnetic Composites – Enabling More Efficient Electromagnetic Designs*. 2022. Available at: <https://www.hoganas.com/en/powder-technologies/soft-magnetic-composites> (accessed 28 December 2022).
13. Hwang M.-H., Lee H.-S., Han J.-H., Kim D.-H., Cha H.-R. Densification Mechanism of Soft Magnetic Composites Using Ultrasonic Compaction for Motors in EV Platforms. *Materials*, 2019, vol. 12, art. ID 824. <https://doi.org/10.3390/ma12050824>
14. Liu C., Lu J., Wang Y., Lei G., Zhu J., Guo Y. Design Issues for Claw Pole Machines with Soft Magnetic Composite Cores. *Energies*, 2018, vol. 11, art. ID 1998. <https://doi.org/10.3390/en11081998>
15. Shokrollahi H., Janghorban K. The effect of compaction parameters and particle size on magnetic properties of iron-based alloys used in soft magnetic composites. *Materials Science and Engineering: B*, 2006, vol. 134, no. 1, pp. 41–43. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2006.07.015>
16. Shokrollahi H., Janghorban K. Soft magnetic composite materials (SMCs). *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, vol. 189, no. 1–3, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.02.034>
17. Hamler A., Goričan V., Šuštaršič B., Sirc A. The use of soft magnetic composite materials in synchronous electric motor. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2006, vol. 304, no. 2, pp. 816–819. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2006.03.003>
18. Vijayakumar K., Thiagarajan Y., Rajendirakumar R., Joseph Basanth A., Karthikeyan R., Kannan S. Development of an iron powder metallurgy soft magnetic composite core switched reluctance motor. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 41, no. 5, pp. 1195–1201. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.346>
19. Guo Y., Ba X., Liu L., Lu H., Lei G., Yin W., Zhu J. A Review of Electric Motors with Soft Magnetic Composite Cores for Electric Drives. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 4, art. ID 2053. <https://doi.org/10.3390/en16042053>
20. Watanabe A., Saito T., Ueno T., Tsuruta H., Nakamura Y. Thin and High-Torque Axial Gap Motor Using Soft Magnetic Powder Cores. *SEI Technical Review*, 2018, vol. 86, pp. 106–112.
21. Yabumoto M., Kaido C., Wakisaka T., Kubota T., Suzuki N. Electrical Steel Sheet for Traction Motors of Hybrid/Electric Vehicles. *Nippon Steel Technical Report*, 2003, no. 87, pp. 57–61.
22. Wakisaka T., Arai S., Kurosaki Y. Electrical Steel Sheet for Traction Motor of Hybrid/Electrical Vehicles. *Nippon Steel Technical Report*, 2013, no. 103, pp. 116–120.
23. Shimada Y., Matsunuma K., Maeda T., Nishioka T., Ikegaya A. Development of High-Performance P/M Soft Magnetic Material. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, 2008, vol. 55, no. 2, pp. 149–151. <https://doi.org/10.2497/jjpsm.55.149>
24. Igarashi N., Uozumi M., Kosuge T., Sato A., Kusawake K., Yamaguchi K. Pure Iron Based Magnetic Composite Core That Enables Downsizing Automotive Reactors. *SEI Technical Review*, 2015, no. 80, pp. 98–103.
25. Ueno T., Tsuruta H., Saito T., Watanabe A., Ishimine T., Yamada K. Practical and Potential Applications of Soft Magnetic Powder Cores with Superior Magnetic Properties. *SEI Technical Review*, 2016, no. 82, pp. 9–15.
26. Hassan A., Erwan S., Roziah A., Mahyuzie J., Mohd Zarafi A., Faisal K. Review of Double Stator Flux switching machines with various arrangements of excitation sources. *Alexandria Engineering Journal*, 2021, vol. 60, pp. 4393–4410. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.03.022>
27. Wang Y., Cheng M., Chen M., Du Y., Chau K. T. Design of high-torque-density double-stator permanent magnet brushless motors. *IET Electric Power Applications*, 2011, vol. 5, no. 3, pp. 317–323. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2010.0187>
28. Awah C. C., Zhu Z. Q., Wu Z. Z. Comparison of partitioned stator flux switched permanent magnet machines having single- or double-layer windings. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2016, vol. 52, no. 1, art. ID 9500310. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2477679>
29. Zhu Z. Q., Wu Z. Z., Liu X. A partitioned stator variable flux reluctance machine. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2016, vol. 31, no. 1, pp. 78–92. <https://doi.org/10.1109/TEC.2015.2470122>
30. Vetcher A., Govor G., Demidenko O., Constantin V., Popescu A.-M. Electromagnetic characteristics and corrosion resistance of new magnetosoft materials based on capsulated iron powders. *Chemical Research in Chinese Universities*, 2020, vol. 36, pp. 1326–1331. <https://doi.org/10.1007/s40242-020-0250-8>
31. Sun H., Zhu F., Zhang J., Demidenko O., Wang C., Wang J. Influence of stress-induced anisotropy on domain structure and magnetic properties of Fe-based nanocrystalline alloy under continuous tension annealing. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2023, vol. 600, art. ID 122035 <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2022.122035>

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-103-112>

УДК 621.789



Оригинальная статья

О. М. Мицирук^{1*}, А. И. Веремейчик¹, О. Г. Девойно², М. В. Нерода¹, Б. Г. Холодарь¹

¹*Брестский государственный технический университет,
ул. Московская, 267, 224017, Брест, Республика Беларусь*

²*Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь*

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ НА СВОЙСТВА СТАЛИ 40X13

Аннотация. Проведено исследование зависимости характеристик прочности и пластичности, а также микротвердости образцов из коррозионно-стойкой стали 40X13 от режимов лазерной поверхностной закалки волоконным лазером. В зависимости от размеров пятна сканирования и скорости сканирования на противоположных плоскостях образца с габаритными размерами 20 × 200 мм наносились 3–5 дорожек. Проведены испытания образцов на статическое разрушение и исследования микротвердости материала образцов по глубине измененной структуры. Установлено, что разрушение обработанных образцов во всех случаях имело хрупкий характер с невысоким уровнем разрушающих деформаций при напряжениях ниже предела прочности исходного материала. Построенные диаграммы растяжения указывают на незначительное влияние лазерной обработки на величину модуля упругости материала. Исследования твердости материала закаленной лазером дорожки и микротвердости материала по глубине зоны измененной структуры показало их увеличение до 3–4 раз в сравнении с исходными характеристиками. Полученные результаты могут служить базой для исследования взаимосвязи между режимами нагрева лазерным лучом и свойствами материала упроченной зоны.

Ключевые слова: лазерная поверхностная закалка, микроструктура, характеристики пластичности, микротвердость, прочностные характеристики, легированная сталь 40X13

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Мицирук Ольга Михайловна** – старший преподаватель кафедры начертательной геометрии и инженерной графики, Брестский государственный технический университет. E-mail: purtyupolia@gmail.com; *Веремейчик Андрей Иванович* – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательской части, Брестский государственный технический университет. E-mail: vai_mrtm@bstu.by; *Девойно Олег Георгиевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской лабораторией плазменных и лазерных технологий, Белорусский национальный технический университет. E-mail: scvdmed@bntu.by; *Нерода Михаил Владимирович* – кандидат технических наук, доцент, первый проректор, Брестский государственный технический университет. E-mail: nerodaMV@mail.ru; *Холодарь Борис Григорьевич* – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательской части, Брестский государственный технический университет. E-mail: hbg@list.ru

Вклад авторов: *Мицирук Ольга Михайловна* – написание и критический пересмотр текста рукописи, сбор, анализ и обобщение данных литературы, оформление текста рукописи, работа с графическим материалом, проведение испытаний на статическое разрушение, сбор, анализ и систематизация данных, проведение сравнительного анализа результатов исследования и их обобщение, формулировка выводов; *Веремейчик Андрей Иванович* – проведение исследования материала образцов на твердость, сбор, анализ и систематизация данных, редактирование текста рукописи, обсуждение выводов; *Девойно Олег Георгиевич* – обоснование концепции исследования, осуществление лазерной обработки образцов; *Нерода Михаил Владимирович* – формулирование идеи исследования, разработка дизайна экспериментального исследования, редактирование текста рукописи; *Холодарь Борис Григорьевич* – проведение исследований микротвердости образцов, сбор, анализ и систематизация данных, аккумулялирование исследовательских данных, обсуждение выводов.

Для цитирования: Влияние режимов лазерной закалки на свойства стали 40X13 / О. М. Мицирук [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 2. – С. 103–112. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-103-112>

Поступила в редакцию: 13.12.2022

Утверждена к печати: 25.05.2023

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Original articleOlga M. Mishchiruk^{1*}, Andrei I. Verameichyk¹, Oleg G. Devoino², Mihail V. Neroda¹, Boris G. Kholodar¹¹Brest State Technical University,

267, Moskovskaya Str., 224017, Brest, Republic of Belarus

²Belarusian National Technical University,

65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus

INFLUENCE OF LASER HARDENING MODES ON THE PROPERTIES OF 40X13 STEEL

Abstract. We have studied the dependence of the characteristics, strength and plasticity, as well as the microhardness of specimens made of corrosion-resistant steel 40X13 on the modes of laser surface hardening by a fiber laser. Depending on the size of the scanning spot and the scanning speed, 3–5 tracks were applied on opposite planes of the sample with overall dimensions of 20 × 200 mm. Samples were tested for static fracture and the microhardness of the material of the samples was studied in terms of the depth of the changed structure. It was found that the fracture of the treated samples in all cases was of a brittle nature with a low level of destructive deformations at stresses below the tensile strength of the original material. The plotted tension diagrams indicate an insignificant effect of laser processing on the value of the elastic modulus of the material. Studies of the hardness of the material of the laser-hardened track and the microhardness of the material along the depth of the zone of the changed structure showed their increase up to 3–4 times compared with the initial characteristics. The results obtained can serve as a basis for studying the relationship between the modes of heating by a laser beam and the properties of the material of the hardened zone.

Keywords: laser surface hardening, fiber laser, plasticity characteristics, microhardness, strength characteristics, alloy steel 40X13

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

Information about authors: *Olga M. Mishchiruk** – Senior Lecturer, Department of Descriptive Geometry and Engineering Graphics, Brest State Technical University. E-mail: purtyupolia@gmail.com; *Andrei I. Verameichyk* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Senior Researcher of the Research Unit, Brest State Technical University. E-mail: vai_mrtm@bstu.by; *Oleg G. Devoino* – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of Plasma and Laser Technologies Research Laboratory, Belarusian National Technical University. E-mail: scvmed@bntu.by; *Mikhail V. Neroda* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, First Vice-Rector, Brest State Technical University. E-mail: nerodaMV@mail.ru; *Boris G. Kholodar* – Cand. Sci. (Engineering), Senior, Associate Professor, Senior Researcher of the Research Unit, Brest State Technical University. E-mail: hbg@list.ru

Contribution of the authors: *Olga M. Mishchiruk* – writing and critical revision of the text of the manuscript, collection, analysis and generalization of literature data, design of the text of the manuscript, work with graphic material, testing for static destruction, collection, analysis and systematization of data, comparative analysis of research results and their generalization, formulation of conclusions; *Andrei I. Verameichyk* – conducting a study of the material of the samples for hardness, collecting, analyzing and systematizing data, editing the text of the manuscript, discussing the conclusions; *Oleg G. Devoino* – substantiation of the research concept, implementation of laser processing of samples; *Mikhail V. Neroda* – formulation of the idea of the study, development of the design of the experimental study, editing the text of the manuscript; *Boris G. Kholodar* – providing research on the microhardness of samples, collecting, analyzing and systematizing data, accumulating research data, discussing the conclusions.

For citation: Mishchiruk O. M., Verameichyk A. I., Devoino O. G., Neroda M. V., Kholodar B. G. Influence of laser hardening modes on the properties of 40X13 steel. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 2, pp. 103–112 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-103-112>

Received: 13.12.2022

Approved for printing: 25.05.2023

Введение. В процессе проектирования деталей машин и конструкций значимым этапом является выбор материала изделия, что обуславливается конструктивными, технологическими, эксплуатационными и экономическими требованиями [1]. Наиболее важными параметрами материала, определяющими его прочностные характеристики, считаются модуль упругости, коэффициент Пуассона, пределы прочности и текучести.

В настоящее время сталь применяется в качестве основного конструкционного материала, так как обладает высокими эксплуатационными характеристиками. Достоинством стали является также возможность применения упрочняющих технологий, которые ориентированы на придание повышенных характеристик поверхностному слою детали [2], что достигается при использовании плазменных, электронно-ионных и лазерных воздействий [3, 4].

Лазерные технологии поверхностной обработки в ряде случаев заменяют традиционные методы термической обработки. Это обусловлено преимуществами сфокусированного лазерно-

го излучения: бесконтактностью и локальностью теплового воздействия, минимальной зоной термического влияния, высокими скоростями нагрева и охлаждения, снижением уровня остаточных напряжений, сведением к минимуму коробления, повышением дисперсности структуры [5, 13]. Лазерная закалка может рассматриваться в качестве альтернативы поверхностному упрочнению цементацией и последующей объемной закалке, а также ионно-плазменному азотированию. Технология лазерной закалки сканирующим лучом без оплавления позволяет отказаться от шлифования поверхности после упрочнения [6].

Актуальность проблем, связанных с влиянием режимов лазерной закалки на структуру и свойства различных материалов, подтверждается многочисленными публикациями отечественных и зарубежных ученых [3, 5, 6–17]. Лазерное упрочнение стали AISI 4130 (аналог отечественной стали 25ХМ) для различных параметров лазера исследовано в [8]. Микроструктура обработанной зоны изучалась с помощью оптической эмиссионной сканирующей электронной микроскопии. Микротвердость измерялась в направлениях ширины и глубины. Результаты показали, что твердость и глубина упрочненного слоя увеличивались при уменьшении скорости сканирования и фокусного положения лазера, а также при увеличении длительности импульса. В [9] описаны результаты исследования влияния режимов лазерной закалки на свойства конструкционных сталей 40, 40Х и 38Х2МЮА и показано, что лазерная закалка позволяет значительно повысить твердость, а наивысшие значения твердости соответствуют зоне наиболее дисперсного мартенсита. Найдены математические закономерности влияния скорости перемещения лазерного луча на глубину закаленного слоя в зависимости от марки стали. Результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований, направленных на повышение с помощью локальной лазерной обработки механической прочности деталей из листового металла, изготовленных из высококачественной конструкционной углеродистой стали, представлены в [11]. Также в [11] изучено влияние лазерной обработки на прочность стальных листовых пластин при изгибе. В [14] показано, что использование излучения оптоволоконного лазера обеспечивает повышение производительности закалки в 3–5 раз по сравнению с применением излучения CO₂-лазера той же мощности. В [16] для повышения износостойкости стали AISI 1020 (аналог отечественной стали марки 20) применялась лазерная закалка с помощью излучения волоконного лазера с мощностью луча 150 Вт, скоростью сканирования 10 мм/с, диаметром пятна 2 мм и поперечным шагом 0,5 мм, что привело к значительному увеличению твердости поверхностных слоев материала. В [17] приведены результаты исследования влияния лазерной закалки на усталостную стойкость образцов из стали 42CrMo4 (аналог отечественной стали 40ХН2МА) для двух скоростей перемещения лазерного луча по поверхности материала при постоянной энергии луча.

Следует отметить, что в основном исследования ученых заключаются в определении влияния режимов лазерной закалки на износостойкость, а проблеме влияния лазерной обработки на прочностные характеристики и характеристики пластичности материала достаточного внимания не уделяется.

Цель исследования – изучение зависимости прочностных характеристик, характеристик пластичности и микротвердости образцов из коррозионно-стойкой стали 40Х13 от режимов лазерной поверхностной закалки излучением волоконного лазера.

Методика проведения исследований. Образцы были изготовлены из легированной стали 40Х13 при помощи водной резки. Размеры образцов: толщина – 7 мм, ширина – 20 мм и длина – 200 мм (отклонения от указанных размеров учтены при обработке результатов).

Образцы подвергались лазерной поверхностной обработке излучением волоконного иттербиевого лазера мощностью 1 кВт с объективом для фокусировки лазерного излучения, системой перемещения и сканирующей лазерный луч головкой [6] при пяти различных режимах обработки (табл. 1). Для каждого режима закалки использовалось три образца. На противоположных плоскостях образца с габаритными размерами 20 × 200 мм наносилось 3–5 дорожек (рис. 1, 2). Количество линий в пятне сканирования зависело от размеров лазерного пятна. Частота сканирования составляла $f = 200$ Гц.

Для определения прочностных характеристик образцы испытывались на статическое растяжение согласно ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» на машине разрывной ИР 5145-500-11 (Российская Федерация).

Таблица 1. Режимы лазерной обработки
Table 1. Laser processing modes

Пятно сканирования, мм	Количество линий	Скорость сканирования, V мм/мин	Номер образца
$4,0 \times 2,25$	7 линий	500	1а, 1б, 1в
		700	2а, 2б, 2в
		1000	3а, 3б, 3в
$3,0 \times 3,0$	10 линий	700	4а, 4б, 4в
$4,0 \times 2,25$	7 линий		5а, 5б, 5в

Примечание: в графе «Номер образца» 1–5 – номер партии; а, б, в – номер образца в партии.

Испытания материала образцов на твердость осуществлялись с помощью ультразвукового твердомера «Константа ТУ» (Российская Федерация). Для определения микротвердости по глубине дорожки использовались микротвердомер ПМТ-3 и цифровой микротвердомер LM-700AT (LECO Согroгation, США). Визуальные наблюдения структуры материала проведены с помощью цифрового металлографического микроскопа «Альтами МЕТ 3С» (компания «Альтами», Российская Федерация).

Результаты исследований и их обсуждение. Испытания образцов на растяжение осуществлялись при нагружении со скоростью 5 мм/мин (рис. 1).

Разрушение необработанных образцов (НО) происходило в пределах расчетной длины с образованием «шейки». Разрушение обработанных образцов было хрупким с небольшими деформациями и без образования «шейки». Все испытанные образцы разрушились по сечениям, перпендикулярным направлению растягивающей нагрузки. Примеры разрушенных образцов и сечений разрушения приведены на рис. 2.

Разрушение обработанных образцов во всех случаях носило хрупкий характер. Излом имел ярко выраженный крупнозернистый рельеф и состоял из множества блестящих граней. Такой характер разрушения можно объяснить возникновением в образце зон измененной структуры исходного материала, которые оказывают влияние на локальное напряженно-деформированное состояние зерен материала в своей окрестности. В большинстве случаев разрушение произошло возле захватов разрывной машины.

По результатам проведенных испытаний были построены зависимости возникающих в образцах напряжений σ от деформаций ϵ (рис. 3). Для удобства сравнения графиков выполнено их наложение на графики образцов, которые не подвергались лазерной обработке.

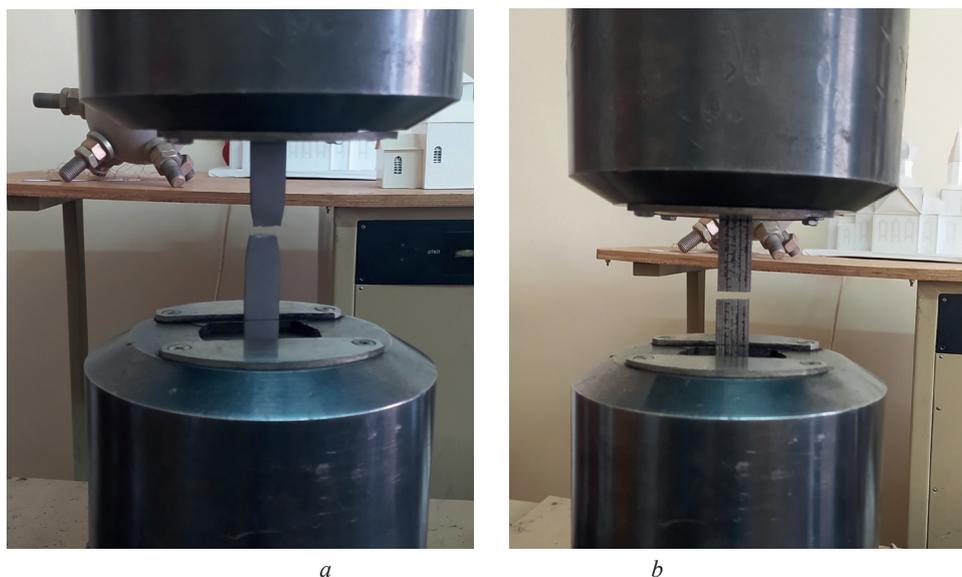


Рис. 1. Испытания образцов материала на растяжение: *a* – необработанный образец; *b* – образец, закаленный лазером
Fig. 1. Tensile testing of material samples: *a* – untreated sample; *b* – laser-hardened sample

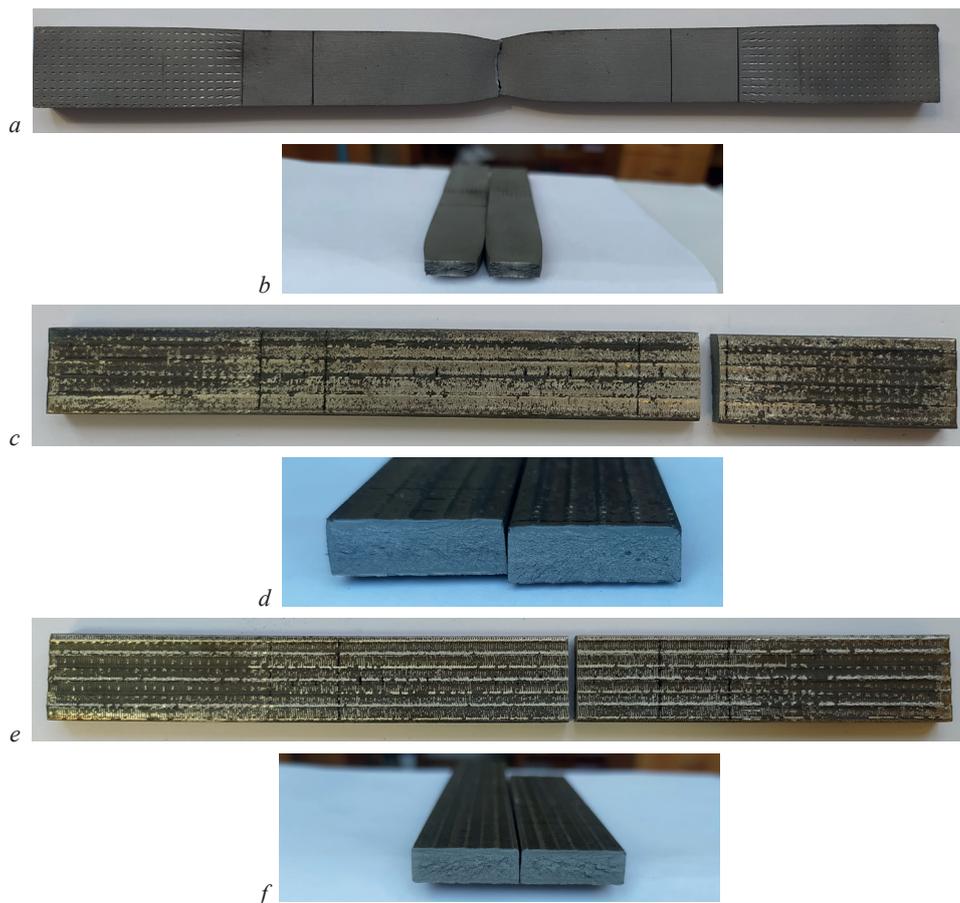


Рис. 2. Разрушенные образцы (*a, c, e*) и сечения разрушения (*b, d, f*): *a, b* – разрушение в пределах расчетной длины образца HO2; *c, d* – разрушение в зоне захватов образца 1a; *f, e* – разрушение в пределах расчетной длины образца 4a
 Fig. 2. Fractured specimens (*a, c, e*) and fracture cross sections (*b, d, f*): *a, b* – fracture within the design length of the HO2 specimen; *c, d* – destruction in the grip zone of sample 1a; *f, e* – destruction within the estimated length of the sample 4a

Анализ диаграмм растяжения указывает на незначительное влияние лазерной обработки на величину модуля упругости материала. Разрыв всех образцов произошел с невысоким уровнем разрушающих деформаций, не более чем в 2–3 раза превышающих деформацию, соответствующую пределу текучести необработанного материала. Результаты испытаний показывают высокую степень повторяемости полученных зависимостей $\sigma(\epsilon)$.

Для каждого образца были определены значения максимального напряжения (табл. 2).

Таблица 2. Некоторые характеристики при испытании плоских образцов
 Table 2. Some characteristics when testing flat specimens

Пятно сканирования и скорость отработки	Номер партии	Маркировка	Максимальное напряжение, МПа	Относительное удлинение, δ , %
Необработанные образцы	НО	1	579	21
		2	579	22
		3	579	22
4 × 2,25 мм (7 линий) 500 мм/мин	1	а	595	1
		б	577	1
		в	584	1
4 × 2,25 мм (7 линий) 700 мм/мин	2	а	570	1
		б	525	1
		в	523	2
4 × 2,25 мм (7 линий) 1000 мм/мин	3	а	524	2
		б	557	3
		в	523	3

Окончание табл. 2

Пятно сканирования и скорость обработки	Номер партии	Маркировка	Максимальное напряжение, МПа	Относительное удлинение, δ , %
3 × 3 мм (10 линий) 700 мм/мин	4	a	562	1
		б	537	—
		в	515	1
4 × 2,25 мм (7 линий) 700 мм/мин	5	a	541	—
		б	487	1
		в	547	1

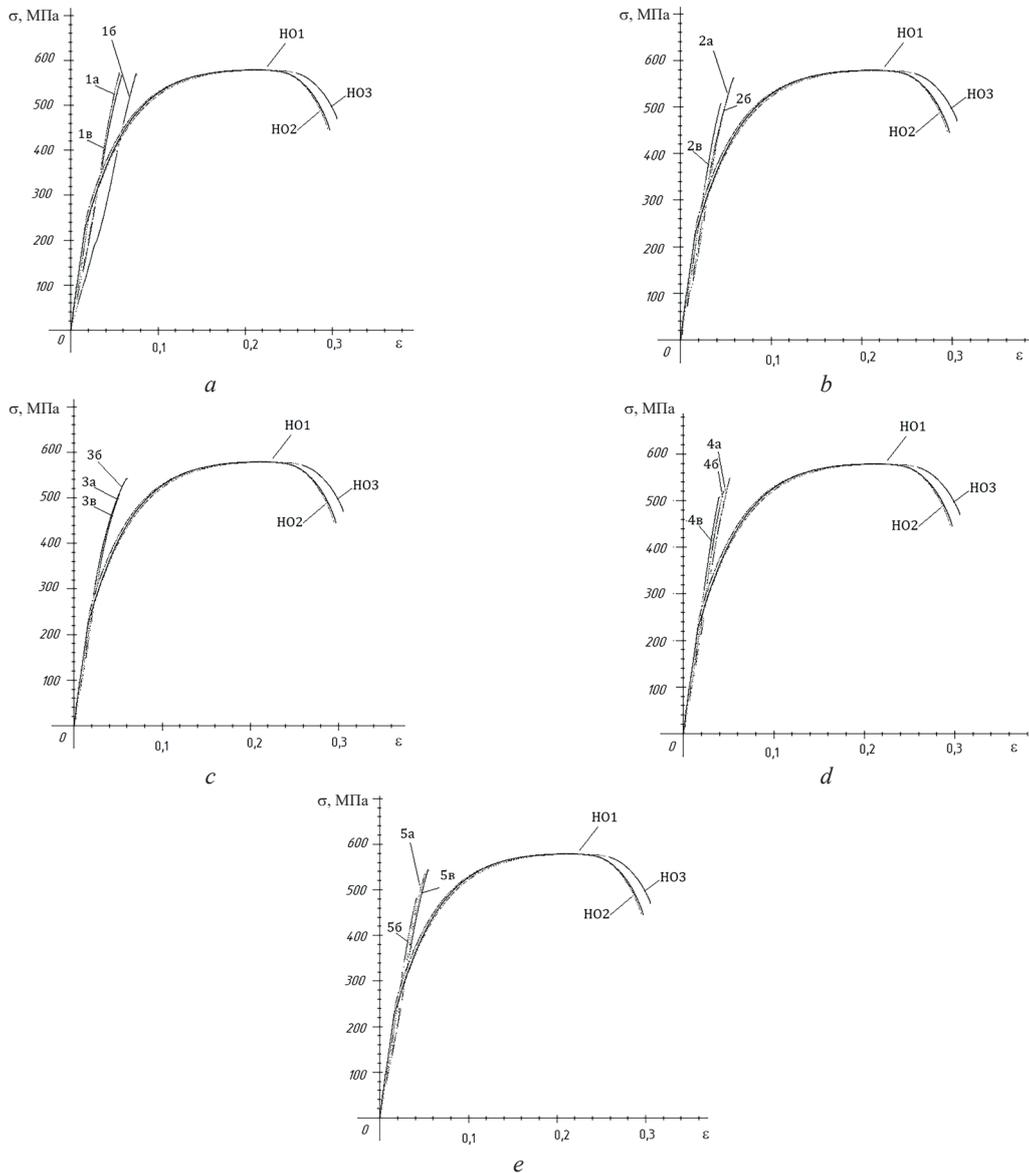


Рис. 3. Зависимость возникающих в образцах напряжений (σ) от деформаций (ϵ):
a – партия № 1, b – партия № 2, c – партия № 3, d – партия № 4, e – партия № 5

Fig. 3. Dependence of stresses (σ) arising in the samples on deformations (ϵ):
a – batch no. 1, b – batch no. 2, c – batch no. 3, d – batch no. 4, e – batch no. 5

Результаты показывают, что максимальное напряжение для всех подвергнутых обработке образцов, кроме образцов партии № 1, уменьшилось. Следует отметить значительное снижение характеристик пластичности: относительное удлинение закаленных образцов не превышает 2–3 % при аналогичном параметре для исходных образцов 21–22 % на уровне предела прочности материала. Снижение характеристик прочности и пластичности связано со значительным повышением твердости закаленной зоны и наличием микротрещин на ее поверхности.

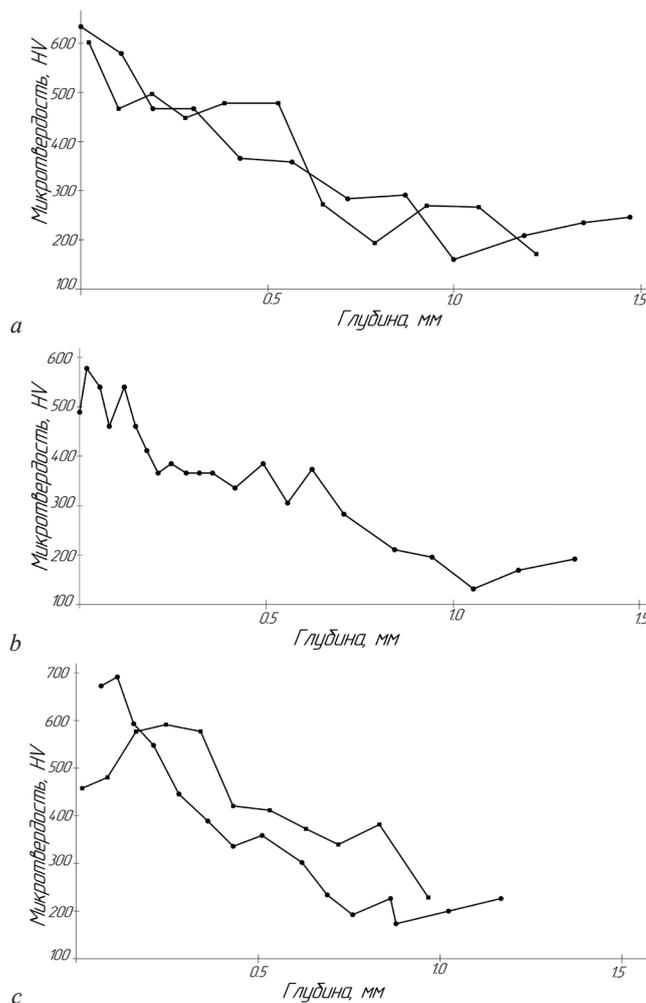


Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя при различных скоростях лазерной обработки: *a* – $V = 500$ мм/мин, *b* – $V = 700$ мм/мин, *c* – $V = 1000$ мм/мин

Fig. 4. Distribution of microhardness over the depth of the hardened layer at different laser processing speeds: *a* – $V = 500$ mm/min, *b* – $V = 700$ mm/min, *c* – $V = 1000$ mm/min

Для испытаний материала образцов на твердость с помощью ультразвукового твердомера «Константа ТУ» выбраны участки материала необработанного образца и материала дорожки различных закаленных образцов. Результаты измерений показали, что среднее значение твердости необработанных образцов составляет 16 HRC, для образцов из партии № 1 – 59 HRC, из партии № 2 – 52 HRC, № 3 и № 5 – 54 HRC, № 4 – 56 HRC. Твердость материала дорожки достигла наиболее высокого уровня при закалке с наименьшей скоростью ($V = 500$ мм/мин).

Также были проведены исследования микротвердости образцов. Определение микротвердости лазерной дорожки на микротвердомере ПМТ-3 осуществлялось для различных режимов термообработки с шагом по глубине 30–50 мкм. Зависимости микротвердости от глубины по некоторым дорожкам приведены на рис. 4.

Результаты измерений показали, что в приповерхностных слоях обработанных образцов микротвердость достигает значений 600–700 HV и далее падает до 170–200 HV на глубине 1,0–1,5 мм.

Микротвердость сердцевины сечения образцов составила 175–184 HV при измерениях на цифровом микротвердомере LM-700AT и 170–230 HV – при измерениях микротвердомером ПМТ-3.

С помощью металлографического микроскопа «Альтами МЕТ 3С» проведены визуальные наблюдения структуры материала поверхности необработанных и закаленных образцов. Исследования показали наличие поверхностных микротрещин в зоне теплового воздействия, ориентированных преимущественно поперек оси симметрии образцов. Трещинообразование вызвано растрескиванием поверхностного слоя образца из-за возникших усадочных напряжений материала (рис. 5–7).

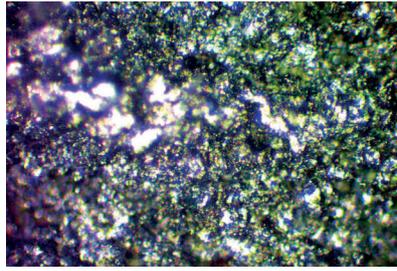
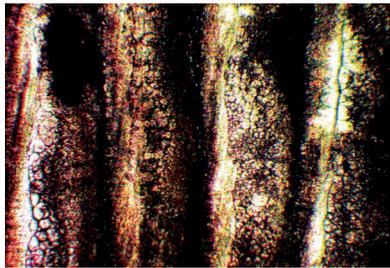
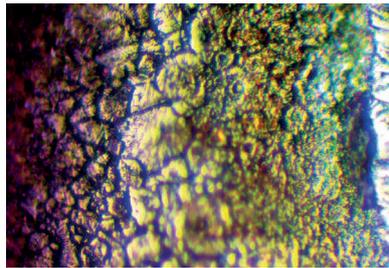
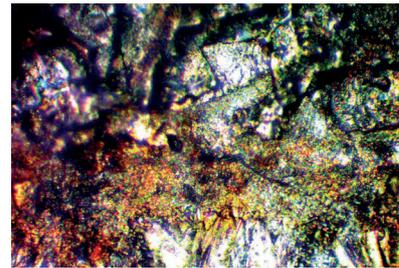
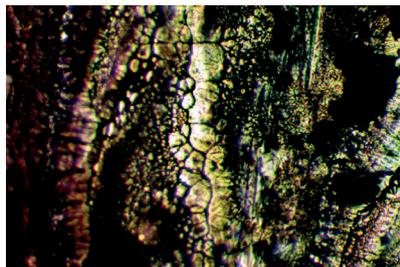
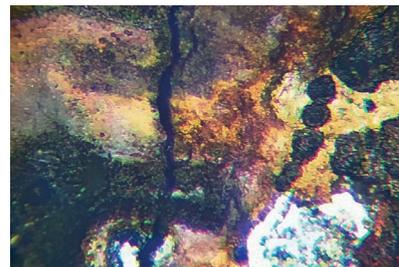


Рис. 5. Структура необработанного образца HO1

Fig. 5. Structure of the untreated HO1 sample

*a**b**c*Рис. 6. Структура образца 1в: *a*, *b* – в закаленной зоне, *c* – между дорожкамиFig. 6. Structure of sample 1b: *a*, *b* – in the hardened zone, *c* – between the tracks*a**b*Рис. 7. Структура материала дорожки образца 5в: *a* – в закаленной зоне, *b* – поперечная трещина в закаленной зонеFig. 7. Structure of the track material of sample 5b: *a* – in the hardened zone, *b* – transverse crack in hardened zone

Высокие скорости и градиенты термического воздействия в зоне обработки вызывают большую неоднородность процессов структурных превращений в термически активированном объеме и, как следствие, развитие дефектности структуры, что приводит к охрупчиванию материала и падению его деформационных свойств.

Заключение. Проведены исследования влияния режимов лазерной закалки излучением волоконного иттербиевого лазера мощностью 1 кВт на механические характеристики и структуру образцов из стали 40X13. Результаты испытаний образцов на статическое растяжение указывают на хрупкое разрушение обработанных образцов вследствие образования микротрещин в зоне термообработки. Разрушающие напряжения закаленных образцов уменьшились на 5–20 % со значительным снижением характеристик пластичности. Диаграммы растяжения не показали изменений модуля упругости материала образцов после лазерной обработки по сравнению с исходным материалом.

Установлено, что поверхностная твердость материала увеличивается в зависимости от режимов термической обработки в 3–4 раза (до 52–59 HRC). Микротвердость по глубине образцов изменяется от 600–700 HV в приповерхностной зоне до 170–200 HV на глубине 1,0–1,5 мм при микротвердости сердцевины образцов 175–230 HV.

Результаты могут быть использованы для установления взаимосвязи между режимами нагрева и свойствами материала закаленной зоны.

Список использованных источников

1. Denesh Babu, P. Laser surface hardening: A review / P. Denesh Babu, K. R. Balasubramanian, G. Buvanashakaran // *Int. J. Sci. Eng.* – 2011. – Vol. 5, № 2/3. – P. 131–151. <http://doi.org/10.1504/IJSURFSE.2011.041398>
2. Исследование механических и пластических свойств стали марки 10кп с покрытиями, сформированными методом ионно-плазменного азотирования / М. В. Нерода [и др.] // *Вест. Брест. гос. техн. ун-та.* – 2019. – № 4: *Машиностроение.* – С. 2–4.
3. Андрияхин, В. М. Расчет поверхностной закалки железоуглеродистых сплавов с помощью технологических CO₂-лазеров непрерывного действия / В. М. Андрияхин, В. С. Майоров, В. П. Якунин // *Поверхность: Физика, химия, механика.* – 1983. – № 6. – С. 140–147.
4. Веремейчик, А. И. Плазменные технологии как одни из основных технологий повышения эксплуатационных свойств металлоизделий / А. И. Веремейчик, М. И. Сазонов, В. М. Хвисевич // *Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки: междунар. сб. науч. тр.* / Белорус. гос. ун-т транспорта. – Гомель, 2008. – Вып. 2. – С. 6–12.
5. Использование лазерных технологий упрочнения в сельскохозяйственном машиностроении / В. С. Голубев [и др.] // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр.: в 3 кн.* / Гос. науч. учреждение «Физ.-техн. ин-т НАН Беларуси»; редкол.: А. В. Белый (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2018. – Кн. 2: *Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки.* – С. 58–65.
6. Девойно, О. Г. Обеспечение ресурсных параметров ответственных элементов механических трансмиссий с использованием поверхностных слоев, формируемых лазерными технологиями [Электронный ресурс] / О. Г. Девойно, И. В. Швец // *Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб.* / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: А. В. Чигарев (пред.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2019. – Вып. 34. – С. 266–270. – Режим доступа: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/52290/OBESPECHENIE_RESURSNYH_PARAMETROV_OTVETSTVENNYH_EHLEMENTOV_MEKHANICHESKIH_TRANSMISSIJ.pdf?sequence=1. – Дата доступа: 21.10.2022.
7. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / под ред. В. Я. Панченко. – М.: Физматлит, 2009. – 664 с.
8. Experimental and Numerical Study of AISI 4130 Steel Surface Hardening by Pulsed Nd:YAG Laser / G. Casalino [et al.] // *Materials.* – 2019. – Vol. 12, № 19. – Art. ID 3136. <https://doi.org/10.3390/ma12193136>
9. The study of the influence of laser hardening conditions on the change in properties of steels / A. F. I. Idan [et al.] // *East. Eur. J. Enterp. Technol.* – 2016. – Vol. 2, iss. 5. – P. 69–73. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65455>
10. Gusev, V. Multiple-factor model of hardness of steel 40H13 after laser processing / V. Gusev, V. Morozov, D. Gavrilov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2020. – Vol. 896, iss. 1. – Art. ID 012119. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012119>
11. Kapustynskiy, O. Laser Treatment for Strengthening of Thin Sheet Steel / O. Kapustynskiy, N. Visniakov // *Adv. Mater. Sci. Eng.* – 2020. – Article ID 5963012. <https://doi.org/10.1155/2020/5963012>
12. Ерицяня, С. Л. Разработка методики оценки свойств сталей после лазерной поверхностной закалки: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.07 / С. Л. Ерицяня. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 18 с.
13. Миширук, О. М. Особенности лазерного упрочнения сталей / О. М. Миширук, М. В. Нерода, А. И. Веремейчик // *Новые технологии и материалы, автоматизация производства: сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 55-летию Брест. гос. техн. ун-та, Брест, 29–30 сент. 2021 г.* / Брест. гос. техн. ун-т. – Брест: Изд-во БрГТУ, 2021. – С. 121–124.
14. Девойно, О. Г. Моделирование поверхностной закалки с использованием сканирующего оптоволоконного лазера / О. Г. Девойно, В. В. Жарский, А. П. Пилипчук // *Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук.* – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 435–443. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-435-443>
15. Веремей, П. В. Компьютерное моделирование процесса лазерной закалки оптоволоконным лазером / П. В. Веремей, О. Г. Девойно, И. П. Филонов // *Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка: сб. докл. 8-го Междунар. симп., Минск, 10–12 апр. 2013 г.: в 2 ч.* / гл. ред. П. А. Витязь. – Минск: Беларус. навука, 2013. – Ч. 2. – С. 51–56.
16. Effect of Laser Surface Hardening on the Microstructure, Hardness, Wear Resistance and Softening of a Low Carbon Steel / Peilei Zhang [et al.] // *Lasers in Engineering.* – 2014. – Vol. 28, iss. 3. – P. 135–149.
17. Laser Hardening Parameters Influencing Component Lifetime and Residual Stresses / S. Němeček [et al.] // *Mater. Sci. Forum.* – 2014. – Vol. 782. – P. 306–310. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.782.306>

References

1. Denesh Babu P., Balasubramanian K. R., Buvanashakaran G. Laser surface hardening: A review. *International Journal of Science and Engineering*, 2011, vol. 5, no. 2/3 pp. 131–151. <http://doi.org/10.1504/IJSURFSE.2011.041398>
2. Neroda M. V., Onys'ko S. R., Martinovskaya O. V., Dragan A. V., Mishchiruk O. M. Investigation of mechanical and plastic properties of steel grade 10kp with coatings formed by ion-plasma nitriding. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Brest State Technical University*, 2019, no. 4: *Mechanical Engineering*, pp. 2–4 (in Russian).
3. Andriyahin V. M., Maiorov V. S., Yakunin V. P. Calculation of surface hardening of iron-carbon alloys using technological CO₂ lasers of continuous action. *Poverhnost': Fizika, himiya, mekhanika* [Surface: Physics, Chemistry, Mechanics], 1983, no. 6, pp. 140–147 (in Russian).

4. Veremeichik A. I., Sazonov M. I., Hvisevich V. M. Plasma technologies as one of the main technologies for improving the performance properties of metal products. *Mekhanika. Nauchnye issledovaniya i uchebno-metodicheskie razrabotki: mezhdunarodnyi sbornik nauchnykh trudov* [Mechanics. Scientific Research and Educational and Methodological Developments: International Collection of Scientific Papers]. Gomel, Belarusian State University of Transport, 2008, iss. 2, pp. 6–12 (in Russian).
5. Golubev V. S., Mikhlyuk A. I., Romanchuk I. A., Protskevich L. I. The use of laser technology for hardening of interchangeable parts working bodies of agricultural machinery. *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov: sbornik nauchnykh trudov. Kniga 2: Tekhnologii i oborudovanie mekhanicheskoi i fiziko-tekhnicheskoi obrabotki* [Modern Methods and Technologies of Creation and Processing of Materials: a Collection of Scientific Papers. Book 2: Technologies and Equipment of Mechanical and Physical-Technical Processing]. Minsk, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 2018, pp. 58–65 (in Russian).
6. Devoino O. G., Shvec I. V. Provision of resource parameters of critical elements of mechanical transmissions using surface layers formed by laser technologies. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika: mezhdunarodnyi nauchno-tekhnicheskii sbornik* [Theoretical and Applied Mechanics: International Scientific and Technical Collection]. Minsk, Belarusian National Technical University, 2019, iss. 34, pp. 266–270. Available at: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/52290/OBESPECHENIE_RESURSNYH_PARAMETROV_OTVETSTVENNYH_EHLEMENTOV_MEKHANICHESKIH_TRANSMISSIJ.pdf?sequence=1 (accessed 21 October 2022) (in Russian).
7. Panchenko V. Ya., Golubev V. S., Vasil'tsov V. V., Galushkin M. G., Dubrov V. D., Evseev A. V., Zharinov A. N., et al. Panchenko V. Ya., ed. *Laser Technologies of Materials Processing: Modern Problems of Fundamental Research and Applied Developments*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 664 p. (in Russian).
8. Casalino G., Moradi M., Moghadam M. K., Khorram A., Perulli P. Experimental and Numerical Study of AISI 4130 Steel Surface Hardening by Pulsed Nd:YAG Laser. *Materials*, 2019, vol. 12, no. 19, art. ID 3136. <https://doi.org/10.3390/ma12193136>
9. Idan A. F. I., Akimov O., Golovko L., Goncharuk O. The study of the influence of laser hardening conditions on the change in properties of steels. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, vol. 2, iss. 5, pp. 69–73. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65455>
10. Gusev V., Morozov V., Gavrilov D. Multiple-factor model of hardness of steel 40H13 after laser processing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 896, iss. 1, art. ID 012119. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012119>
11. Kapustynskiy O., Visniakov N. Laser Treatment for Strengthening of Thin Sheet Steel. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, art. ID 5963012. <https://doi.org/10.1155/2020/5963012>
12. Ericyan S. L. *Development of a Methodology for Assessing the Properties of Steels after Laser Surface Hardening*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 1999. 18 p. (in Russian).
13. Mishchiruk O. M., Neroda M. V., Veremeichik A. I. Features of laser hardening of steels. *Novye tekhnologii i materialy, avtomatizatsiya proizvodstva: sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posvyashchennoi 55-letiyu Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, Brest, 29–30 sentyabrya 2021 g.* [New Technologies and Materials, Production Automation: Collection of Articles of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 55th Anniversary of the Brest State Technical University, Brest, September 29–30, 2021]. Brest, Brest State Technical University Publ., 2021, pp. 121–124 (in Russian).
14. Devoino O. G., Zarski V. V., Pilipchuk A. P. Simulation of surface hardening using a fiber-optic laser scanning. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 4, pp. 435–443 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-435-443>
15. Veremei P. V., Devoino O. G., Filonov I. P. Computer simulation of the laser hardening process by fiber-optic laser. *Poroshkovaya metallurgiya: inzheneriya poverhnosti, novye poroshkovye kompozitsionnye materialy. Svarka: sbornik dokladov 8-go Mezhdunarodnogo simpoziuma, Minsk, 10–12 aprelya 2013 g. Chast' 2* [Powder Metallurgy: Surface Engineering, New Powder Composite Materials. Welding: Collection of Reports of the 8th International Symposium, Minsk, April 10–12, 2013. Part 2]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2013, pp. 51–56 (in Russian).
16. Peilei Zhang, Hua Yan, Peiquan Xu, Yu Z.-S., Li C.-G., Lu Q.-H. Effect of Laser Surface Hardening on the Microstructure, Hardness, Wear Resistance and Softening of a Low Carbon Steel. *Lasers in Engineering*, 2014, vol. 28, iss. 3, pp. 135–149.
17. Němeček S., Míšek M., Černý I., Sís J., Ganev N., Kolařík K. Laser Hardening Parameters Influencing Component Lifetime and Residual Stresses. *Materials Science Forum*, 2014, vol. 782, pp. 306–310. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.782.306>

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-113-120>

УДК 621.793.14



Оригинальная статья

В. В. Рубаник^{1*}, Д. А. Багрец¹, В. В. Рубаник¹ мл., В. И. Урбан¹, В. Г. Дородейко^{1,2}

¹*Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси,
пр. Генерала Людникова, 13, 210009, Витебск, Республика Беларусь*

²*Медицинское предприятие «Симург»,
пр. Генерала Людникова, 13, 210009, Витебск, Республика Беларусь*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ TiNi-СПЛАВА С TiN-ПОКРЫТИЯМИ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Аннотация. Выполнено моделирование деформационного поведения сплава никелида титана Ti–55,84 мас.% Ni (TiNi) с покрытиями из нитрида титана (TiN), полученными вакуумно-дуговым осаждением. С использованием методов дифференциальной сканирующей калориметрии и трехточечного изгиба исследованы параметры мартенситных превращений и деформационное поведение данного сплава. Обоснованы значения характеристических температур TiNi для его использования в качестве материала медицинского назначения. Рассмотрены упруго-силовые характеристики сплава, связанные с проявлением свойств в сверхэластичном состоянии. Установлены зависимости изменения фазового предела текучести, напряжения разгрузочного плато и остаточной деформации образцов TiNi с TiN-покрытиями от температуры окружающей среды в диапазоне от 6 до 37 °С. На основе данных зависимостей получена деформационная кривая, позволяющая прогнозировать механическое поведение изделия из никелида титана, например, стента до и во время его имплантации в организм человека. Сплавы с памятью формы на основе TiNi широко применяются в различных отраслях медицины, в связи с этим перспективны разработки технологических приемов изготовления изделий из TiNi с высокими показателями коррозионной стойкости.

Ключевые слова: TiNi-сплавы, TiN-покрытия, вакуумно-дуговое осаждение, сверхэластичность, мартенситные превращения, трехточечный изгиб, напряжение, деформация

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Рубаник Василий Васильевич** – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией физики металлов, Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси. E-mail: v.v.rubanik@tut.by; *Багрец Дмитрий Александрович* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси. E-mail: bagurets@gmail.com; *Рубаник Василий Васильевич (мл.)* – доктор технических наук, доцент, директор, Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси. E-mail: ita@vitebsk.by; *Урбан Вадим Иванович* – аспирант, Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси. E-mail: vadik.urban1995@mail.ru; *Дородейко Вячеслав Геннадьевич* – кандидат технических наук, докторант, Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси; директор ЗАО «Медицинское предприятие «Симург». E-mail: info@simurg.by

Вклад авторов: *Рубаник Василий Васильевич* – планирование исследований, обобщение результатов, формулировка выводов; *Багрец Дмитрий Александрович* – анализ и обобщение данных литературы, проведение калориметрических исследований и механических испытаний, сравнительный анализ экспериментальных данных, написание и оформление текста рукописи; *Рубаник Василий Васильевич (мл.)* – разработка методологии исследования, редактирование текста рукописи; *Урбан Вадим Иванович* – получение образцов TiNi-сплава с TiN-покрытиями, работа с графическим материалом; *Дородейко Вячеслав Геннадьевич* – интерпретация результатов исследования.

Для цитирования: Моделирование деформационного поведения TiNi-сплава с TiN-покрытиями для медицинского применения / В. В. Рубаник [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 2. – С. 113–120. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-113-120>

Поступила в редакцию: 20.02.2023

Утверждена к печати: 25.05.2023

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Original articleVasili V. Rubanik^{*}, Dzmitry A. Bahrets¹, Vasili V. Rubanik jr.¹, Vadzim I. Urban¹, Viachaslau G. Dorodeiko^{1,2}¹*Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus,
13, General Lyudnikov Ave., 210009, Vitebsk, Republic of Belarus*²*CJSC “Medical Enterprise “Simurg”,
13, General Lyudnikov Ave., 210009, Vitebsk, Republic of Belarus***SIMULATION OF DEFORMATION BEHAVIOR OF TiNi ALLOY
WITH TiN COATINGS FOR MEDICAL APPLICATIONS**

Abstract. The deformation behavior of the titanium nickelide alloy Ti–55.84 wt. % Ni (TiNi) with titanium nitride (TiN) coatings obtained by arc-PVD has been simulated. Differential scanning calorimetry and three-point bending test were used to study the parameters of martensitic transformations and the deformation behavior of this alloy. The values of the characteristic temperatures for the TiNi alloy that can be used in medical applications were substantiated. The elastic-force characteristics of the alloy related to the properties in the superelastic state were considered. The dependences of the change in the phase yield strength, the stress of the unloading plateau, and the residual deformation of the TiNi samples with TiN coatings on the ambient temperature range between 6 to 37 °C were determined. Based on these dependencies, a deformation curve was obtained that can predict the mechanical behavior of a TiNi product, for example, a stent, before and during its implantation into a human body. TiNi-based shape memory alloys are widely used in various branches of medicine; therefore, the development of technological methods for manufacturing products from TiNi with high corrosion resistance is promising.

Keywords: TiNi alloys, TiN coatings, arc-PVD, superelasticity, martensitic transformations, three-point bending, stress, deformation

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

Information about the authors: *Vasili V. Rubanik*^{*} – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Laboratory of Physics of Metals, Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: v.v.rubanik@tut.by; *Dzmitry A. Bahrets* – Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: bagurets@gmail.com; *Vasili V. Rubanik (jr.)* – Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Director, Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: ita@vitebsk.by; *Vadzim I. Urban* – Postgraduate Student, Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: vadik.urban1995@mail.ru; *Viachaslau G. Dorodeiko* – Cand. Sci. (Engineering), Doctoral Student, Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus; Director, CJSC “Medical Enterprise “Simurg”. E-mail: info@simurg.by

Contribution of the authors: *Vasili V. Rubanik* – research planning, generalization of the research results, formulation of conclusions; *Dzmitry A. Bahrets* – analysis and generalization of literature data, conducting calorimetric studies and mechanical tests, comparative analysis of the experimental data, writing and formatting the text of the manuscript; *Vasili V. Rubanik (jr.)* – development of research methodology, editing the text of the manuscript; *Vadzim I. Urban* – obtaining TiNi alloy samples with TiN coatings, working with graphic material; *Viachaslau G. Dorodeiko* – interpretation of research results.

For citation: Rubanik V. V., Bahrets D. A., Rubanik V. V., jr., Urban V. I., Dorodeiko V. G. Simulation of deformation behavior of TiNi alloy with TiN coatings for medical applications. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 2, pp. 113–120 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-113-120>

Received: 20.02.2023

Approved for printing: 25.05.2023

Введение. На сегодняшний день в медицине используется широкий спектр титановых сплавов, различных по своему химическому составу и механическим свойствам. Наиболее совместимыми с тканями организма благодаря сочетанию высоких физико-механических свойств и коррозионной стойкости с эффектами термомеханической памяти являются сплавы никелида титана (TiNi) [1, 2].

Стойкость к коррозии титановых сплавов обусловлена образованием пассивной оксидной пленки на их поверхности. Находясь в контакте с естественной средой организма, этот слой может быть нарушен как химическим, так и механическим воздействием. В результате ионы металлов (в случае TiNi – ионы никеля) могут диффундировать в биологическую среду, накапливаться в тканях и оказывать канцерогенное, токсическое и аллергическое воздействие на организм человека [3–5]. Эффективным технологическим приемом улучшения эксплуатационных характеристик медицинских изделий и устройств является создание барьерных слоев и модификация поверхности с использованием методов физического осаждения покрытий в вакууме (PVD), среди которых одним из наиболее востребованных является вакуумно-дуговое осаждение (arc-PVD).

Процессы arc-PVD сопровождаются значительным температурным воздействием на материал основы, что в случае нанесения покрытия на сплавы TiNi приводит к изменению кинетики и характеристических температур мартенситных превращений [6], снижению их физико-механических

характеристик, в частности фазового предела текучести и предела прочности [7], уменьшению величины восстанавливаемой деформации за счет эффекта памяти формы [8], то есть функциональные свойства TiNi становятся отличными от предварительно заданных до нанесения покрытия.

Авторами разработаны способ (патент Республики Беларусь № 19 507) и методика [9], которые позволяют в процессе вакуумно-дугового осаждения покрытий из нитрида титана (TiN-покрытий) задавать форму и требуемые термомеханические характеристики изделиям из никелида титана медицинского назначения, например ортодонтическим проволочным дугам.

Цель работы – моделирование деформационного поведения TiNi-сплава с TiN-покрытиями, полученными методом arc-PVD, для медицинского применения.

Экспериментальная часть. Для проведения исследований использовали образцы из медицинского сплава Ti–55,84 мас.% Ni (далее – TiNi) в виде плющенко с размерами сечения $0,2 \times 1,2$ мм.

Предварительная подготовка образцов перед нанесением TiN-покрытия детально описана в [9] и включала очистку от загрязнений и обезжиривание поверхности в ультразвуковой ванне УЗУ-0,25.

Покрытия из нитрида титана наносили с использованием установки вакуумно-дугового осаждения «Булат-6». Процесс включал нанесение подслоя титана и непосредственно осаждение TiN-покрытия (табл. 1). Подслоем титана выступал в качестве переходного температурно-защитного слоя для повышения адгезии TiN-покрытия к основе.

Т а б л и ц а 1. Технологические параметры режима осаждения TiN-покрытий на поверхность образцов из сплава Ti–55,84 мас.% Ni

Table 1. Technological parameters of TiN coatings deposition on the surface of Ti–55.84 wt.% Ni samples

Режим осаждения Deposition mode	I , А I , A	U , В U , V	P , Па P , Pa	t , мин t , min
Подслой Ti Ti sublayer	100	150	$2 \cdot 10^{-2}$	0,8
TiN-покрытие TiN coating			$4 \cdot 10^{-1}$	19,2

Величину потенциала (U), тока (I) и время осаждения (t) подслоя подбирали таким образом, чтобы обеспечить постоянную температуру образцов на уровне 400–420 °С. В этом температурном диапазоне наблюдается максимальное влияние энергетической обработки на функциональные свойства никелида титана [10]. После завершения процесса осаждения образцы выдерживали в вакууме для остывания до ~ 100 °С.

Кинетику и температуры мартенситных превращений (МП) исследуемого сплава TiNi в состоянии поставки и после нанесения TiN-покрытий исследовали методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) с помощью прибора NETZSCH DSC 214 POLYMA. Скорость охлаждения и нагрева образцов составляла 10 °С/мин.

Упруго-силовые характеристики образцов TiNi определяли на испытательной машине ИП 5158-5.

Результаты и их обсуждение. На ДСК-кривых, полученных для образца в состоянии поставки, пиков выделения/поглощения тепла выявлено не было, что говорит о сильно упрочненном состоянии материала. Заявленная производителем (ООО «Промышленный центр МАТЭК-СПФ», г. Москва) температура окончания обратного МП (A_k) равнялась 8 °С.

При охлаждении образца с TiN-покрытием от 60 до –60 °С (рис. 1) наблюдаются два экзотермических пика, соответствующих переходам B2→R и R→B19', причем температура окончания второго не попала в исследуемый температурный диапазон ($M_k < -60$ °С). При нагреве в том же диапазоне последовательно реализуются обратные превращения, причем начало R→B2-перехода происходит при меньшей температуре, чем окончание B19'→R-перехода.

Начальные (обозначены индексом «н») и конечные (обозначены индексом «к») температуры МП определяли в соответствии со стандартом ASTM F2004-17; их значения для исследуемого сплава TiNi после осаждения TiN-покрытия приведены в табл. 2. Наиболее важной из них в случае медицинского применения сплавов TiNi является температура A_k . Для обеспечения полноты формовосстановления изделия (например, стента) она должна быть ниже 37 °С, чтобы при темпе-

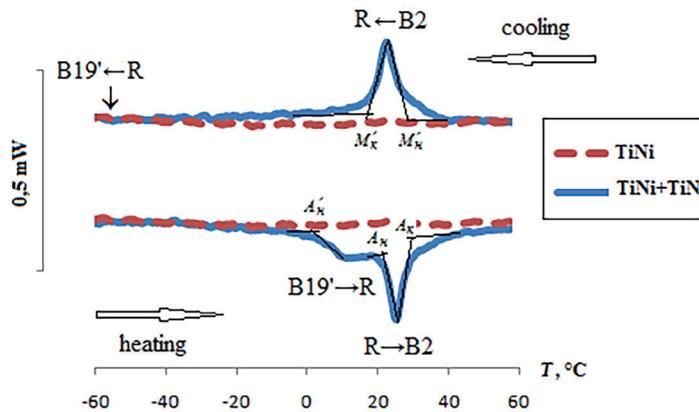


Рис. 1. Калориметрические кривые медицинского сплава Ti–55,84 мас.% Ni в состоянии поставки (TiNi) и после осаждения TiN-покрытия (TiNi + TiN)
Fig. 1. Calorimetric curves of Ti–55.84 wt.% Ni medical alloy as received (TiNi) and after TiN deposition (TiNi + TiN)

ратуре человеческого тела материал стента находился полностью в высокотемпературной фазе. И наоборот, предварительное деформирование изделия (например, заправка стента в катетер) осуществляют в диапазоне температур $0 \div M'_k$, где M'_k – температура окончания B2→R-перехода. В этом случае деформация происходит за счет образования мартенсита при сравнительно невысоких внешних напряжениях. Из табл. 2 видно, что для исследуемого TiNi-сплава после осаждения TiN-покрытия значения характеристических температур ($A_k = 31$ °C, $M'_k = 16$ °C) удовлетворяют рассмотренным выше требованиям. Кроме того, можно отметить достаточно узкий интервал B2↔R-перехода (~ 10 °C), что важно для более точного «срабатывания» изделия.

Таблица 2. Характеристические температуры мартенситных превращений для сплава Ti–55,84 мас.% Ni после осаждения TiN-покрытия, °C
Table 2. Characteristic temperatures of martensitic transformations for Ti–55.84 wt.%Ni alloy after TiN deposition, °C

R→B19'		B2→R		B19'→R		R→B2	
M_H	M_K	M'_H	M'_K	A'_H	A'_K	A_H	A_K
~ -50	–	29	16	4	–	22	31

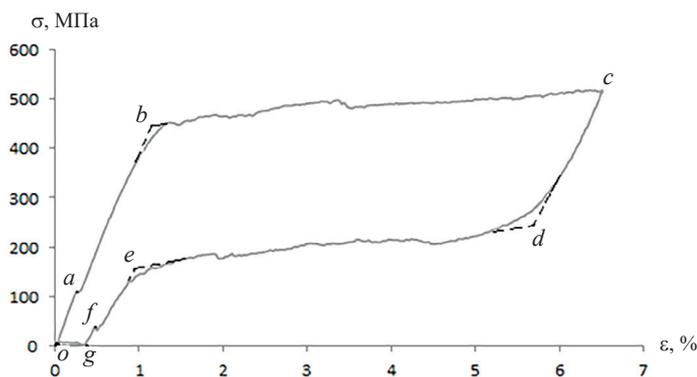
Основные функциональные характеристики медицинских изделий из сплавов TiNi связаны со свойством сверхэластичности. В сплавах, обогащенных никелем, сверхэластичность реализуется в две стадии, связанные при нагрузке с переходами B2→R+B19'→B19', а при разгрузке – B19'→R+B19'→B2 [1, 2], то есть мартенситные превращения начинаются с формирования R-фазы, которая практически сразу охватывает весь объем материала, а затем образуется моноклинная структура B19'. Такая последовательность МП наблюдается на кривой деформирования растяжением образца исследуемого сплава TiNi в состоянии поставки (рис. 2). При температуре деформирования $T_d = 23$ °C материал находился в высокотемпературной B2-фазе ($A_k = 8$ °C). Участок $o-a$ соответствует ее упругой деформации вплоть до достижения в точке a напряжения реализации B2→R-перехода (σ_R). Дальнейшее накопление деформации (участок $a-b$) происходит за счет монодоменизации кристаллов R-фазы. Суммарная деформация, накопленная на участке $o-b$, составила для исследуемого сплава $\sim 1,2$ %. За аномальную «упругость» отвечает в основном мартенсит ромбоэдрической модификации (R), который под действием нагрузки монодоменизируется [1].

В точке b , соответствующей фазовому пределу текучести (σ_M) сплава TiNi, инициируется R→B19'-переход, который на кривой деформирования характеризуется пологим плато $b-c$.

Максимальная деформация, задаваемая при растяжении, равнялась 6,5 % (точка c). Данная величина соответствует предельным деформациям при эксплуатации медицинских изделий из сплава TiNi: например, при заправке стентов в катетер [11] или установке ортодонтических дуг в брекет-системы (ГОСТ Р ИСО 15 841-2017).

Снятие нагрузки приводит к обратной последовательности переходов: B19'→R на участке $d-e$ и R→B2 на участке $e-f$. Графическое положение точек b , d и e определялось по методу касательных аналогично определению характеристических температур фазовых переходов методом ДСК.

Рис. 2. Деформационная кривая, характеризующая сверхэластичное поведение медицинского сплава Ti–55,84 мас.% Ni при растяжении
 Fig. 2. Deformation curve characterizing the superelastic behavior of Ti–55.84 wt.% Ni medical alloy under tension



Разгрузочное плато $d-e$ является важнейшей особенностью TiNi-сплавов, проявляющих сверхэластичные свойства. Механизм проявления сверхэластичного поведения связан с возникновением мартенситной фазы под действием внешнего напряжения и обратного перехода в высокотемпературную фазу при снятии внешней нагрузки. Накопление и возврат деформации, сопровождающие эти процессы, обусловлены высокой подвижностью межфазных границ раздела. «Трение», преодолеваемое границами при их образовании, перемещении и взаимодействии, обуславливает диссипацию энергии, которая характеризуется шириной петли гистерезиса на кривой деформирования [1]. Возврат накопленной за счет МП деформации возможен лишь тогда, когда напряжение мартенситного сдвига σ_M превышает величину механического гистерезиса ΔH .

В точке e начинается демонодоменизация кристаллов R-фазы, в точке f – завершается $R \rightarrow B2$ -переход. На участке $f-g$ происходит упругий возврат деформации исходной B2-фазы. Остаточная деформация после разгрузки составила $\sim 0,35$ %. Появление остаточной деформации в данном случае (в отсутствие пластической деформации) связано с тем, что при обратном превращении могут реализовываться новые варианты ориентировки исходной фазы [2]. Основные упруго-силовые характеристики исследуемого сплава TiNi сведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Упруго-силовые характеристики сплава Ti–55,84 мас.%Ni в состоянии поставки
 T a b l e 3. Elastic-force characteristics of as-received Ti–55.84 wt.%Ni alloy

Параметр Parameter	Обозначение, единица измерения Designation	Значение Value
Напряжение начала B2→R-перехода	σ_R , МПа	105
Напряжение мартенситного сдвига (фазовый предел текучести)	σ_M , МПа	450
Напряжение, соответствующее максимальной деформации	σ_{max} , МПа	515
Величина механического гистерезиса $R \leftrightarrow B19'$ -перехода	ΔH_1 , МПа	300
Характеристическое напряжение, определяемое точкой на середине разгрузочного плато $d-e$	σ_c , МПа	210
Величина механического гистерезиса $B2 \leftrightarrow R$ -перехода	ΔH_2 , МПа	70
Модуль упругости, определяемый по углу наклона участка $o-a$	E , ГПа	40
Остаточная деформация	$\epsilon_{ост}$, %	0,35
Сверхэластичная деформация	$\epsilon_{сэ}$, %	4,65
Коэффициент сверхэластичности, определяемый отношением тангенса угла наклона упругого участка $o-a$ к тангенсу угла наклона разгрузочного плато $d-e$	$R_{сэ}$	21

Деформационные кривые при растяжении традиционно используются для анализа механических свойств металлов и сплавов технического назначения. Американским национальным институтом стандартов совместно с Американской стоматологической ассоциацией (ANSI/ADA) утверждена спецификация, в которой рекомендован трехточечный изгиб для имитации клинического поведения ортодонтических дуг [12]. Изгибные деформации более типичны в сравнении с деформациями растяжением при изготовлении конструкций с элементами из сплавов с памятью формы иного (не только ортодонтического) назначения: стентов, дилататоров, экстракторов, контрацептивов [13] и др. Поэтому для моделирования механического поведения и анализа упруго-силовых характеристик исследуемого сплава TiNi после осаждения TiN-покрытия деформационные кривые были получены по схеме трехточечного изгиба.

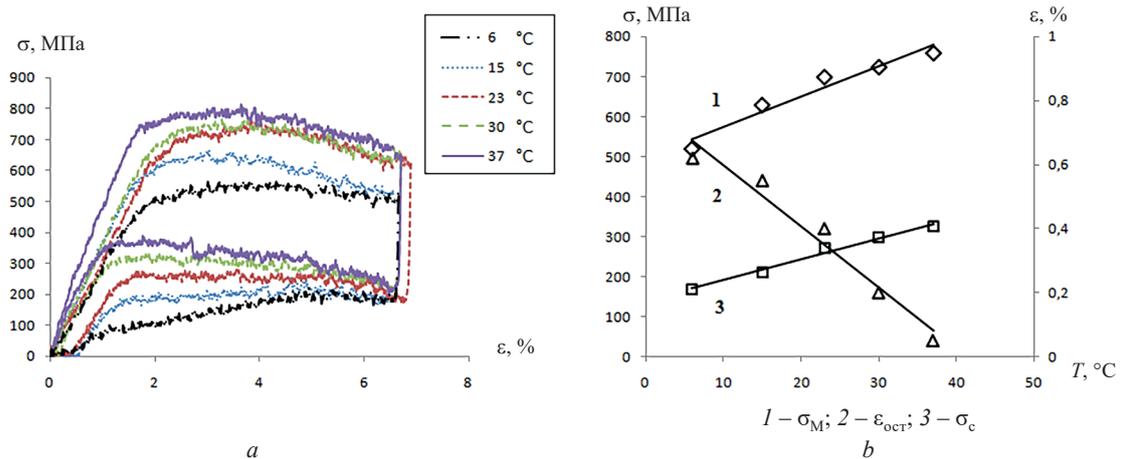


Рис. 3. Температурные зависимости деформационных кривых (а) и упруго-силовых характеристик (b) TiNi-образцов с TiN-покрытиями

Fig. 3. Temperature dependencies of deformation curves (a) and elastic-force characteristics (b) of TiN coated TiNi samples

Для этого на опоры, расстояние между которыми L (мм), помещали образец. Измеряя нагрузку F (Н) и прогиб образца y (мм), определяли значения прикладываемого напряжения (σ) и соответствующей деформации образца (ε) по следующим формулам [14]:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh}, \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{6yh}{L^2} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где b и h – соответственно ширина и толщина образца, мм.

Испытания проводили:

- 1) при комнатной температуре 23 ± 2 °С, примерно соответствующей температуре пика B2↔R-перехода ($T_d \approx A_p$);
- 2) при температурах, соответствующих предварительному деформированию изделия (6 ± 2 °С, $0 < T_d < M_k'$) и его эксплуатации внутри организма (37 ± 2 °С, $T_d > A_k$);
- 3) при температурах окончания прямого (15 ± 2 °С, $T_d \approx M_k'$) и обратного МП (30 ± 2 °С, $T_d \approx A_k$).

Из полученных деформационных кривых (рис. 3, а) можно заключить, что для всех температур испытаний явно выраженной точки начала B2→R-перехода выявлено не было. О реализации данного перехода судили по аномально высоким значениям деформации «упругого» участка (1,6–1,8 %), включающего собственно упругую деформацию аустенитной фазы (при температурах выше M_k'), образование R-фазы и, как отмечалось ранее, ее монодоменизацию.

Упруго-силовые характеристики исследуемого TiNi-сплава с TiN-покрытиями, определенные на основе деформационных кривых, приведены на рис. 3, b и в табл. 4.

Проявление сверхэластичных свойств (возврат накопленной деформации за счет мартенситного превращения при $T = \text{const}$) возможно только в определенном интервале температур, когда выполняется условие: $\Delta H < \sigma_M < \sigma_d$, где σ_d – дислокационный предел текучести. Установлено (см. рис. 3, b), что параметр σ_M линейно возрастает с увеличением температуры, а его минимальная величина при $T_d = 6$ °С составила 520 МПа. Величина механического гистерезиса ΔH варьировалась в пределах от 330 до 420 МПа (см. табл. 4), то есть для всего температурного диапазона была меньше фазового предела текучести, вследствие чего наблюдалось выраженное сверхэластичное поведение исследуемых образцов. Напряжение разгрузочного плато σ_c также увеличивалось с ростом температуры испытания: от 170 МПа при $T_d = 6$ °С до 325 МПа при $T_d = 37$ °С, остаточная деформация $\varepsilon_{\text{ост}}$ при этом монотонно убывала от 0,62 до 0,05 %.

На основе установленных закономерностей изменения упруго-силовых характеристик исследуемых образцов из сплава Ti–55,84 мас.% Ni с TiN-покрытиями была получена модельная зависимость напряжения от деформации (рис. 4), характеризующая различные манипуляции при введении медицинского изделия (например, стента) в организм человека.

Рис. 4. Модельная деформационная кривая медицинского изделия (стента) из сплава Ti–55,84 мас.% Ni с TiN-покрытием (стрелками указано направление изменения нагрузки)

Fig. 4. Model deformation curve of a medical product (stent) made of TiN coated Ti–55.84 wt.% Ni alloy (arrows indicate the direction of load change)

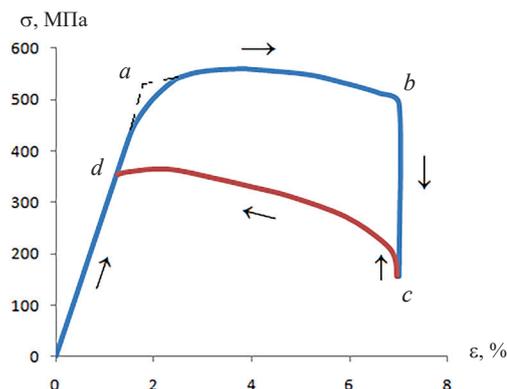


Таблица 4. Упруго-силовые характеристики сплава Ti–55,84 мас.%Ni с покрытиями TiN при различных температурах испытания

Table 4. Elastic-force characteristics of TiN coated Ti-55.84 wt.% Ni alloy at different test temperatures

Параметр Parameter	Температура испытания (T_d), °C Test temperature (T_d), °C				
	6	15	23	30	37
Фазовый состав при T_d	R	R	B2+R	B2	B2
σ_M , МПа	520	630	700	725	760
ΔH , МПа	330	350	415	395	420
σ_c , МПа	170	210	270	300	325
E , ГПа	29	33	35	38	45
$\varepsilon_{ост}$, %	0,62	0,55	0,40	0,20	0,05

На начальном этапе изделие охлаждают до 6–8 °C и, деформируя его, заправляют в проводник (катетер). Максимальное напряжение на этой стадии соответствует точке *a* и составляет $\sigma_M = 520$ МПа при $T_d = 6$ °C. Задаваемая максимальная деформация (точка *b*) может достигать 6–7 %. После заправки в отсутствие внешней нагрузки изделие находится в стесненном состоянии и генерирует реактивные напряжения, величина которых до введения в организм составляет ~ 160 МПа (точка *c*). Разница напряжений в точках *b* (под нагрузкой) и *c* (в отсутствие внешней нагрузки) определяет величину механического гистерезиса.

При введении в организм и нагреве до температуры тела наблюдается рост реактивных напряжений до ~ 200–220 МПа. Высвобождаясь из катетера, стент воздействует на стенки патологически суженного органа, расширяя его. По мере уменьшения деформации (расширения просвета полого органа) величина напряжений возрастает, а их среднее значение в пределах разгрузочного плато (участок *c–d*) составляет $\sigma_c = 325$ МПа. Длина плато при $\varepsilon_{max} = 6,5$ % равняется ~ 5 %.

Заключение. В результате температурного воздействия в процессе осаждения методом arc-PVD TiN-покрытия в сплаве Ti–55,84 мас.% Ni формируется комплекс функциональных свойств, оптимальных для применения данного сплава в качестве конструкционного материала при изготовлении медицинских изделий со свойством сверхэластичности (ортодонтических дуг, дилататоров, стентов, контрацептивов и др.).

На основе температурных зависимостей упруго-силовых характеристик образцов из сплава Ti–55,84 мас.%Ni с TiN-покрытиями получена деформационная кривая, позволяющая прогнозировать механическое поведение медицинского изделия до и во время имплантации в организм.

Список использованных источников

1. Гюнтер, В. Э. Никелид титана. Медицинский материал нового поколения. – Томск: Изд-во МИЦ, 2006. – 296 с.
2. Shape Memory Materials / eds.: K. Otsuka, C. M. Wayman. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1999. – 291 p.
3. Al-Waheidi, E. M. Allergic reaction to nickel orthodontic wire: a case report / E. M. Al-Waheidi // Quintessence Int. – 1995. – Vol. 26, № 6. – P. 385–387.
4. Bass, J. K. Nickel hypersensitivity in the orthodontic patient / J. K. Bass, H. Fine, G. J. Cisneros // Am. J. Orthod. Dentofacial. Orthop. – 1993. – Vol. 103, № 3. – P. 280–285. [https://doi.org/10.1016/0889-5406\(93\)70009-d](https://doi.org/10.1016/0889-5406(93)70009-d)

5. Evaluation of carcinogenicity and chronic toxicity associated with orthopedic implants in mice / K. Takamura [et al.] // *J. Biomed. Mat. Res.* – 1994. – Vol. 28, № 5. – P. 583–589. <https://doi.org/10.1002/jbm.820280508>
6. Мартенситные превращения и свойства поверхности никелида титана после ионно-плазменного напыления TiN / Д. А. Багрец [и др.] // *Материалы, технологии, инструменты.* – 2013. – Т. 18, № 2. – С. 47–51.
7. Багрец, Д. А. Волочение проволоки никелида титана с нанесенным слоем нитрида титана / Д. А. Багрец, Ю. В. Новиков, В. Ю. Новиков // *Моделирование в технике и экономик: Междунар. науч.-практ. конф.: сб. материалов, 23–24 марта 2016 г.* – Витебск, 2016. – С. 130–132.
8. Влияние ионно- и электронно-лучевой модификации поверхности на эффекты сверхэластичности и памяти формы в никелиде титана / Л. Л. Мейснер [и др.] // *Журн. функциональных материалов.* – 2007. – Т. 1, № 2. – С. 58–65.
9. Задание функциональных свойств TiNi сплавам в процессе ионно-плазменного осаждения покрытий / В. В. Рубаник [и др.] // *Докл. Нац. акад. наук Беларуси.* – 2021. – Т. 65, № 1. – С. 119–128. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-1-119-128>
10. Милукина, С. Н. Технологические приемы обработки TiNi проволоки / С. Н. Милукина, В. В. Рубаник, В. В. Рубаник, мл. // *Современные перспективные материалы / под ред. В. В. Клубовича.* – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2011. – Гл. 18. – С. 511–536.
11. Использование эффекта сверхэластичности при разработке внутрисосудистых медицинских имплантов из сплавов на основе никелида титана / А. И. Лотков [и др.] // *Изв. Томск. политехн. ун-та. Химия и хим. технологии.* – 2014. – Т. 325, № 3. – С. 122–129.
12. *Dental Materials and Their Selection* / ed. W. J. O'Brien. – Quintessence Publ. Co. Inc., 2002. – 418 p.
13. Использование материалов с эффектом памяти формы для изготовления внутриматочных контрацептивов / В. В. Рубаник [и др.] // *Охрана материнства и детства.* – 2007. – № 2 (10). – С. 92–96.
14. Феодосьев, В. И. Соппротивление материалов: в 8 т. / В. И. Феодосьев. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – Т. 2. – 592 с.

References

1. Gyunter V. E. *Titanium Nickelide. New Generation Medical Material.* Tomsk, Publ. House MITS, 2006. 296 p. (in Russian).
2. Otsuka K., Wayman C. M. (eds.). *Shape Memory Materials.* Cambridge, Cambridge University Press, 1999. 291 p.
3. Al-Waheidi E. M. Allergic reaction to nickel orthodontic wire: a case report. *Quintessence International*, 1995, vol. 26, no. 6, pp. 385–387.
4. Bass J. K., Fine H., Cisneros G. J. Nickel hypersensitivity in the orthodontic patient. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 1993, vol. 103, no. 3, pp. 280–285. [https://doi.org/10.1016/0889-5406\(93\)70009-d](https://doi.org/10.1016/0889-5406(93)70009-d)
5. Takamura K., Hayashi K., Ishinishi N., Yamada T., Sugioka Y. Evaluation of carcinogenicity and chronic toxicity associated with orthopedic implants in mice. *Journal of Biomedical Materials Research*, 1994, vol. 28, no. 5, pp. 583–589. <https://doi.org/10.1002/jbm.820280508>
6. Bahrets D. A., Klubovich V. V., Rubanik V. V., Dorodeiko V. G., Milyukina S. N., Rubanik V. V. jr. Martensitic transformations and surface properties of titanium nickelide after ion-plasma sputtering TiN. *Materialy, tekhnologii, instrumenty = Materials, Technologies, Tools*, 2013, vol. 18, no. 2, pp. 47–51 (in Russian).
7. Bahrets D. A., Novikov Yu. V., Novikov V. Yu. Wire drawing titanium nickelide coated with a layer of titanium nitride. *Modelirovanie v tekhnike i ekonomike: Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya: sbornik materialov, Vitebsk, 23–24 марта 2016 g.* [International Scientific-Practical Conference “Modeling in Technology and Economics”: Collection of Materials, Vitebsk, March 23–24, 2016]. Vitebsk, 2016, pp. 130–132 (in Russian).
8. Meisner L. L., Nikonova I. V., Lotkov A. I., Razdorsky V. V., Kotenko M. V. Influence of ion- and electron-beam surface modification on the effects of superelasticity and shape memory in titanium nickelide. *Zhurnal funktsional'nykh materialov = Journal of Functional Materials*, 2007, vol. 1, no. 2, pp. 58–65 (in Russian).
9. Rubanik V. V., Bahrets D. A., Rubanik V. V. jr., Urban V. I., Uzhkina A. N., Dorodeiko V. G. Setting the functional properties of TiNi alloys during ion-plasma coating deposition process. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 1, pp. 119–128 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-1-119-128>
10. Milyukina S. N., Rubanik V. V., Rubanik V. V. jr. Technological methods of processing TiNi wire. Klubovich V. V. (ed.). *Modern Perspective Materials.* Vitebsk, Publ. House VSTU, 2011, ch. 18, pp. 511–536 (in Russian).
11. Lotkov A. I., Kashin O. A., Grishkov V. N., Meisner L. L. Use of superelasticity effect when developing intravascular medical implants from nickel-titanium based alloys. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Khimiya i khimicheskie tekhnologii = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Chemistry and Chemical Technologies*, 2014, vol. 325, no. 3, pp. 122–129 (in Russian).
12. O'Brien W. J. (ed.). *Dental Materials and Their Selection.* Quintessence Publ. Co. Inc., 2002. 418 p.
13. Rubanik V. V., Milyukina S. N., Rubanik V. V. jr., Dorodeiko V. G., Zhuravlev A. Yu. The use of shape memory materials for the manufacture of intrauterine contraceptives. *Okhrana materinstva i detstva [Protection of Motherhood and Childhood]*, 2007, no. 2 (10), pp. 92–96 (in Russian).
14. Feodosiev V. I. *Strength of Materials. Vol. 2.* Moscow, Publ. House Bauman University, 1999. 592 p. (in Russian).

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

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА
MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-121-136>
УДК 631.372:534.1



Оригинальная статья

Ч. И. Жданович*, В. Н. Плищ

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

**ВЫБОР КОЛИЧЕСТВА И РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОДДЕРЖИВАЮЩИХ КАТКОВ
ГУСЕНИЧНОГО ТРАКТОРА НА ОСНОВАНИИ АНАЛИЗА КОЛЕБАНИЙ
ВЕРХНЕЙ ВЕТВИ РЕЗИНОАРМИРОВАННОЙ ГУСЕНИЦЫ**

Аннотация. Получена аналитическая зависимость для определения амплитуды колебаний резиноармированной гусеницы в пролете свободной ветви обвода трактора между поддерживающими катками. Исследован процесс колебаний указанного типа гусеницы в середине пролета свободной ветви при работе гусеничных тракторов марки «Беларус» в тяговом и транспортном режимах с учетом скорости движения. Показано, что в качестве определяющего критерия по выбору параметров пролетов свободной ветви обвода необходимо принимать резонансные режимы поперечных колебаний резиноармированной гусеницы на эксплуатационных диапазонах работы трактора. Рассчитаны максимальные значения амплитуд колебаний такой гусеницы в пролете свободной ветви обвода между поддерживающими катками для семейства гусеничных тракторов «Беларус» при различных режимах работы. Проведен частотный анализ колебаний и установлено, что на гусеничных сельскохозяйственных тракторах с резиноармированными гусеницами возможен режим возникновения резонансных колебаний в пролете свободной ветви обвода между поддерживающими катками. Получена аналитическая зависимость для определения предельного расстояния между поддерживающими катками обвода гусеничного трактора с резиноармированной гусеницей, упругой и заблокированной подвесками по критерию вывода резонансного режима колебаний гусеницы в пролете свободной ветви за эксплуатационный диапазон работы трактора. Рассчитаны значения предельных расстояний между поддерживающими катками для тракторов «Беларус» 1802, 2102 и 2103 при различных режимах работы подвески. Определено необходимое количество поддерживающих катков и даны рекомендации по месту их установки. Результаты настоящих исследований могут быть использованы при создании и эксплуатации тракторов с резиноармированными гусеницами.

Ключевые слова: гусеничный трактор, резиноармированная гусеница, режимы движения, колебания ветви, амплитуда колебаний, поддерживающие катки, расположение катков

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Жданович Чеслав Иосифович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Тракторы», Белорусский национальный технический университет. <https://orcid.org/0000-0002-3165-7625>. E-mail: chzhdanovich@mail.ru; *Плищ Владимир Николаевич* – старший преподаватель кафедры «Тракторы», Белорусский национальный технический университет. <http://orcid.org/0000-0001-5869-2781>. E-mail: v_plishch@mail.ru

Вклад авторов: *Жданович Чеслав Иосифович* – редактирование текста рукописи, уточнение выводов, экспертная оценка, утверждение финальной версии; *Плищ Владимир Николаевич* – поиск публикаций по теме статьи, разработка методологии исследования, написание текста рукописи, работа с графическим материалом.

Для цитирования: Жданович, Ч. И. Выбор количества и расположения поддерживающих катков гусеничного трактора на основании анализа колебаний верхней ветви резиноармированной гусеницы / Ч. И. Жданович, В. Н. Плищ // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 2. – С. 121–136. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-121-136>

Поступила в редакцию: 14.03.2023

Утверждена к печати: 25.05.2023

© Жданович Ч. И., Плищ В. Н., 2023

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Original article

Cheslav I. Zhdanovich*, Vladimir N. Plishch

*Belarusian National Technical University, 65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus***SELECTING NUMBER AND LOCATION OF SUPPORT ROLLERS OF CRAWLER TRACTOR BASED ON ANALYSIS OF VIBRATIONS OF UPPER BRANCH OF RUBBER TRACK**

Abstract. An analytical dependence was obtained to determine the amplitude of vibrations of the rubber track in the span of the free branch of the tractor bypass between the supporting rollers. The process of oscillations of this type of track in the middle of the span of a free branch during the operation of tracked tractors of the brand “Belarus” in pull and transport modes, taking into account the speed of movement, is investigated. It is shown that the resonant modes of transverse vibrations of the rubber track at the operational ranges of the tractor operation should be taken as the determining criterion for choosing the parameters of the spans of the free branch of the bypass. The maximum values of the oscillation amplitudes of such a track in the span of the free branch of the bypass between the supporting rollers for the family of tracked tractors “Belarus” under different operating modes are calculated. A frequency analysis of oscillations was carried out and it was found that on tracked agricultural tractors with rubber tracks, a mode of occurrence of resonant oscillations in the span of the free branch of the bypass between the supporting rollers is possible. An analytical dependence has been obtained to determine the limiting distance between the supporting rollers of a tractor with a rubber track and elastic and locked suspensions according to the criterion of deducing the resonant mode of vibration of the track in the span of a free branch outside the operational range of the tractor. The values of the maximum distances between the support rollers for tractors “Belarus” 1802, 2102 and 2103 at different suspension modes are calculated. The required number of supporting rollers is determined and recommendations are given on the place of their installation. The results of these studies can be used in the creation and operation of tractors with rubber tracks

Key words: crawler tractor, rubber track, driving modes, branch oscillations, amplitude of oscillations, support rollers, location of rollers

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

Information about the authors: *Cheslav I. Zhdanovich** – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department “Tractors”, Belarusian National Technical University. <https://orcid.org/0000-0002-3165-7625>. E-mail: chzhdanovich@mail.ru; *Vladimir N. Plishch* – Senior Lecturer of the Department “Tractors”, Belarusian National Technical University. <http://orcid.org/0000-0001-5869-2781>. E-mail: v_plishch@mail.ru

Contribution of the authors: *Cheslav I. Zhdanovich* – editing the text of the manuscript, clarification of conclusions, expert evaluation, approval of the final version; *Vladimir N. Plishch* – search for publications on the topic of the article, development of research methodology, writing the text of the manuscript, working with graphic material.

For citation: Zhdanovich Ch. I., Plishch V. N. Selecting number and location of support rollers of crawler tractor based on analysis of vibrations of upper branch of rubber track. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 2, pp. 121–136 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-121-136>

Received: 14.03.2023

Approved for printing: 25.05.2023

Введение. В настоящее время на сельскохозяйственных тракторах широко используются резиноармированные гусеницы (РАГ) и упругие подвески [1–4]. Скорости такой техники выросли до 30 км/ч [1]. Часто РАГ устанавливается в движитель, изначально спроектированный под металлическую гусеницу, путем ее замены. При этом предварительное натяжение металлических гусениц с открытым металлическим шарниром обычно не превышает 8 кН [5]. Для машин легких весовых классов с упругим обводом предварительное статическое натяжение обычно доводят до 20 кН [5]. Для сельскохозяйственных тракторов с РАГ и упругой подвеской предварительное статическое натяжение составляет, как правило, 15–20 кН [6].

В [7, 8] проведены исследования по влиянию конструктивных параметров гусеничного движителя на тягово-сцепные свойства трактора и сопротивление его движению, однако вопросы выбора количества поддерживающих катков и схемы их расположения в этих работах не рассматриваются. Теоретические зависимости для выбора расстояния между поддерживающими катками в настоящее время в литературе не приведены. Как правило, рекомендуют использовать в движителе два поддерживающих катка [9]. На сельскохозяйственных тракторах с упругой подвеской чаще всего применяются два поддерживающих катка [9, 10], иногда – три [1]. Увеличение количества поддерживающих катков приводит к дополнительным затратам мощности на их вращение, потерям в ходовой системе и увеличению расхода топлива и стоимости трактора, уменьшение – к большим амплитудам колебаний участков свободных ветвей и возникновению резонансных режимов. При проектировании ходовой части машины важно обеспечить такие

характеристики гусеничного обвода как колебательной системы, при которых исключалось бы возникновение вынужденных колебаний ветвей со значительной амплитудой [11].

Для моделирования колебаний ветвей металлгусеничного обвода используют положения теории поперечных колебаний стержней, подверженных действию осевой силы [11, 12], теорию динамической устойчивости упругих систем [13], теорию колебаний ветвей передач с гибкой связью [14–16], анализ волновых процессов в ветвях гусеничных обводов [17, 18]. При этом в математической модели расчетная длина участка свободной ветви часто принимается равной длине двух смежных пролетов, возмущающее воздействие на ветвь в этом случае задается со стороны среднего поддерживающего катка [11], либо длине одного пролета [19]. Для анализа и решения полученных зависимостей и уравнений используют методы Фурье [11] и Крылова–Боголюбова [19], а также другие способы решения и численного моделирования.

Также проводились стендовые исследования динамики верхней ветви гусеничного обвода на физической модели гусеничного движителя [20] и экспериментальные исследования реальных гусеничных машин для определения условий возникновения поперечных колебаний верхней ветви [21]. В качестве факторов, вызывающих колебания ветви, рассматривают звенчатость гусеницы, наличие провисания ветвей, перемещение опор, колебание корпуса, при этом учитывают конструктивные особенности, инерционные, жесткостные и силовые параметры гусеничного обвода, скорость перематывания свободной ветви [11, 14, 16, 18–20, 22–24]. Установлено, что в эксплуатационном диапазоне возможно возникновение резонансных режимов, которые приводят к большим амплитудам колебаний ветви.

Приведенный анализ литературных источников показывает, что исследования проводились для металлгусеничных движителей с открытым и резинометаллическим шарнирами. Отсутствует информация по определению и изучению поперечных колебаний свободных ветвей обводов с РАГ для сельскохозяйственных тракторов, их (колебаний) влияния на конструктивные параметры резиногусеничного движителя трактора. В связи с применением на тракторах РАГ возникла необходимость исследования колебаний верхней ветви гусеничного обвода для снижения амплитуды колебаний и вывода резонансного режима за эксплуатационный диапазон работы трактора путем обоснованного выбора конструктивных параметров движителя, количества и расположения поддерживающих катков.

Цель исследования – разработка методологии определения количества и нахождение места расположения поддерживающих катков сельскохозяйственного гусеничного трактора с резиноармированной гусеницей, упругой и заблокированной подвесками на основании анализа колебаний верхней ветви гусеничного обвода и выбор указанных параметров для гусеничных тракторов семейства «Беларус».

Моделирование колебаний резиноармированной гусеницы в пролете между поддерживающими катками. Объектом исследования принят сельскохозяйственный трактор с РАГ и упругой подвеской, которая при работе с высокой тяговой нагрузкой может блокироваться. Поддерживающие катки на таких тракторах, как правило, жестко крепятся к остоу трактора. Поэтому со стороны поддерживающих катков на РАГ будут передаваться колебания остова трактора. Как известно, подвеска улучшает плавность хода, уменьшает динамические нагрузки и колебания остова трактора [5, 9]. Поэтому с целью упрощения математических выкладок рассмотрим наиболее неблагоприятный режим движения трактора с заблокированной подвеской. Для этого случая можно принять допущение, что остов трактора будет совершать колебания по закону изменения микропрофиля движения.

Формирующее возмущение микропрофиль опорной поверхности может быть различным. В общем случае характеристика микропрофиля задается статистическими функциями [25, 26]. Применительно к тракторам их реализация представлена в [27]. Использование в вычислениях микропрофиля, заданного числовыми значениями, с определенным шагом требует использования численных методов для решения задач и не позволяет установить точные аналитические зависимости. Однако для выявления основных закономерностей рассматриваемого процесса нет необходимости прибегать к сложным корреляционному, спектральному и вероятностному методам анализа и с достаточной для качественного анализа точностью считать профиль неровности гармоническим. Как показывает сопоставление такого подхода с вероятностным, принципиальные выводы в обоих случаях для гусеничных машин получаются одинаковыми [11].

Анализ дорог, наезженных гусеничными машинами, позволяет утверждать, что форма единичных неровностей, которые наиболее часто встречаются на них, близка к гармонической. При движении по пути с чередующимися подряд одинаковыми неровностями машина на определенной скорости может попасть в резонансный режим движения. Если в данном режиме будет обеспечена требуемая плавность хода, то и во всех других режимах при движении по этим же неровностям она будет лучше. Таким образом, в качестве расчетного предпочтительно выбрать гармонический синусоидальный профиль пути, который обеспечивает получение при заданной скорости резонансного режима колебаний [28, 29].

С целью упрощения математических выкладок примем следующие допущения:

поддерживающие катки имеют жесткий обод без обрешивания;

РАГ рассматривается как гибкая нить с равномерно распределенным весом по длине без учета изгибной жесткости и гистерезисных потерь при колебаниях (амплитуда колебаний значительно меньше длины пролета);

подвеска трактора полностью передает микропрофиль опорной поверхности на остов без его сглаживания (наиболее неблагоприятный режим движения);

остов трактора перемещается по закону изменения микропрофиля опорной поверхности;

профиль опорной поверхности гармонический синусоидальный.

Расчетная схема для определения амплитуды колебаний РАГ y (м) для любого сечения x (м) пролета между поддерживающими катками представлена на рис. 1.

Согласно расчетной схеме, между поддерживающими катками 1 и 2, длину пролета между которыми обозначим l (м), находится резиноармированная гусеница 3. Под действием растягивающего усилия F (Н) гусеница имеет постоянный контакт в точках A и B с поддерживающими катками. Ее удельный вес обозначим q (Н/м). При перемещении поддерживающих катков 1 и 2 вместе с остовом трактора при движении по микропрофилю опорной поверхности в пролете AB возникают вынужденные поперечные колебания РАГ. Эти колебания подвержены на конце $x = 0$ в точке A действию возмущающей силы, вызывающей смещение этого конца, равно $A_1 \sin \omega t$, и на конце $x = l$ в точке B – действию возмущающей силы, вызывающей смещение этого конца, равно $A_2 \sin \omega t$ (см. рис. 1). Здесь A_1, A_2 – амплитуды колебаний 1-го и 2-го поддерживающих катков, м; ω – частота вынужденных колебаний, рад/с; t – время, с. Обозначим точку C – середину пролета.

В такой постановке данная задача относится к разделу вынужденных колебаний струн и стержней математической физики, в частности вынужденных колебаний струны с подвижными опорами, и приводится к решению известного уравнения вида [30]:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = a_F^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + g(x, t) \quad (1)$$

при граничных условиях:

$$y|_{x=0} = \chi_1(t), \quad y|_{x=l} = \chi_2(t), \quad (2)$$

и начальных условиях:

$$y|_{t=0} = f(x), \quad \frac{\partial y}{\partial t} \Big|_{t=0} = F(x), \quad (3)$$

где $a_F = \sqrt{\frac{F}{\rho}} = \sqrt{\frac{gF}{q}}$; ρ – линейная плотность РАГ, Н·с²/м²; g – ускорение свободного падения, м/с²;

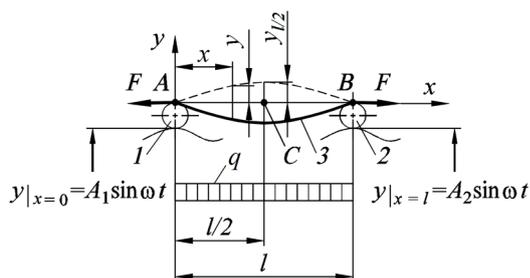


Рис. 1. Расчетная схема для определения колебаний резиноармированной гусеницы трактора, находящейся между поддерживающими катками: 1, 2 – поддерживающие катки; 3 – резиноармированная гусеница

Fig. 1. Calculation scheme for determining the oscillations of a rubber tractor track located between the supporting rollers: 1, 2 – supporting rollers; 3 – rubber track

$g(x, t) = \frac{1}{\rho} p(x, t)$; $p(x, t)$ – внешняя сила, рассчитанная на единицу длины, Н/м.

К решению этой задачи нельзя применить метод Фурье, так как граничные условия (2) неоднородны. Но эта задача легко сводится к задаче с нулевыми граничными условиями. Метод решения такой задачи достаточно подробно изложен и известно решение для случая, когда первое из граничных условий (2) $y|_{x=0} = 0$ [30]. Данное решение является частным случаем. Полное решение задачи в условиях (1)–(3) в литературе не приведено.

В связи с этим решим уравнение (1) при условиях (2) и (3). При этом будем предполагать, что в начальный момент времени ($t = 0$) начальные смещения и начальные скорости на обоих концах равны нулю. Тогда эта задача сводится к решению однородного уравнения

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = a_F^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (4)$$

при граничных условиях:

$$y|_{x=0} = A_1 \sin \omega t, \quad y|_{x=l} = A_2 \sin \omega t, \quad (5)$$

и начальных условиях:

$$y|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial y}{\partial t}|_{t=0} = 0. \quad (6)$$

Решение задачи найдем в виде суммы [30]:

$$y = \xi + \eta, \quad (7)$$

где η – решение однородного уравнения (4), удовлетворяющее только граничным условиям (5); ξ – решение того же уравнения, удовлетворяющее граничным условиям:

$$\xi|_{x=0} = 0, \quad \xi|_{x=l} = 0, \quad (8)$$

и начальным условиям:

$$\xi|_{t=0} = f(x) = -\eta|_{t=0}, \quad \frac{\partial \xi}{\partial t}|_{t=0} = F(x) = -\frac{\partial \eta}{\partial t}|_{t=0}. \quad (9)$$

Решение η из выражения (7) найдем следующим образом [30]:

$$\eta = X(x) \sin \omega t, \quad (10)$$

где $X(x)$ – функция от x , описывающая форму собственных колебаний (нормальная функция), м [12].

Подставив (10) в уравнение (4), получим [30]

$$X''(x) + \frac{\omega^2}{a_F^2} X(x) = 0. \quad (11)$$

Чтобы получить решение $\eta = (x, t)$ вида (10), удовлетворяющее граничным условиям (5), необходимо найти решение уравнения (11), удовлетворяющее граничным условиям:

$$X(0) = A_1, \quad X(l) = A_2. \quad (12)$$

Общее решение уравнения (11) имеет вид

$$X(x) = C_1 \cos \frac{\omega x}{a_F} + C_2 \sin \frac{\omega x}{a_F}. \quad (13)$$

Решая уравнение (13) при граничных условиях (12), получим

$$C_1 = A_1, \quad C_2 = \frac{A_2 - A_1 \cos \frac{\omega l}{a_F}}{\sin \frac{\omega l}{a_F}}. \quad (14)$$

Следовательно, выражение (13) с учетом (14) после преобразований примет вид

$$X(x) = A_1 \left(\cos \frac{\omega x}{a_F} - \operatorname{ctg} \frac{\omega l}{a_F} \sin \frac{\omega x}{a_F} \right) + A_2 \frac{\sin \frac{\omega x}{a_F}}{\sin \frac{\omega l}{a_F}}. \quad (15)$$

После подстановки (15) в (10) и преобразований получим следующее выражение:

$$\eta(x, t) = \left(A_1 \left(\cos \frac{\omega x}{a_F} - \operatorname{ctg} \frac{\omega l}{a_F} \sin \frac{\omega x}{a_F} \right) + A_2 \frac{\sin \frac{\omega x}{a_F}}{\sin \frac{\omega l}{a_F}} \right) \sin \omega t. \quad (16)$$

Теперь найдем решение $\xi = (x, t)$. Из формул (9) с учетом (16) определим начальные условия:

$$\xi|_{t=0} = f(x) = -\eta|_{t=0} = 0, \quad (17)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} \Big|_{t=0} = F(x) = -\frac{\partial \eta}{\partial t} \Big|_{t=0} = -A_1 \omega \left(\cos \frac{\omega x}{a_F} - \operatorname{ctg} \frac{\omega l}{a_F} \sin \frac{\omega x}{a_F} \right) - A_2 \omega \frac{\sin \frac{\omega x}{a_F}}{\sin \frac{\omega l}{a_F}}. \quad (18)$$

При этом решение однородного уравнения (4), удовлетворяющее граничным условиям (8) и начальным условиям (14), дается рядом и приводится в [30]:

$$\xi(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin \frac{k\pi a_F t}{l} \sin \frac{k\pi x}{l}, \quad (19)$$

где k – порядок гармоники;

$$b_k = \frac{2}{k\pi a_F} \int_0^l \left(-A_1 \omega \left(\cos \frac{\omega x}{a_F} - \operatorname{ctg} \frac{\omega l}{a_F} \sin \frac{\omega x}{a_F} \right) - A_2 \omega \frac{\sin \frac{\omega x}{a_F}}{\sin \frac{\omega l}{a_F}} \right) \sin \frac{k\pi x}{l} dx = \frac{2\omega a_F \left((-1)^{k-1} A_2 + A_1 \right)}{l \left(\omega^2 - \left(\frac{k\pi a_F}{l} \right)^2 \right)}.$$

После преобразований выражение (19) примет вид

$$\xi(x, t) = \frac{2\omega a_F}{l} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1} A_2 + A_1}{\omega^2 - \left(\frac{k\pi a_F}{l} \right)^2} \sin \frac{k\pi a_F t}{l} \sin \frac{k\pi x}{l}. \quad (20)$$

Взяв сумму выражений (16) и (20), в соответствии с (7) получим решение поставленной задачи

$$y(x, t) = \left(A_1 \left(\cos \frac{\omega x}{a_F} - \operatorname{ctg} \frac{\omega l}{a_F} \sin \frac{\omega x}{a_F} \right) + A_2 \frac{\sin \frac{\omega x}{a_F}}{\sin \frac{\omega l}{a_F}} \right) \sin \omega t + \frac{2\omega a_F}{l} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1} A_2 + A_1}{\omega^2 - \left(\frac{k\pi a_F}{l} \right)^2} \sin \frac{k\pi a_F t}{l} \sin \frac{k\pi x}{l}. \quad (21)$$

Используя выражение (21), можно определить амплитуду колебаний РАГ в любой точке пролета между поддерживающими катками и выявить резонансные режимы колебаний.

Для установления количественных оценок амплитуд колебаний РАГ в качестве объектов исследований примем гусеничные сельскохозяйственные тракторы марки «Беларус» [1, 6].

Чтобы определить порядок высшей гармоники k_{\max} для сельскохозяйственных тракторов с РАГ, воспользуемся методикой, приведенной в [11]. Для ветви с равномерно распределенными параметрами порядок гармоник может быть очень высоким. Практически же определяющей является первая гармоника (первая главная форма). Амплитуды последующих форм быстро уменьшаются. Кроме того, в реальных ветвях, обладающих звенчатостью, порядок наивысшей гармо-

ники зависит от шага цепи. Если принять минимальное количество траков, из которых может состоять волна, равным четырем, то можно записать условие для определения порядка высшей гармоники k_{\max} :

$$k_{\max} \leq \frac{l}{2l_0}, \quad (22)$$

где l_0 – шаг резиноармированной гусеницы, м.

Результаты расчета значений высшей гармоники k_{\max} с использованием выражения (22) для различных моделей трактора «Беларус» с РАГ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчета значений высшей гармоники k_{\max}
 Table 1. Results of calculating the values of the highest harmonic k_{\max}

Модель трактора	Длина пролета ветви, l , мм	Шаг резиноармированной гусеницы, l_0 , мм	Расчетное значение высшей гармоники, k_{\max}
«Беларус» 1802	1712	125	7
«Беларус» 2102		133	6
«Беларус» 2103		158	5

На основании результатов расчета, приведенных в табл. 1, в качестве порядка высшей гармоники для тракторов «Беларус» с РАГ для дальнейших исследований примем $k = 7$ при длине пролета $l = 1712$ мм.

Ранее было определено, что для описания микропрофиля опорной поверхности будем использовать гармоническую синусоидальную зависимость. Тогда, согласно [31], она примет вид

$$y = \frac{h}{2} \sin \omega t, \quad (23)$$

$$\omega = \frac{2\pi v}{l_n}, \quad (24)$$

где h – высота неровности, м; ω – частота вынужденных колебаний, рад/с; v – скорость движения трактора (при отсутствии буксования равна скорости перематывания верхней ветви обвода относительно остова трактора), м/с; l_n – длина неровности, м.

Основными рабочими поверхностями для сельскохозяйственных тракторов являются поля после уборки злаковых культур (агрофон «стерня») либо подготовленные под посев, а также грунтовые дороги. При выборе параметров микропрофиля будем руководствоваться наиболее неблагоприятным случаем.

Согласно [32], математическое ожидание m_h и среднеквадратическое отклонение σ_h высоты неровности стерни пшеницы для трех разных участков соответственно составили m_h/σ_h : вдоль основной обработки – 35/10,9 мм/мм, 29/12,5, 35/14,2 мм/мм; поперек основной обработки – 28,5/11,8 мм/мм, 85/21,4, 73/20,8 мм/мм. Поэтому для тракторов среднюю высоту неровностей \bar{h} для поля после уборки злаковых культур (агрофон «стерня») примем равной 70 мм.

По данным [33], замеры для грунтовых дорог показали, что высота неровности соответственно составляет: для малоизношенных – 20–30 мм; для среднеизношенных – 30–40 мм; для сильноизношенных – 40–70 мм. По результатам исследований, изложенных в [34], средняя высота неровностей \bar{h} для грунтовых дорог составляет: ровный участок – 30 мм; удовлетворительный участок – 30–40 мм; разбитый участок – 40–70 мм. Поэтому для тракторов среднюю высоту неровностей \bar{h} для грунтовых дорог примем также равной 70 мм.

Согласно замерам, проведенным для полей, подготовленных под посев, средние значения высот неровностей \bar{h} составили от 20 до 70 мм [29]. В связи с этим для полей, подготовленных под посев, среднее значение высоты неровности \bar{h} примем 70 мм.

Для гусеничных машин статистические данные по характеристикам микропрофилей дорог приведены в [31]. Согласно приведенным данным для гусеничных машин соответственно \bar{h}/σ_h для стерни, пахоты и проселочной дороги средней укатанности составляют 70/30 мм/мм, 70/30 и 70/28 мм/мм, средняя длина неровностей \bar{l}_n соответственно: 5–8 м, 5–8 и 9–13 м.

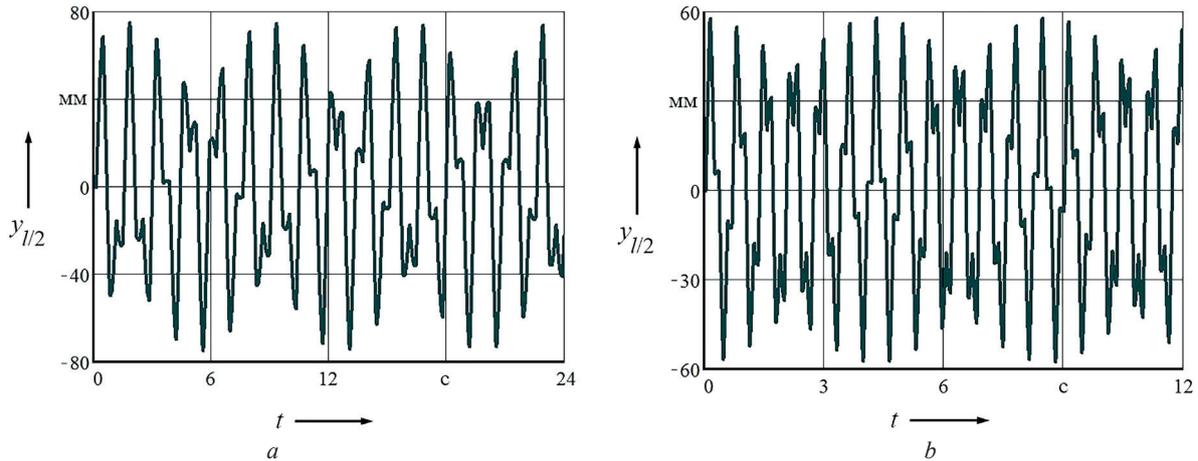


Рис. 2. График процесса колебаний резиноармированной гусеницы в середине пролета свободной ветви при работе трактора «Беларус» 2103: *a* – в тяговом режиме со скоростью движения 12 км/ч и минимальном натяжении в свободной ветви 2,12 кН; *b* – в транспортном режиме со скоростью движения 26 км/ч и натяжением в свободной ветви 20,4 кН

Fig. 2. Graph of the oscillation process of the rubber track in the middle of the span of the free branch when the “Belarus”2103 tractor is operating: *a* – in traction mode at a speed of 12 km/h and a minimum tension in the free branch of 2.12 kN; *b* – in transport mode with a speed of 26 km/h and a tension in the free branch of 20.4 kN

Из исследований плавности хода гусеничных машин известно, что с точки зрения колебаний наиболее неблагоприятным является движение по микропрофилю с более высокой амплитудой и меньшей длиной неровности [28]. Тогда, обобщая приведенные данные, примем для дальнейших расчетов высоту неровности $h = 70$ мм и длину неровности $l_n = 5$ м. Данные величины с достаточной степенью точности будут обобщать все микропрофили сельскохозяйственных поверхностей для наиболее неблагоприятных режимов движения.

В [11] установлено, что наибольшее изменение длина гусеничного обвода претерпевает при вертикальном перемещении корпуса машины (продольно – угловые колебания отсутствуют). В связи с этим в дальнейших расчетах примем, что $A_1 = A_2 = h/2 = 35$ мм. Амплитуды колебаний $y(x, t)$ определим для середины пролета при $x = l/2$ и обозначим $y_{l/2}$. Частоту вынужденных колебаний ω определим в соответствии с выражением (24). Результаты моделирования колебаний свободной ветви РАГ в середине пролета между поддерживающими катками для трактора «Беларус» 2103 с использованием зависимости (21) при различных скоростях движения и усилиях натяжения РАГ при работе в тяговом и транспортном диапазонах представлены на рис. 2.

Условия возникновения резонансных режимов колебаний гусеницы. Из анализа выражения (21) следует, что резонансный режим наступит в случае выполнения условия [35]

$$\omega - \frac{k\pi a_F}{l} = 0, \quad (25)$$

то есть при равенстве вынужденной и собственной частот колебаний в пролете между поддерживающими катками участка РАГ.

На гусеничных тракторах поддерживающие катки жестко соединены с остомом, и частота вынужденных колебаний (ω) определяется известной зависимостью (24) [11].

Вторая составляющая выражения (25) ($k\pi a_F/l$) представляет собой частоту собственных колебаний участка РАГ, находящейся в пролете между поддерживающими катками. В литературе для гусеничных тракторов приведена только собственная частота колебаний в подвеске, которая для трактора ДТ-75 над передним мостом составила 3,17 Гц, над задним – 2,63 Гц, для трактора Т-150 над передним мостом – 1,80 Гц, над задним – 2,82 Гц [36]. Однако частота собственных колебаний РАГ в пролете свободной ветви трактора отличается от указанных показателей. Обозначим ее ω_{bk} (рад/с). С учетом (24) и (1) ω_{bk} будет определяться выражением

$$\omega_{bk} = \frac{k\pi}{l} \sqrt{\frac{gF}{q}}. \quad (26)$$

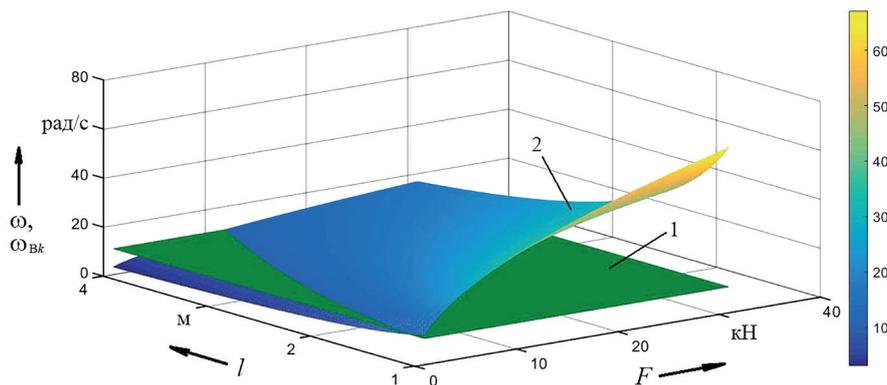


Рис. 3. Зависимость частот колебаний ω и $\omega_{вк}$ от длины пролета l и усилия в гусенице F :
 l – частота вынужденных колебаний ω ; 2 – частота собственных колебаний $\omega_{вк}$
Fig. 3. Dependence of oscillation frequencies ω and $\omega_{вк}$ on span length l and force in track F :
 l – frequency of forced oscillations ω ; 2 – frequency of natural oscillations $\omega_{вк}$

Используя зависимости (24) и (26) для сельскохозяйственного трактора класса 4 с РАГ были проведены теоретические исследования для первой формы колебаний [37]. С точки зрения частотного анализа эта форма колебаний является наиболее неблагоприятным случаем, так как частота свободных колебаний имеет наименьшее значение. Результаты теоретических исследований приведены на рис. 3.

При анализе полученных данных установлено, что в эксплуатационном диапазоне работы при различных натяжениях РАГ и расстояниях между поддерживающими катками (агрофон «стерня»; $l_n = 5$ м, $v = 30$ км/ч; $k = 1$; $q = 626,5$ Н/м; $l = 1–4$ м; $F = 1–31$ кН) возможно возникновение резонансных режимов колебаний РАГ в пролете свободной ветви движителя сельскохозяйственного трактора.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что в качестве определяющего критерия по выбору параметров пролетов свободной ветви трактора с РАГ необходимо принимать вывод резонансных режимов поперечных колебаний гусеницы за эксплуатационный диапазон работы машины. В данном случае снижение амплитуды колебаний свободной ветви носит вторичное значение, так как резонансный режим колебаний является более опасным в ходовых системах тракторов.

Выбор расстояния между поддерживающими катками. Сельскохозяйственные тракторы «Беларус» 2103 могут комплектоваться РАГ с цевочным зацеплением шириной $b = 500$ мм. Удельный вес q этих гусениц составляет 818,7 Н/м [6]. На военных гусеничных машинах (ВГМ) при b от 250 до 600 мм применяются гусеницы с резинометаллическими шарнирами с соответствующими конструктивными параметрами q/b [(Н/м)/мм]: Т-80 – 1332,6/580; Т-72 – 1284,6/580; Т-64 А – 1108,1/540; МТС – 972,8/484; БМП-1 – 558,9/300; БМД – 242,2/250 [38]. Предварительное статическое натяжение РАГ тракторов «Беларус» 2103 по критерию устойчивости на ведущем колесе с упругой подвеской составляет 20,4 кН [6]. На ВГМ предварительное статическое натяжение в упругом обводе доводят до следующих значений: у машин легких весовых классов – 20 кН, у машин средних и тяжелых весовых классов – 30 кН [5].

В расчетных моделях все типы упругих гусениц тракторов и ВГМ с достаточным приближением заменяются лентой с равномерно распределенными по ее длине весом и жесткостью, что позволяет использовать для анализа методы теории упругости [6, 11, 39]. Пролет свободной ветви трактора с РАГ по конструктивным параметрам, формирующим ее собственную частоту поперечных колебаний согласно (26), по перечисленным параметрам находится в диапазоне конструктивных параметров движителей ВГМ, формирующих пролет свободной ветви гусеницы с резинометаллическими шарнирами. Поэтому для частотного анализа поперечных колебаний РАГ можно использовать общие теоретические положения и результаты экспериментальных исследований по определению частот собственных колебаний ветви.

Вынужденную частоту колебаний пролета свободной ветви формируют колебания остова трактора. При ее совпадении с собственной частотой колебаний свободной ветви обвода, находя-

шейся в пролете между поддерживающими катками, могут возникать поперечные резонансные колебания со значительной амплитудой. Для упругих обводов эффект от возмущения исчезает почти полностью, когда разница между значениями этих частот составляет 20 % [11]. На основании приведенных экспериментальных исследований гусеничного обвода условие устойчивости для свободной упругой ветви можно представить в виде

$$1,2\omega \leq \omega_{bk}. \quad (27)$$

Величину $1,2\omega$ обозначим $[\omega]$ и назовем допускаемой собственной частотой колебаний пролета свободной ветви обвода трактора по критерию возникновения поперечных резонансных колебаний. Тогда выражение (27) примет вид

$$[\omega] \leq \omega_{bk}. \quad (28)$$

Результаты частотного анализа участка свободной ветви для трактора «Беларус» 2103 приведены на рис. 4. Из анализа частот колебаний следует, что при правильно выбранном предварительном натяжении РАГ резонансный режим колебаний свободной ветви не наступает.

Величина $[\omega]$ формируется условиями эксплуатации трактора, ω_{bk} – конструктивными параметрами пролета свободной ветви и РАГ (26), то есть F , q и l . Усилие в свободной ветви во время движения в зависимости от режимов работы трактора меняется от своего минимального значения $0,5ql_{св}$ ($l_{св}$ – длина свободной ветви обвода трактора, м [6, 39]) до предварительного статического натяжения F_c , Н [6, 39], которое выбирается минимальным по условию устойчивости гусеницы на ведущем колесе [6]. Удельный вес резиноармированной гусеницы q имеет свое минимальное значение по условиям прочности, и дальнейшее его снижение нецелесообразно. Таким образом, наиболее эффективным и целесообразным способом влияния на собственную частоту колебаний в пролете свободной ветви является обоснованный выбор расстояния между поддерживающими катками, которое определяется, как правило, количеством поддерживающих катков. Поэтому в качестве критерия при выборе количества поддерживающих катков сельскохозяйственного трактора с РАГ необходимо принимать вывод резонансного режима колебаний участков свободной ветви за эксплуатационный диапазон и решать поставленную задачу путем подбора количества поддерживающих катков.

Для решения поставленной задачи определим расстояние между поддерживающими катками $l_{пк}$. При высоких натяжениях гусениц стрелы их провисания малы и с достаточной степенью точности можно принять, что $l_{пк} = l$. Для свободной ветви, находящейся под усилием F , будем понимать натяжение свободной ветви гусеницы в движении $F_{свв}$, определяемое согласно [39].

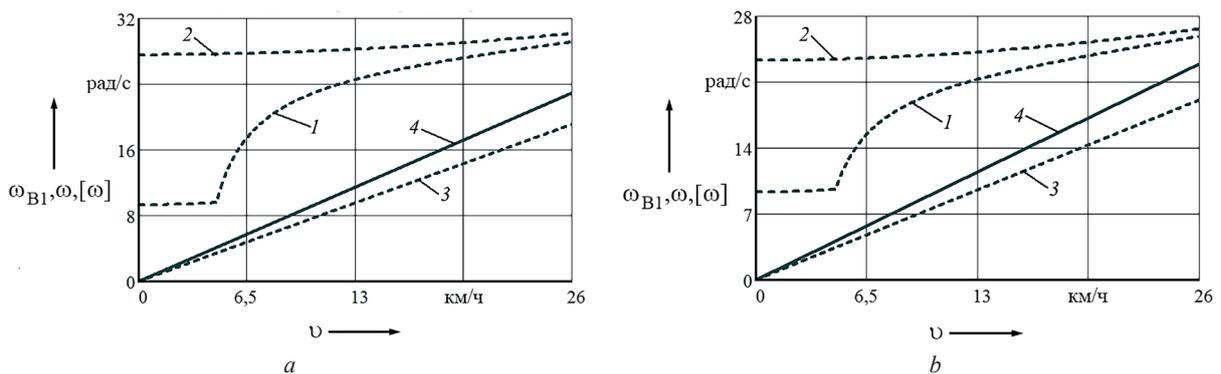


Рис. 4. Зависимость частот колебаний трактора «Беларус» 2103 при включенной (а) и при заблокированной (б) подвесках: 1 – собственная частота колебаний резиноармированной гусеницы 1-й формы ω_{b1} в тяговом режиме движения с реализацией номинальной мощности двигателя; 2 – собственная частота колебаний резиноармированной гусеницы 1-й формы ω_{b1} в режиме движения без крюковой нагрузки; 3 – вынужденная частота колебаний остова трактора ω ; 4 – допустимое значение частоты колебаний по критерию резонанса $[\omega]$

Fig. 4. Dependence of the oscillation frequencies of the tractor “Belarus” 2103 with enabled (a) and locked (b) suspension: 1 – natural frequency of oscillations of the rubber track of the 1st form ω_{b1} in the traction mode of motion with the implementation of the rated engine power; 2 – natural frequency of oscillations of the rubber track of the 1st form ω_{b1} in the mode of movement without hook load; 3 – forced oscillation frequency of the tractor frame ω ; 4 – permissible value of the oscillation frequency according to the resonance criterion $[\omega]$

Тогда, подставляя в выражение (27) ω и ω_{bk} согласно зависимостям (24) и (26) и решая полученное неравенство относительно $l_{пк}$, получим

$$l_{пк} \leq \frac{kl_H}{2,4v} \sqrt{\frac{gF_{сву}}{q}}. \quad (29)$$

Для выбора конструктивных параметров гусеничного движителя трактора воспользуемся требованиями, предъявляемыми к сельскохозяйственной технике по оценке безопасности. В качестве условий работы гусеничных сельскохозяйственных тракторов общего назначения тяговых классов 3–5 и более при измерении вибрации необходимо принимать тяговую операцию «пахота» и рельеф «поле после уборки злаковых культур». Параметры агрофона приведены в ГОСТ 12.2.002-2020 «Техника сельскохозяйственная. Методы оценки безопасности» в виде табличных данных. В результате аппроксимации гармонической синусоидальной функцией с использованием статистических методов [40] табличных данных для агрофона «поле после уборки злаковых культур» определяли длину неровности $l_H = 2,375$ м. Усилие в свободной ветви обвода трактора в движении $F_{сву}$ задавалось согласно [39], остальные параметры приведены в [6]. Результаты определения $l_{пк}$ для трактора «Беларус» 2103 при $k = 1$ с использованием зависимости (29) для случая равенства выражения при упругой и заблокированной подвесках приведены на рис. 5.

Использование выражения (29) при создании новых схем движителей представляет определенные сложности, так как расчеты требуют вычисления натяжения свободной ветви гусеницы в движении $F_{сву}$ согласно [39]. Анализ результатов расчетов, представленных на рис. 5, дает основание утверждать, что приоритетным при определении $l_{пк}$ является режим движения трактора на максимальной скорости v_{max} . Оценка растягивающих усилий в свободной ветви обвода в движении $F_{сву}$, приведенных в виде графических зависимостей в [39], показывает, что при максимальной скорости движения трактора усилие в свободной ветви обвода в движении $F_{сву}$ равно предварительному статическому натяжению F_c при любых тяговых нагрузках и режимах работы подвески, то есть $F_{сву} = F_c$ при $v = v_{max}$. С учетом этих допущений выражение (29) примет вид

$$l_{пк} \leq \frac{kl_H}{2,4v_{max}} \sqrt{\frac{gF_c}{q}}. \quad (30)$$

Результаты определения $l_{пк}$ с использованием зависимости (30) для гусеничных тракторов «Беларус» [6] с РАГ при различных режимах работы подвески представлены в табл. 2.

Исходя из данных, приведенных в табл. 2, можно рекомендовать при проектных расчетах для гусеничных тракторов «Беларус» с РАГ принимать расстояние между поддерживающими катками не более 1,743 м.

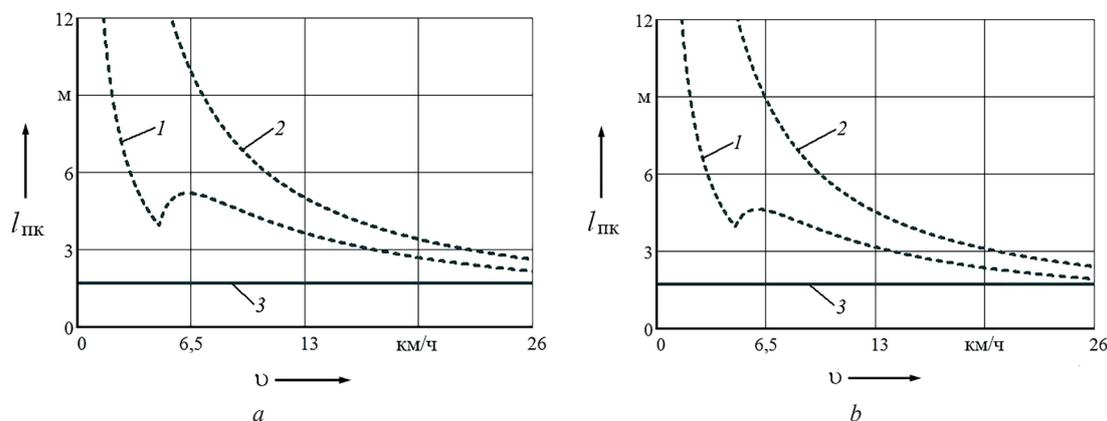


Рис. 5. Зависимость расстояния между поддерживающими катками от скорости движения трактора «Беларус» 2103 при включенной (а) и при заблокированной (б) подвесках: 1 – тяговый режим с реализацией номинальной мощности двигателя; 2 – режим движения без крюковой нагрузки; 3 – конструктивное решение $l_{пк} = 1,6995$ м

Fig. 5. Dependence of the distance between the support rollers on the speed of the tractor “Belarus” 2103 with enabled (a) and locked (b) suspension: 1 – traction mode with the realization of the rated engine power; 2 – driving mode without hook load; 3 – constructive solution $l_{пк} = 1,6995$ m

Т а б л и ц а 2. Результаты расчета максимальных значений расстояний между поддерживающими катками для тракторов «Беларус» при различных режимах работы подвески

Table 2. The results of calculating the maximum values of the distances between the support rollers for tractors “Belarus” in different modes of suspension

Режим работы подвески	Максимальные значения расстояний между поддерживающими катками движителей тракторов «Беларус» при различных режимах работы подвески, м		
	«Беларус» 1802	«Беларус» 2102	«Беларус» 2103
Включена	2,111	2,581	2,132
Заблокирована	1,743	2,315	1,798

Расположение поддерживающих катков. На сельскохозяйственных тракторах класса 3 обычно устанавливают движители с четырьмя опорными и двумя поддерживающими катками (ДТ-90 [9], Т-74 [9], ДТ-175С [10], Т-150 [9], ВТ-100 [41]). Расстояние между поддерживающими катками определяется, как правило, размером между осями опорных балансирных кареток. Для трактора ДТ-90 оно составляет 1096 мм, для Т-74 – 1070 мм, Т-150 – 1180 мм [9]. На тракторах «Беларус» класса 3 («Беларус» 1802) применяют пять опорных (три балансирные каретки) и три поддерживающих катка [1], класса 4 («Беларус» 2102 и «Беларус» 2103) – пять опорных (три балансирные каретки) и два поддерживающих катка. В первом случае («Беларус» 1802) расстояние между поддерживающими катками составляет 0,53 и 1,1 м, во втором («Беларус» 2102 и «Беларус» 2103) – 1,712 м.

Расчеты для трактора «Беларус» 2103 с использованием методики, приведенной в [42], показали, что на вращение двух (пары) поддерживающих катков при максимальной скорости движения трактора затрачивается 1 % номинальной мощности двигателя. Масса одного поддерживающего катка в сборе составляет 35 кг, кронштейна поддерживающего катка – 18 кг. В результате масса трактора без учета изменения геометрии обвода при уменьшении на пару поддерживающих катков снизится на 106 кг. Это приведет также к снижению сопротивления движению трактора, потерь в гусеничном движителе и удельного расхода топлива. Исходя из этого очевидно, что трактор целесообразно комплектовать минимальным количеством поддерживающих катков, что повысит его технико-экономические показатели.

Известны два подхода по выбору параметров и компоновке поддерживающих катков гусеничных машин и тракторов с упругой подвеской. В первом случае при компоновке гусеничного движителя ВГМ выбирают наружный диаметр поддерживающих катков в диапазоне 0,18–0,25 м и располагают их в пространствах между опорными катками в крайнем верхнем положении последних и гусеницей для исключения касания опорных и поддерживающих катков в процессе движения [43]. Во втором подходе для гусеничных тракторов при выборе диаметра поддерживающего катка рекомендуют использовать теоретическую зависимость, приведенную в [42], расстановка поддерживающих катков осуществляется, как правило, по осям балансирных кареток в горизонтальной плоскости [9]. Соответственно расстояние между смежными поддерживающими катками из конструктивных соображений определяется осями соседних опорных кареток.

Диаметр опорных катков гусеничных сельскохозяйственных тракторов с упругой подвеской (ДТ-175С, Т-150 [44], «Беларус» 2103) составляет 400 мм, поддерживающих – 225 мм у ДТ-175С и Т-150 [44], 250 мм – у «Беларус» 2103. Ходовые системы имеют аналогичную схему. При кинематическом анализе ходовой системы трактора «Беларус» 2103 установлено, что в случае полного хода опорного катка (балансир упирается в ограничитель хода) расстояние в вертикальной плоскости между крайними точками опорного и поддерживающего катков равно 140 мм. Поэтому с достаточной степенью точности можно принять допущение, что для гусеничных сельскохозяйственных тракторов при любом режиме работы подвески и условиях движения трактора при любом расположении поддерживающих катков в горизонтальной плоскости всегда будет обеспечиваться гарантированный зазор между опорным и поддерживающим катками. Поэтому, в отличие от ВГМ, вероятность касания поддерживающих и опорных катков у гусеничных тракторов отсутствует. На этом основании примем, что для гусеничных сельскохозяйственных тракторов с упругой подвеской при размещении поддерживающих катков в горизонтальной плоскости можно не учитывать расположения опорных катков.

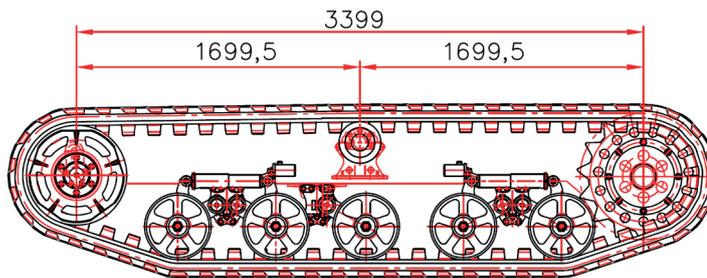


Рис. 6. Гусеничный движитель трактора «Беларус» с одним поддерживающим катком
Fig. 6. Track mover of the tractor “Belarus” with one support roller

Таким образом, при компоновке поддерживающих катков тракторов «Беларус» количество поддерживающих катков должно быть минимальным с учетом выполнения условия (30). Расстояние между ними не должно превышать 1,743 м. Исходя из этого для тракторов «Беларус» целесообразно применение одной пары поддерживающих катков в ходовой системе трактора с РАГ. Данное конструктивное решение представлено на рис. 6.

Заключение. Получена аналитическая зависимость для определения амплитуды колебаний РАГ в пролете свободной ветви обвода трактора между поддерживающими катками, учитывающая конструктивные параметры гусеницы, растягивающие усилия в обводе. Данная зависимость позволяет без использования численных (приближенных) методов вычислений находить амплитуду и резонансные режимы колебаний РАГ в пролете между поддерживающими катками свободной ветви при выполнении трактором технологических операций с различной тяговой нагрузкой на крюке и скоростью движения, учитывая при этом микропрофиль опорной поверхности.

Рассчитаны максимальные значения амплитуд колебаний РАГ в пролете свободной ветви обвода между поддерживающими катками для тракторов «Беларус» моделей 1802, 2102 и 2103 при различных режимах работы и длине пролета в 1,712 м: тяговый диапазон ($v = 12$ км/ч) – 75 мм, 76 и 75 мм соответственно; транспортный диапазон ($v = 26$ км/ч) – 58 мм, 52 и 58 мм соответственно.

Проведен частотный анализ колебаний и установлено, что на гусеничных сельскохозяйственных тракторах с РАГ возможен режим возникновения резонансных колебаний в пролете свободной ветви обвода между поддерживающими катками.

Получена аналитическая зависимость для определения предельного расстояния между поддерживающими катками обвода гусеничного трактора с РАГ, упругой и заблокированной подвесками по критерию вывода резонансного режима колебаний гусеницы в пролете свободной ветви за эксплуатационный диапазон работы трактора.

Рассчитаны значения предельных расстояний между поддерживающими катками для тракторов «Беларус» 1802, 2102 и 2103 при различных режимах работы подвески: режим «подвеска работает» – 2,111 м, 2,581 и 2,132 м соответственно; режим «подвеска заблокирована» – 1,743 м, 2,315 и 1,798 м соответственно.

Установлено, что на гусеничных тракторах «Беларус» с РАГ целесообразно применять в обводе движителя один поддерживающий каток. Предложена конструкция гусеничного движителя с резиноармированной гусеницей, в состав которой входит один поддерживающий каток. Расстояние между поддерживающим катком и ведущим, а также направляющим колесами составляет 1699,5 мм. Масса трактора за счет такого технического решения снижена на 106 кг. Это конструктивное решение позволит повысить технико-экономические показатели при производстве и эксплуатации тракторов с РАГ.

Список использованных источников

1. Коробкин, В. А. Гусеничный трактор общего назначения «Беларус 1802» / В. А. Коробкин // *Международ. аграр. журн.* – 2001. – № 9. – С. 46–48.
2. Performance of an agricultural tractor fitted with rubber tracks / G. Molari [et al.] // *Biosystems Engineering.* – 2012. – Vol. 111, N 1 – P. 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.10.008>
3. Rasool, S. Improving the tractive performance of walking tractors using rubber tracks / S. Rasool, H. Raheman // *Biosystems Engineering.* – 2018. – Vol. 167. – P. 51–62. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.12.013>
4. A Simple Rubber Crawler Model for Studying Fluctuation in Crawler Tension / T. Fukushima [et al.] // *Engineering in Agriculture, Environment and Food (EAEF).* – 2018. – Vol. 14, № 3. – P. 122–126. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2018.02.008>
5. Платонов, В. Ф. Гусеничные и колесные транспортно-тяговые машины / В. Ф. Платонов, Г. Р. Леиашвили. – М.: Машиностроение, 1986. – 296 с.

6. Жданович, Ч. И. Выбор предварительного натяжения резиноармированной гусеницы сельскохозяйственного трактора с упругой подвеской / Ч. И. Жданович, В. Н. Плищ // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2022. – Т. 60, № 2. – С. 243–256. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2022-60-2-243-256>
7. Васильев, А. В. Влияние конструктивных параметров гусеничного трактора на его тягово-сцепные свойства / А. В. Васильев, Е. Н. Докучаева, О. Л. Уткин-Любовцов. – М.: Машиностроение, 1969. – 192 с.
8. Ксеневиц, И. П. Ходовая система – почва – урожай / И. П. Ксеневиц, В. А. Скотников, М. И. Ляско; под общ. ред. И. П. Ксеневица. – М.: Агропромиздат, 1985. – 304 с.
9. Анилович, В. Я. Конструирование и расчет сельскохозяйственных тракторов: справ. пособие / В. Я. Анилович, Ю. Т. Водолажченко; под ред. проф. Б. П. Кашубы. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1976. – 456 с.
10. Трактор ДТ-175С / В. П. Шевчук [и др.]; под общ. ред. Я. Ф. Ракина. – М.: Агропромиздат, 1988. – 335 с.
11. Платонов, В. Ф. Динамика и надежность гусеничного движителя / В. Ф. Платонов. – М.: Машиностроение, 1973. – 232 с.
12. Тимошенко, С. П. Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко, Д. Х. Янг, У. Уивер. – М.: Машиностроение, 1985. – 472 с.
13. Ольшанский, В. П. О параметрических колебаниях участков гусеничного обвода / В. П. Ольшанский, Н. В. Кохановский // Теория механизмов и машин: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – Харьков: Вища школа, 1978. – Вып. 24. – С. 40–46.
14. Светлицкий, В. А. Передачи с гибкой связью: теория и расчет / В. А. Светлицкий. – М.: Машиностроение, 1967. – 155 с.
15. Епифанов, В. В. Влияние вида возмущения и скорости продольного движения гибкой связи на формы ее колебаний / В. В. Епифанов, Н. В. Кохановский // Теория механизмов и машин: Респ. междуведомств. науч.-техн. сб. – Харьков: Вища школа, 1987. – Вып. 42. – С. 95–97.
16. Держанский, В. Б. Подавление параметрических колебаний элементов ходовой части гусеничной машины / В. Б. Держанский, И. А. Тараторкин, А. И. Тараторкин // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. Аэрокосм. техника, технологии и машиностроение. – 2012. – № 3 (34). – С. 151–156.
17. Школа С. В. Рукавишника. Развитие теории систем местность–машина и опыт создания на ее основе гусеничных снегоболотоходных машин / В. А. Антоненко [и др.]. – Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева, 2017. – 298 с.
18. Держанский, В. Б. Влияние волновых процессов в движителе быстроходной гусеничной машины на устойчивость прямолинейного движения / В. Б. Держанский, И. А. Тараторкин // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объед. ин-т машиностр. НАН Беларусі. – Минск, 2012. – Вып. 1. – С. 81–85.
19. Аврамов, В. П. Исследование вибраций верхней ветви гусеничного обвода / В. П. Аврамов, В. В. Епифанов, Н. В. Кохановский // Теория механизмов и машин: Респ. междуведомств. науч.-техн. сб. – Харьков: Вища школа, 1988. – Вып. 44. – С. 93–97.
20. Факторы снижения виброактивности верхней ветви гусеничного обвода быстроходных транспортных машин / Н. В. Кохановский [и др.] // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр.: темат. вып. – Харьков, 2005. – Вып. 37: Транспортное машиностроение. – С. 105–112.
21. Кохановский, Н. В. Экспериментальное определение резонансных режимов параметрических колебаний участков гусеничного обвода с резинометаллическими шарнирами / Н. В. Кохановский // Вестн. Харьк. политехн. ин-та. – Харьков: Вища школа, 1981. – № 178, вып. 4: Конструирование и исследование тракторов. – С. 72–76.
22. Леонов, С. И. Поперечные колебания верхней ветви обвода гусеничного движителя с передним расположением звездочки / С. И. Леонов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1958. – № 9. – С. 10–20.
23. Кохановский, Н. В. Частотное уравнение поперечных колебаний движущейся гусеничной ветви с резинометаллическими шарнирами / Н. В. Кохановский, С. В. Павленко, А. Г. Янчик // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр.: темат. вып. – Харьков, 2005. – Вып. 53: Машиноведение и САПР. – С. 87–92.
24. Тараторкин, А. И. Исследование параметрических резонансных колебаний в ходовой части гусеничной машины / А. И. Тараторкин // Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. «Машиностроение». – 2022. – Т. 22, № 1. – С. 83–93.
25. Савочкин, В. А. Статистическая динамика транспортных и тяговых гусеничных машин / В. А. Савочкин, А. А. Дмитриев. – М.: Машиностроение, 1993. – 320 с.
26. Силаев, А. А. Спектральная теория поддрессоривания транспортных машин / А. А. Силаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1972. – 192 с.
27. Барский, И. Б. Динамика трактора / И. Б. Барский, В. Я. Анилович, Г. М. Кутьков. – М.: Машиностроение, 1973. – 280 с.
28. Дмитриев, А. А. Теория и расчет нелинейных систем поддрессоривания гусеничных машин / А. А. Дмитриев, В. А. Чобиток, А. В. Тельминов. – М.: Машиностроение, 1976. – 207 с.
29. Романюк, Н. Н. Снижение уплотняющего воздействия на почву мобильных энергосредств / Н. Н. Романюк. – Минск: БГАТУ, 2020. – 200 с.
30. Кошляков, Н. С. Уравнения в частных производных математической физики: учеб. пособие / Н. С. Кошляков, Э. Б. Глинер, М. М. Смирнов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1970. – 710 с.
31. Волков, Ю. П. Ходовая часть транспортных гусеничных машин: учеб. пособие: в 2 ч. / Ю. П. Волков, В. Е. Ролле, А. Д. Самойлов. – СПб.: С.-Петербург. гос. техн. ун-т, 1997. – Ч. 2: Система поддрессоривания. – 142 с.
32. Кравченко, В. И. Уплотнение почв машинами / В. И. Кравченко. – Алма-Ата: Наука, 1986. – 96 с.
33. Системы поддрессоривания современных тракторов: конструкция, теория и расчет / Д. А. Попов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1974. – 176 с.
34. Субботин, В. И. Выбор участков неровных дорог и искусственных препятствий для испытаний тракторов на плавность хода / В. И. Субботин // Вопросы исследования колебаний сельскохозяйственных тракторов: сб. науч. тр. / НАТИ. – М., 1966. – Вып. 183. – С. 107–138.

35. Журавков, М. А. Механика сплошных сред. Теория упругости и пластичности: учеб. пособие / М. А. Журавков, Э. И. Старовойтов. – Минск: БГУ, 2011. – 543 с.
36. Кутьков, Г. М. Тяговая динамика тракторов / Г. М. Кутьков. – М.: Машиностроение, 1980. – 215 с.
37. Плищ, В. Н. Исследование колебаний свободной ветви гусеничного движителя трактора / В. Н. Плищ // Автомобиле- и тракторостроение: материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 14–18 мая 2018 г.: в 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: Д. В. Капский (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2018. – Т. 1. – С. 180–183.
38. Теория и конструкция танка: в 10 т. / редкол.: П. П. Исаков (гл. ред.) [и др.]. – М.: Машиностроение, 1982–1990. – Т. 6: Вопросы проектирования ходовой части военных гусеничных машин / Б. А. Абрамов [и др.]. – 1985. – 244 с.
39. Жданович, Ч. И. Определение усилий в ветвях обвода трактора с резиноармированной гусеницей и упругой подвеской / Ч. И. Жданович, В. Н. Плищ // Агротранспорт. – 2021. – № 6. – С. 2–7.
40. Романюк, Ф. А. Теория и практика инженерного эксперимента / Ф. А. Романюк, Б. А. Каледин. – Минск: БНТУ, 2007. – 352 с.
41. ВТ-100 – новое семейство волгоградских тракторов / И. А. Долгов [и др.] // Тракторы и с.-х. машины. – 1999. – № 7. – С. 2–5.
42. Шарипов, В. М. Конструирование и расчет тракторов / В. М. Шарипов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2009. – 752 с.
43. Волков, Ю. П. Ходовая часть транспортных гусеничных машин: учеб. пособие: в 2 ч. / Ю. П. Волков, В. Е. Ролле, А. Д. Самойлов. – СПб.: С.-Петербург. гос. техн. ун-т, 1995. – Ч. 1: Гусеничный движитель. – 115 с.
44. Ходовые системы тракторов: устройство, эксплуатация, ремонт: справочник / В. М. Забродский [и др.]. – М.: Агропромиздат, 1986. – 271 с.

References

1. Korobkin V. A. General purpose crawler tractor “Belarus 1802”. *Mezhdunarodnyi agrarnyi zhurnal* [International Agricultural Journal], 2001, no. 9, pp. 46–48 (in Russian).
2. Molari G., Bellentani L., Guarnieri A., Walker M., Sedoni E. Performance of an agricultural tractor fitted with rubber tracks. *Biosystems Engineering*, 2012, vol. 111, no. 1, pp. 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.10.008>
3. Rasool S., Raheman H. Improving the tractive performance of walking tractors using rubber tracks. *Biosystems Engineering*, 2018, vol. 167, pp. 51–62. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.12.013>
4. Fukushima T., Inoue E., Mitsuoka M., Sato K., Oguri T. A Simple Rubber Crawler Model for Studying Fluctuation in Crawler Tension. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2018, vol. 14, no. 3, pp. 122–126. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2018.02.008>
5. Platonov V. F., Leishvili G. R. *Tracked and Wheeled Transport and Pulling Machines*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 296 p. (in Russian).
6. Zhdanovich Ch. I., Plishch V. N. Selecting pre-tensioning of rubber reinforced track on agricultural tractor with cushion suspension. *Vestsi Natsyyanal'nay akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2022, vol. 60, no. 2, pp. 243–256 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2022-60-2-243-256>
7. Vasil'ev A. V., Dokuchaeva E. N., Utkin-Lyubovtsov O. L. *Influence of Design Parameters of Crawler Tractor on Its Traction Properties*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 192 p. (in Russian).
8. Ksenevich I. P., Skotnikov V. A., Lyasko M. I. *Running System – Soil – Harvest*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 304 p. (in Russian).
9. Anilovich V. Ya., Vodolazhchenko Yu. T. Kashuba B. P. (ed.). *Design and Calculation of Agricultural Tractors*. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 456 p. (in Russian).
10. Shevchuk V. P., Rakin Ya. F., Kosenko V. V., Shapovalov I. P., Svinarev S. P., Goncharov N. N., Savran G. D., Bugora V. A. *Tractor DT-175C*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1988. 335 p. (in Russian).
11. Platonov V. F. *Crawler Dynamics and Reliability*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 232 p. (in Russian).
12. Timoshenko S. P., Young D. H., Weaver W. *Fluctuations in Engineering*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 472 p. (in Russian).
13. Ol'shanskii V. P., Kokhanovskii N. V. On parametric vibrations of track bypass sections. *Teoriya mekhanizmov i mashin: respublikanskii mezhdovedomstvennyi nauchno-tekhnicheskii sbornik* [Theory of Mechanisms and Machines: Republican Interdepartmental Scientific and Technical Collection]. Kharkov, Vishcha shkola Publ., 1978, iss. 24, pp. 40–46 (in Russian).
14. Svetlitskii V. A. *Transmissions with Flexible Connection: Theory and Calculation*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 155 p. (in Russian).
15. Epifanov V. V., Kokhanovskii N. V. Influence of the type of perturbation and the speed of the longitudinal movement of a flexible connection on the forms of its oscillations. *Teoriya mekhanizmov i mashin: respublikanskii mezhdovedomstvennyi nauchno-tekhnicheskii sbornik* [Theory of Mechanisms and Machines: Republican Interdepartmental Scientific and Technical Collection]. Kharkov, Vishcha shkola Publ., 1987, iss. 42, pp. 95–97 (in Russian).
16. Derzhanskii V. B., Taratorkin I. A., Taratorkin A. I. Suppression of parametric vibrations of tracked vehicle undercarriage elements. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie = Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2012, no. 3 (34), pp. 151–156 (in Russian).
17. Antonets V. A., Barakhtanov L. V., Belyakov V. V., [et al.]. *School of S. V. Rukavishnikov. Development of the Theory of Terrain-Machine Systems and the Experience of Creating Tracked Snow and Swamp Vehicles on Its Basis*. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, 2017. 298 p. (in Russian).

18. Derzhanskii V. B., Taratorkin I. A. Influence of wave processes in the propulsor of a high-speed tracked vehicle on the stability of rectilinear motion. *Aktual'nyye voprosy mashinovedeniya: sbornik nauchnykh trudov Ob"edinennogo instituta mashinostroeniya NAN Belarusi* [Topical Issues of Machine Science: Collection of Scientific Papers of the Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus]. Minsk, 2012, iss. 1, pp. 81–85 (in Russian).
19. Avramov V. P., Epifanov V. V., Kokhanovskii N. V. Investigation of vibrations of the upper branch of the track bypass. *Teoriya mekhanizmov i mashin: respublikanskii mezhdomstvennyi nauchno-tekhnicheskii sbornik* [Theory of Mechanisms and Machines: Republican Interdepartmental Scientific and Technical Collection]. Kharkov, Vishcha shkola Publ., 1988, iss. 44, pp. 93–97 (in Russian).
20. Kokhanovskii N. V., Pavlenko S. V., Stakhovskii O. V., Yanchik A. G. Factors for reducing the vibration activity of the upper branch of the track bypass of high-speed transport vehicles. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta "Khar'kovskii politekhnicheskii institut": sbornik nauchnykh trudov: tematischeskii vypusk. Vypusk 37: Transportnoe mashinostroenie* [Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute": Collection of Scientific Papers: Thematic Issue. Iss. 37: Transport Engineering]. Kharkiv, 2005, pp. 105–112 (in Russian).
21. Kokhanovskii N. V. Experimental determination of resonant modes of parametric oscillations of track bypass sections with rubber-metal hinges. *Vestnik Khar'kovskogo politekhnicheskogo instituta. Konstruirovaniye i issledovaniye traktorov* [Bulletin of Kharkiv Polytechnic Institute. Tractor Design and Research]. Kharkiv, Vishcha shkola, 1981, no. 178, iss. 4, pp. 72–76 (in Russian).
22. Leonov S. I. Transverse vibrations of the upper branch of the bypass of a track mover with a front sprocket. *Izvestiya vuzov. Mashinostroyeniye-Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 1958, no. 9, pp. 10–20 (in Russian).
23. Kokhanovskii N. V., Pavlenko S. V., Yanchik A. G. Frequency equation of transverse oscillations of a moving track branch with rubber-metal hinges. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta "Khar'kovskii politekhnicheskii institut": sbornik nauchnykh trudov: tematischeskii vypusk. Vypusk 53: Mashinovedeniye i SAPR* [Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute": Collection of Scientific Papers: Thematic Issue. Iss. 53: Mechanical engineering and CAD]. Kharkiv, 2005, pp. 87–92 (in Russian).
24. Taratorkin A. I. Investigation of parametric resonant oscillations in the undercarriage of a tracked vehicle. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Mashinostroyeniye" = Bulletin of the South Ural State University. Series "Mechanical Engineering Industry"*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 83–93 (in Russian).
25. Savochkin V. A., Dmitriev A. A. *Statistical Dynamics of Transport and Traction Tracked Vehicles*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 320 p. (in Russian).
26. Silaev A. A. *Spectral Theory of Suspension of Transport Vehicles*. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 192 p. (in Russian).
27. Barsky I. B., Anilovich V. Ya., Kutkov G. M. *Tractor Dynamics*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 280 p. (in Russian).
28. Dmitriev A. A., Chobitok V. A., Tel'minov A. V. *Theory and Calculation of Nonlinear Suspension Systems for Tracked Vehicles*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 207 p. (in Russian).
29. Romanyuk N. N. *Reducing the Compacting Effect on the Soil of Mobile Power Facilities*. Minsk, BGATU Publ., 2020. 200 p. (in Russian).
30. Koshlyakov N. S., Gliner E. B., Smirnov M. M. *Equations in Partial Derivatives of Mathematical Physics*. 2nd ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1970. 710 p. (in Russian).
31. Volkov Yu. P., Rolle V. E., Samoilov A. D. *Chassis of Transport Tracked Vehicles. Part 2: Suspension System*. St. Petersburg, St. Petersburg State Technical University Publ., 1997. 142 p. (in Russian).
32. Kravchenko V. I. *Soil Compaction by Machines*. Alma-Ata, Nauka Publ., 1986. 96 p. (in Russian).
33. Popov D. A., Popov E. G., Voloshin Yu. L., Kutin L. N., Subbotin V. I. *Suspension Systems of Modern Tractors: Design, Theory and Calculation*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 176 p. (in Russian).
34. Subbotin V. I. The choice of sections of rough roads and artificial obstacles for testing tractors for smooth running. *Voprosy issledovaniya kolebaniy sel'skokhozyaystvennykh traktorov: sbornik nauchnykh trudov* [Questions of Studying the Vibrations of Agricultural Tractors: Collection of Scientific Papers]. Moscow, 1966, iss. 183, pp. 107–138 (in Russian).
35. Zhuravkov M. A., Starovoitov E. I. *Continuous Media Mechanics. Theory of Elasticity and Plasticity*. Minsk, Belarusian State University Publ., 2011. 543 p. (in Russian).
36. Kutkov G. M. *Traction Dynamics of Tractors*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 215 p. (in Russian).
37. Plisch V. N. Investigation of oscillations of the free branch of the track tractor propulsion unit. Kapskiy D. V. (ed.), [et al.]. *Avtomobile- i traktorostroyeniye: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Minsk, 14–18 maya 2018 g. Tom 1* [Automotive and Tractor Engineering: Materials of the International Scientific and Practical Conference, Minsk, May 14–18, 2018, vol. 1]. Minsk, 2018, pp. 180–183 (in Russian).
38. Isakov P. P. (ed.), [et al.]. *Theory and Design of a Tank. Vol. 6: Issues of Designing the Undercarriage of Military Tracked Vehicles*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 244 p. (in Russian).
39. Zhdanovich Ch. I., Plishch V. N. Determination of the forces in the branches of the tractor with rubber reinforced track and elastic suspension. *Agropanorama*, 2021, no. 6, pp. 2–7 (in Russian).
40. Romanyuk F. A., Kaledin B. A. *Theory and Practice of Engineering Experiment*. Minsk, BNTU, 2007. 352 p. (in Russian).
41. Dolgov I. A., Bychkov V. P., Kosenko V. V., Mel'nik Yu. V. VT-100 – a new family of Volgograd tractors. *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny = Tractors and Agricultural Machinery*, 1999, no. 7, pp. 2–5 (in Russian).
42. Sharipov V. M. *Design and Calculation of Tractors*. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 752 p. (in Russian).
43. Volkov Yu. P., Rolle V. E., Samoilov A. D. *Chassis of Transport Tracked Vehicles. Part 1: Track Mover*. St. Petersburg, St. Petersburg State Technical University Publ., 1995. 115 p. (in Russian).
44. Zabrodskii V. M., Fainleib A. M., Kutin L. N., Utkin-Lyubovtsov O. L. *Running Systems of Tractors: Device, Operation, Repair*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1986. 271 p. (in Russian).

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

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

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-137-148>
УДК 536.2:637.5



Оригинальная статья

М. Н. Смагина*, Д. А. Смагин

*Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий,
пр. Шмидта, 3, 212027, Могилев, Республика Беларусь*

**ТЕПЛООБМЕН ВО ВЛАЖНЫХ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ТЕЛАХ
РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА ПРИ КОНВЕКТИВНОМ НАГРЕВАНИИ
В ПАРОВОЗДУШНЫХ СРЕДАХ**

Аннотация. Приведены результаты исследования процесса нагревания влажных капиллярно-пористых тел различного состава (мясных изделий) при термообработке в сухом воздухе и паровоздушной смеси в условиях вынужденной циркуляции греющей среды. Исследования проводились на влажном обезжиренном образце (мясо куриного филе) и маловлажном жирном образце (лопаточная часть свинины), сформованных в виде цилиндра и пластины. Показано, что процесс нагревания мясных изделий различного состава подчиняется закономерностям теории нестационарной теплопроводности однородных тел, несмотря на многообразие сопутствующих фазовых и физико-химических преобразований. Установлено, что регулярный режим нестационарной теплопроводности наступает при $Fo \geq 0,2$ для всех исследуемых вариантов. На основании обработки и анализа экспериментальных данных получены критериальные уравнения вида $\Theta = f(Fo, Bi)$ для центрального слоя исследуемых изделий в диапазоне температур 160–240 °С. Установлено, что особенности нагревания мясных изделий в среде паровоздушной смеси приводят к меньшим значениям коэффициентов μ_1 и $N(Bi)$ при регулярном режиме по сравнению с нагреванием в сухом воздухе. При этом для маловлажных жирных образцов характерны более низкие значения μ_1 и $N(Bi)$ по сравнению с влажными обезжиренными. В результате сравнения с табличными данными для твердых тел показано, что экспериментальные коэффициенты μ_1 и $N(Bi)$ характеризуются меньшими значениями для всех исследуемых вариантов. Установлено, что характер изменения $N(Bi)$ и μ_1 для твердых тел и изучаемых изделий противоположен, то есть при росте числа Bi для твердых тел характерно увеличение $N(Bi)$ и μ_1 , в то время как для исследуемых изделий характерно их уменьшение. Практическая значимость исследований состоит в повышении качественных характеристик мясных рубленых изделий и оптимизации оперативного производственного планирования за счет применения методики прогнозного расчета продолжительности тепловых операций.

Ключевые слова: теплообмен, сухой воздух, паровоздушная смесь, влажное тело, нестационарная теплопроводность, регулярный режим, безразмерная температура, число Био, число Фурье

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Смагина Марина Николаевна* – магистр технических наук, специалист по работе с магистрантами, Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий. E-mail: m.n.smagina@mail.ru; Смагин Денис Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий. E-mail: denis_smagin@mail.ru

Вклад авторов: Смагина Марина Николаевна – сбор данных литературы, планирование исследования, сбор и систематизация данных, проведение сравнительного анализа, формулировка выводов, написание и оформление текста рукописи; Смагин Денис Алексеевич – обоснование концепции, разработка дизайна экспериментального исследования, обобщение результатов исследования, редактирование текста рукописи.

Для цитирования: Смагина, М. Н. Теплообмен во влажных капиллярно-пористых телах различного состава при конвективном нагревании в паровоздушных средах / М. Н. Смагина, Д. А. Смагин // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 2. – С. 137–148. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-137-148>

Поступила в редакцию: 01.03.2023

Утверждена к печати 25.05.2023

© Смагина М. Н., Смагин Д. А., 2023

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Original article

Marina N. Smagina*, Denis A. Smagin

*Belarusian State University of Food and Chemical Technologies, 3, Schmidt Ave., 212027, Mogilev, Republic of Belarus***HEAT EXCHANGE IN WET CAPILLARY-POROUS BODIES OF VARIOUS COMPOSITIONS DURING CONVECTIVE HEATING IN VAPOR-AIR MEDIA**

Abstract. The results of the study of the heating process of wet capillary-porous bodies of various compositions (meat products) during heat treatment in dry air and steam-air mixture under conditions of forced circulation of the heating medium are presented. The studies were carried out on a moist fat-free sample (chicken fillet meat) and a low-moisture fat sample (pork shoulder blade) formed in the form of a cylinder and a plate. It is shown that the process of heating of meat products of various compositions obeys the laws of the theory of unsteady thermal conductivity of homogeneous bodies, despite the variety of accompanying phase and physico-chemical transformations. It is established that the regular mode of non-stationary thermal conductivity occurs at $Fo \geq 0.2$ for all the studied variants. Based on the processing and analysis of experimental data, criterion equations of the form $\Theta = f(Fo, Bi)$ for the central layer of the studied products in the temperature range 160–240 °C were obtained. It has been established that the peculiarities of heating of meat products in a vapor-air mixture environment lead to lower values of the coefficients μ_1 and $N(Bi)$ at regular operation compared with heating in dry air. It was found that low-moisture fatty samples are characterized by lower values of μ_1 and $N(Bi)$ in comparison with moist fat-free ones. As a result of comparison with tabular data for solids, it is shown that the experimental coefficients μ_1 and $N(Bi)$ are characterized by lower values for all the studied variants. It is established that the nature of the change in $N(Bi)$ and μ_1 for solids and the studied products is opposite, i.e., with an increase in the number of Bi , an increase in $N(Bi)$ and μ_1 is characteristic for solids, while their decrease is characteristic for the studied products. The practical significance of the research consists in improving the quality characteristics of minced meat products and optimizing operational production planning through the use of the methodology of predictive calculation of the duration of thermal operations.

Keywords: heat exchange, dry air, steam-air mixture, wet body, non-stationary thermal conductivity, regular mode, dimensionless temperature, the Bio criterion, the Fourier criterion

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

Information about authors: Marina N. Smagina* – Master of Sci. (Engineering), Specialist in Working with Undergraduates, Belarusian State University of Food and Chemical Technologies. E-mail: m.n.smagina@mail.ru; Denis A. Smagin – Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor, Belarusian State University of Food and Chemical Technologies. E-mail: denis_smagin@mail.ru

Contribution of the authors: Marina N. Smagina – literature data collection, research planning, data collection and systematization, comparative analysis, formulation of conclusions, writing and formatting of the text of the manuscript; Denis A. Smagin – substantiation of the concept, design development of experimental research, generalization of research results, editing of the text of the manuscript.

For citation: Smagina M. N., Smagin D. A. Heat exchange in wet capillary-porous bodies of various compositions during convective heating in vapor-air media. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 2, pp. 137–148 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-137-148>

Received: 01.03.2023

Approved for printing: 25.05.2023

Введение. Тепловая обработка пищевых продуктов представляет собой процесс, включающий в себя сложный комплекс тесно взаимосвязанных теплообменных, массообменных и физико-химических изменений.

Мясопродукты имеют биологическое происхождение, что обуславливает определенный характер распространения теплоты при их нагревании. Данные изделия классифицируются как влажные тела со сложным внутренним строением и разнородным химическим составом. Базовыми составными элементами (свыше 98 % от массы) являются вода, белок и жир, которые подвергаются основным изменениям при нагревании. Белки с ростом температуры коагулируют, жиры – расплавляются, для чего требуются определенные затраты теплоты на изменение конформационных структур. Существенным изменениям подвергаются и другие составные вещества: распадаются термолабильные соединения, дезактивируются ферменты, преобразуются углеводы, видоизменяются экстрактивные вещества, оказывается угнетающее воздействие на микрофлору и т.д. Указанные процессы протекают пусть и с незначительными, но дополняющими основной процесс затратами теплоты. В ходе роста температуры в мясном сырье происходят сложные фазовые превращения (интенсивное испарение влаги на поверхности с высушиванием и последующим образованием корки; массоперенос во внутренних слоях капиллярно-пористого материала с клеточными перегородками и жировыми прокладками и пр.). В результате опи-

санных превращений значительным преобразованиям подвергается и реологическая структура материала, изменяясь от вязко-пластичной для сырого фарша до упруго-эластично-пластичной для готового продукта; поверхностные слои превращаются в практически сухое вещество [1, 2].

Из решения уравнения теплопроводности можно найти основные физические закономерности, влияющие на формирование температурного поля. Однако точно определить температурное поле мясopодуктов путем аналитического решения уравнения теплопроводности сложно из-за вариации большого количества разнообразных факторов.

Теплофизические характеристики (ТФХ) исходного сырья значительно колеблются в зависимости от количественного содержания нутриентов. Увеличение влагосодержания приводит к росту коэффициентов тепло- и температуропроводности, а увеличение содержания жира – к их снижению. Влияние содержания белка на ТФХ досконально не изучено [3].

Тепловые эффекты фазовых и физико-химических преобразований обуславливают сложные закономерности в температурных изменениях ТФХ мясopодуктов. Теплоемкость мясного сырья при нагревании вначале снижается, затем повышается. Коэффициент теплопроводности при росте температуры увеличивается, но с различной интенсивностью и даже снижением на отдельных температурных участках. Плотность мясopодуктов с повышением температуры уменьшается. При этом характер данных изменений значительно варьируется для мясных фаршей разного состава. Температурные колебания ТФХ мясного сырья зависят от влажности и жирности исходного сырья. Коэффициент температуропроводности как переменная, зависящая от плотности, теплопроводности и теплоемкости, изменяется по сложным законам [1, 4–6].

Внедрение в производственную практику способов термообработки в паровоздушных средах различной влажности в условиях вынужденной циркуляции теплоносителя вносит разнообразие в протекание процесса. При нагревании в среде сухого воздуха на поверхности обрабатываемых изделий создаются постоянные во времени тепловые потоки. При использовании паровоздушной смеси (чистый перегретый водяной пар не применяется из-за необходимости герметизации рабочих камер) процесс теплообмена сложнее. На начальном этапе при температуре поверхности ниже температуры насыщения водяного пара происходит конденсация пара. По мере роста температуры отдельные участки продукта перегреваются, и локальные температуры различаются в зависимости от ориентации поверхности. Коэффициент теплоотдачи уменьшается, но остается выше, чем при свободной конвекции. При дальнейшем нагревании температура поверхности превышает температуру насыщения пара, конденсация прекращается. Теплоотдача осуществляется за счет конвективного теплообмена.

Процессы нагревания при температурах выше температуры насыщения водяного пара (технологические операции жарки и запекания) детально не изучены. Так, в [7–17] приведены методики математического описания процессов нагревания рубленых мясных изделий для процессов запекания. Однако в данных работах применялись тела ограниченных размеров; не изучались вопросы особенностей нагревания изделий различных форм и химического состава, применения различных теплоносителей. Математическая обработка полученных результатов проводилась без применения теории регулярного режима нестационарной теплопроводности, что усложняло получаемую методику. Также не осуществлялось и сравнение итоговых данных с существующими расчетными коэффициентами для твердых тел.

Поэтому актуальной задачей является получение математических зависимостей, описывающих процесс конвективного нагревания изделий из мясного измельченного сырья одномерных форм различного химического состава в среде сухого воздуха и паровоздушной смеси при прямом контакте продукта с греющей средой.

Постановка задачи. С точки зрения теплотехники нагревание мясopодуктов представляет собой процесс переноса теплоты за счет теплопроводности, когда температура системы изменяется не только от точки к точке, но и с течением времени. Таким образом, рассматриваемые процессы являются нестационарными, и для их описания может быть применена теория нестационарной теплопроводности.

Уравнение теплопроводности в безразмерной форме для одномерной задачи имеет вид

$$\frac{\partial \Theta}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2}, \quad (1)$$

где Θ – безразмерная температура тела; Fo – число Фурье; ξ – безразмерная координата.

Безразмерная температура характеризует процесс нагревания однородных тел:

$$\Theta = \frac{t_{\text{ж}} - t}{t_{\text{ж}} - t_0} \quad (2)$$

($t_{\text{ж}}$ – фиксированная температура, °С; t_0 – температура тела в начальный момент времени, °С; t – температура тела в момент времени $\tau > \tau_0$, °С), и определяется безразмерной координатой, числом Био и числом Фурье:

$$\Theta = f(\xi; Bi; Fo). \quad (3)$$

Граничные условия для исследуемого процесса при регулярном режиме могут быть заданы в виде условий третьего рода. Для одномерных тел на центральной оси одномерного цилиндра и по центру одномерной пластины изменение во времени безразмерной температуры в данном случае описывается уравнением

$$\Theta = N(Bi)e^{-\mu_1^2 Fo}, \quad (4)$$

где $N(Bi)$ и μ_1^2 – корни характеристического уравнения.

Методы и объекты исследований. По химическому составу образцы разделялись на две группы: влажный обезжиренный и маловлажный жирный. В качестве первого образца применялось измельченное мясо куриного филе без кожи (белок – 23,6 %, жир – 1,9 %, вода – 73,5 %); в качестве второго – мясо лопаточной части свинины (белок – 14,7 %, жир – 29,4 %, вода – 55,1 %) [2, 18].

Сырье подвергалось измельчению на мясорубке с диаметром отверстий выходной решетки 2,5 мм. От применения цельномышечных полуфабрикатов отказались в связи с эффектом анизотропии теплопроводности, которая проявляется в том, что по различным направлениям (вдоль или поперек мышечных волокон, через слой жировой или соединительной ткани) величина коэффициента теплопроводности неодинакова [1, 3]. В измельченном материале мышечная, жировая и соединительная ткани равномерно распределяются по объему, обеспечивая постоянство ТФХ на всех направлениях движения теплового потока. Подготовленные образцы выдерживались в холодильной камере до достижения постоянной температуры 8–10 °С.

Изделия выполнялись в форме цилиндра с размерами $d \times h = 60 \times 320$ мм и в форме пластины с размерами $a \times b \times h = 160 \times 160 \times 32$ мм. Проверочный расчет проводили для следующих условий: теплоноситель – воздух, температура греющей среды – 200 °С, принятый коэффициент теплоотдачи – 40 Вт/(м²·°С). Корни характеристического уравнения для цилиндрического изделия при переносе тепла от боковой поверхности к центру составляют $N(Bi) = 1,395$ и $\mu_1^2 = 2,996$, при переносе тепла от торцов к центру – $N(Bi) = 1,267$ и $\mu_1^2 = 2,122$ [19]. При подборе коэффициентов при теплопереносе от торцов к центру форму изделия рассматриваем как пластину. Подставляя принятые и полученные значения в уравнения (4) и (2), получаем продолжительность нагревания при поперечном прогреве цилиндра 30,43 мин, при продольном переносе тепла – 1059,53 мин. Аналогичным образом проводим расчеты для пластины: при поперечном прогреве $N(Bi) = 1,143$ и $\mu_1^2 = 0,897$, продолжительность нагревания равна 18,93 мин, при продольном прогреве – $N(Bi) = 1,254$ и $\mu_1^2 = 1,903$, продолжительность нагревания 290,81 мин.

Таким образом, при выбранном соотношении размеров нагревание со стороны торцов практически не оказывает влияния на нагревание центра. Применение одномерных тел позволяет провести корректный теплотехнический эксперимент; вариации предложенных форм распространены в производственной практике. На основе полученных результатов можно предлагать решения для кулинарных изделий, которые являются телами ограниченных размеров, то есть частными случаями сочетания одномерных тел.

При проведении эксперимента измельченное мясо помещалось в однослойный марлевый мешок в форме цилиндра или пластины. Мешок помещался в кассету, представляющую собой сварную каркасную конструкцию из металлических стержней сечением 2,5 и 4,0 мм.

Каркас занимает менее 3 % внешней площади и не оказывает заметного влияния на процесс нагревания заготовки. В получаемом изделии исследуемый материал напрямую контакти-

рует с греющей средой, так как ячейки марли очень крупные по отношению к нитям (марля по ТУ ВУ 390287860.004-2011 с размерами ячеек 2×1 мм, плотность ткани 35 г/м^2 , при набивании растягивалась).

Тепловая обработка осуществлялась в пароконвекционном аппарате Упох-203G (Италия). Согласно действующим технологическим картам и инструкциям для операций жарки и запекания мясopодуктов, диапазон температур греющей среды составляет $160\text{--}240 \text{ }^\circ\text{C}$. В качестве теплоносителя применялся сухой воздух и паровоздушная смесь влажностью $80\text{--}85 \%$. Тепловую обработку проводили до достижения температуры в центре изделия $85 \text{ }^\circ\text{C}$, определяющую кулинарную готовность [2].

Для измерения температуры применялся набор термоэлектрических преобразователей ТХА(К)-1199/52/2/1500/0,5 (Россия) с диаметром термоэлектродов $0,5$ мм в кремнеземной оплетке (по ГОСТ 8.338-2002). Для фиксации термопар использовалось специальное устройство, обеспечивающее точность установки и исключающее сбивание головок.

Результаты и их обсуждение. Обработка экспериментальных данных проводилась при условиях однозначности, описанных в [20]. Числа Био (Bi) и Фурье (Fo) рассчитывались по усредненным значениям коэффициентов тепло- и температуропроводности для сырого измельченного мяса, готового продукта и сухого вещества с учетом особенностей физико-химических преобразований нутриентов [21].

Графические зависимости $\Theta = f(\text{Fo})$ в полулогарифмических координатах для исследуемых образцов и режимных параметров представлены на рис. 1, 2.

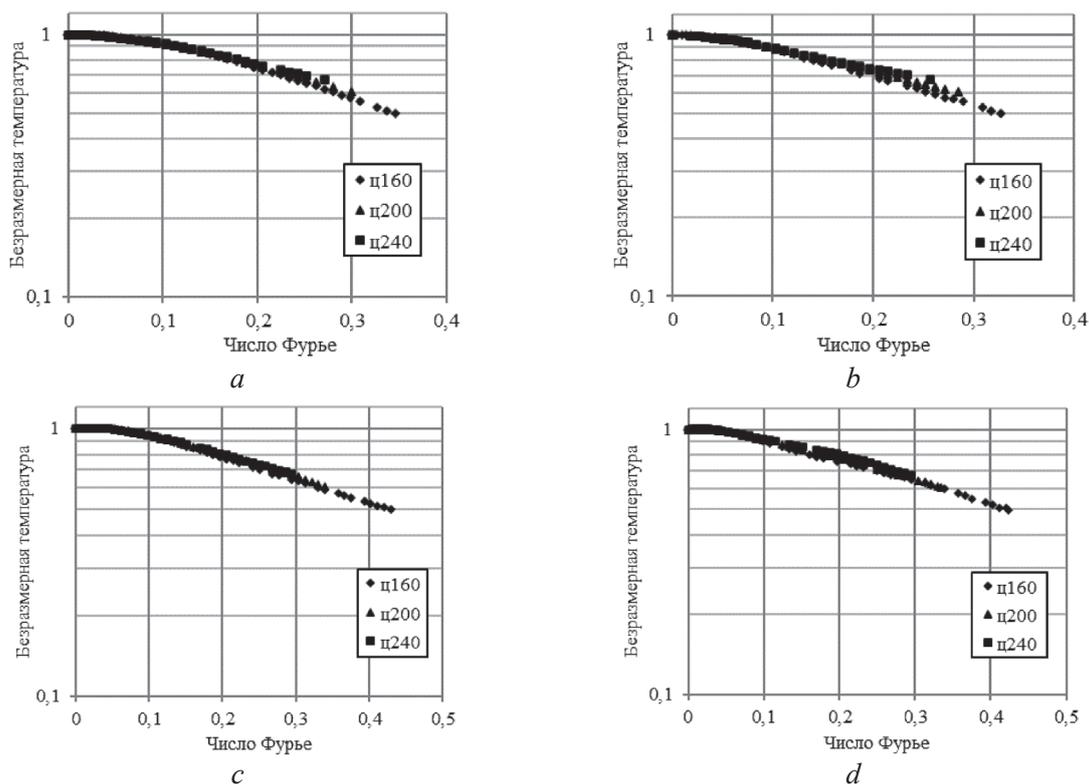


Рис. 1. Изменение безразмерной температуры в центре изделий в виде цилиндра от числа Фурье: *a* – влажный обезжиренный образец в среде сухого воздуха, *b* – влажный обезжиренный образец в паровоздушной среде, *c* – маловлажный жирный образец в среде сухого воздуха, *d* – маловлажный жирный образец в паровоздушной среде; ц160, ц200, ц240 – изменение температуры в центре образца при температуре греющей среды соответственно $160 \text{ }^\circ\text{C}$, 200 и $240 \text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 1. The change in the dimensionless temperature in the center of the products in the form of a cylinder from the Fourier number: *a* – a moist, fat-free sample in a dry air environment, *b* – a moist, fat-free sample in a vapor-air environment, *c* – a low-moisture fatty sample in a dry air environment, *d* – a low-moisture fatty sample in a vapor-air environment; ц160, ц200, ц240 – temperature change in the center of the sample at the temperature of the heating medium, respectively $160 \text{ }^\circ\text{C}$, 200 and $240 \text{ }^\circ\text{C}$

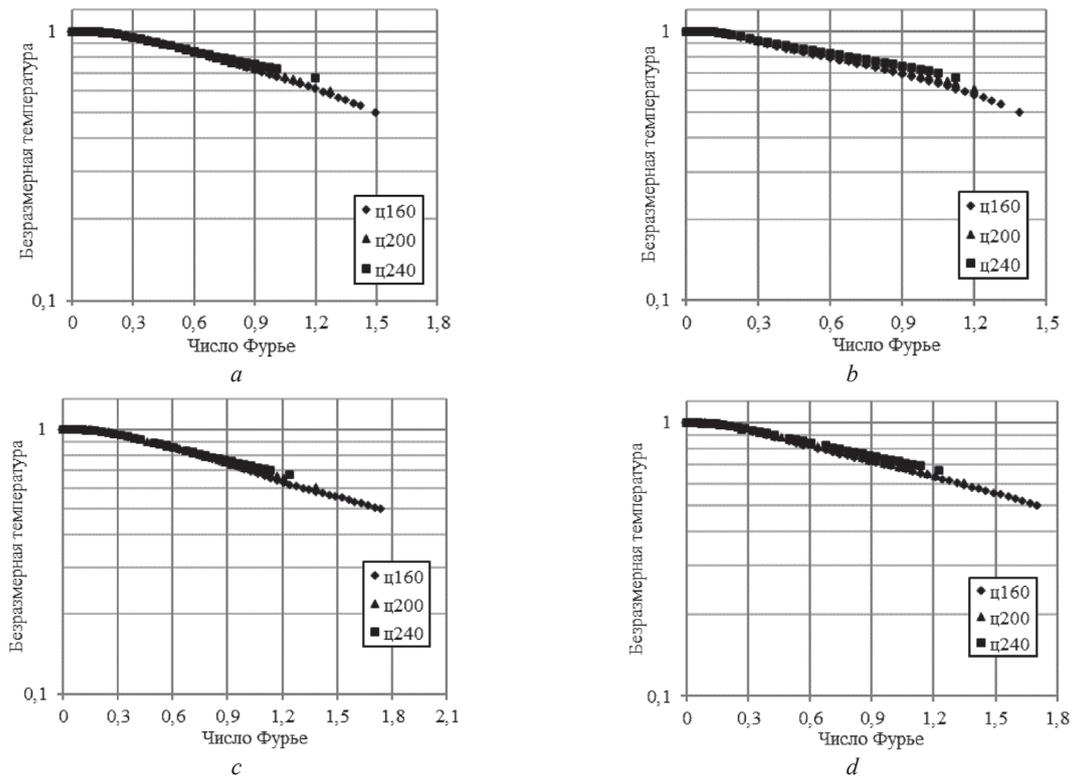


Рис. 2. Изменение безразмерной температуры в центре изделий в виде пластины от числа Фурье: *a* – влажный обезжиренный образец в среде сухого воздуха, *b* – влажный обезжиренный образец в паровоздушной среде, *c* – маловлажный жирный образец в среде сухого воздуха, *d* – маловлажный жирный образец в паровоздушной среде; ц160, ц200, ц240 – изменение температуры в центре образца при температуре греющей среды соответственно 160 °С, 200 и 240 °С

Fig. 2. The change in the dimensionless temperature in the center of the products in the form of a plate from the Fourier number: *a* – a moist, fat-free sample in a dry air environment, *b* – a moist, fat-free sample in a vapor-air environment, *c* – a low-moisture fatty sample in a dry air environment, *d* – a low-moisture fatty sample in a vapor-air environment; ц160, ц200, ц240 – temperature change in the center of the sample at the temperature of the heating medium, respectively 160 °С, 200 and 240 °С

Полученные кривые в целом соответствуют теории нестационарной теплопроводности. Четко выделяются участки неупорядоченного и регулярного режима.

Следует отметить, что в пищевых продуктах перенос теплоты усиливается диффузией влаги. Для однородного тела с большим содержанием связанной влаги характерна молекулярная диффузия, которая аналогична молекулярному переносу теплоты, то есть теплопроводности. Закон теплопроводности Фурье и закон молекулярной диффузии Фика имеют одинаковую математическую форму, что объясняет наложение протекания данных процессов без выраженного искажения общей динамики. Сопровождение теплопроводности молекулярной диффузией вносит лишь количественные отличия в характеристики процесса теплообмена. Качественно же процесс нагревания исследуемых материалов не отличается от процесса нагревания твердых тел.

Также можно сделать вывод, что физико-химические изменения нутриентов и структурно-механические преобразования материала принципиального влияния на общий характер протекания теплообмена не оказывают.

Приведенные графические зависимости свидетельствуют о наступлении регулярного режима при $Fo \geq 0,2$ для всех исследуемых вариантов. Рассмотрим участки температурных кривых при $Fo \geq 0,2$ (рис. 3, 4).

Полученные графические зависимости подвергали математической обработке, по результатам которой определяли критериальные уравнения вида $\Theta = N(Bi)e^{-\mu_1^2 Fo}$ в зависимости от Bi для центрального слоя (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Критериальные уравнения $\Theta = N(Bi)e^{-\mu_1^2 Fo}$
 Table 1. Criteria equations $\Theta = N(Bi)e^{-\mu_1^2 Fo}$

Вид материала	Температура греющей среды, °C	Греющая среда			
		сухой воздух		паровоздушная смесь	
		Bi	уравнение	Bi	уравнение
<i>Форма – цилиндр</i>					
Влажный обезжиренный фарш	160	2,41	$\Theta = 1,292e^{-2,727Fo}$	2,32	$\Theta = 1,1529e^{-2,538Fo}$
	200	2,47	$\Theta = 1,2024e^{-2,299Fo}$	2,39	$\Theta = 1,1338e^{-2,208Fo}$
	240	2,54	$\Theta = 1,1055e^{-1,834Fo}$	2,48	$\Theta = 1,0351e^{-1,666Fo}$
Маловлажный жирный фарш	160	2,28	$\Theta = 0,9085e^{-1,072Fo}$	2,19	$\Theta = 1,1315e^{-1,923Fo}$
	200	2,33	$\Theta = 0,9435e^{-0,987Fo}$	2,26	$\Theta = 1,1425e^{-1,906Fo}$
	240	2,4	$\Theta = 0,9209e^{-0,795Fo}$	2,34	$\Theta = 1,1772e^{-1,894Fo}$
<i>Форма – пластина</i>					
Влажный обезжиренный фарш	160	1,52	$\Theta = 1,1387e^{-0,526Fo}$	1,46	$\Theta = 1,0819e^{-0,518Fo}$
	200	1,55	$\Theta = 1,0989e^{-0,462Fo}$	1,49	$\Theta = 1,0553e^{-0,444Fo}$
	240	1,58	$\Theta = 1,0617e^{-0,385Fo}$	1,54	$\Theta = 1,0292e^{-0,368Fo}$
Маловлажный жирный фарш	160	1,44	$\Theta = 1,1167e^{-0,465Fo}$	1,24	$\Theta = 1,0693e^{-0,44Fo}$
	200	1,46	$\Theta = 1,0949e^{-0,424Fo}$	1,28	$\Theta = 1,07e^{-0,424Fo}$
	240	1,49	$\Theta = 1,0718e^{-0,379Fo}$	1,32	$\Theta = 1,0552e^{-0,371Fo}$

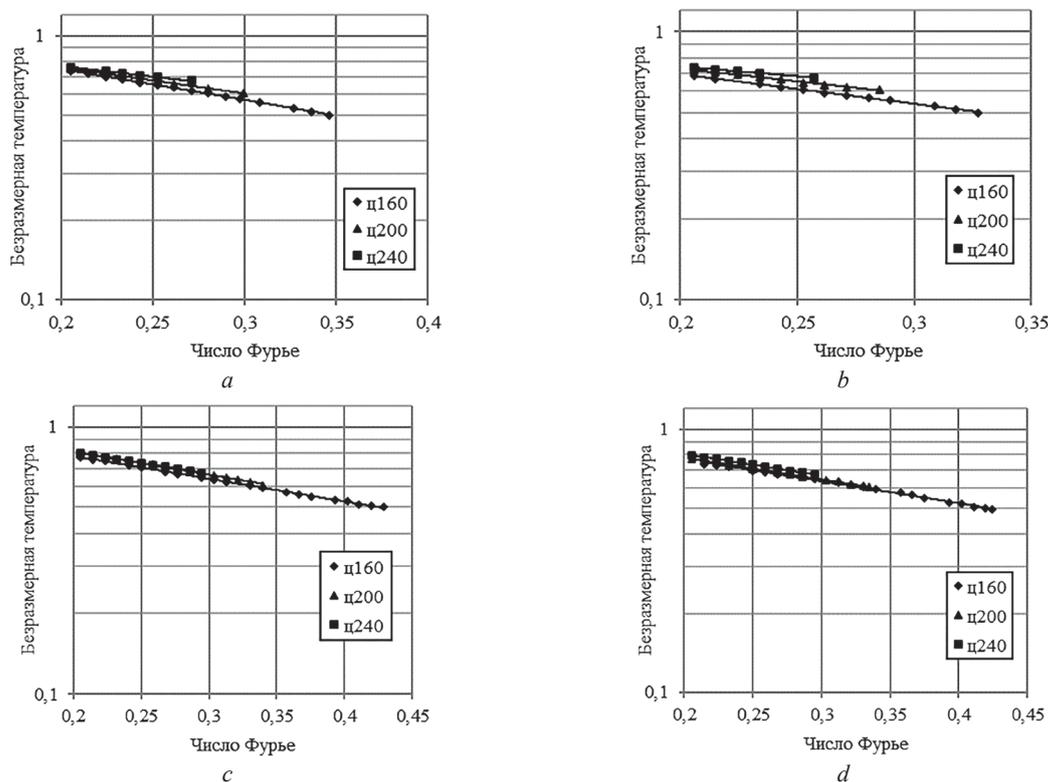


Рис. 3. Изменение безразмерной температуры в центре изделий в виде цилиндра от числа Фурье на стадии регулярного режима $Fo \geq 0,2$: *a* – влажный обезжиренный образец в среде сухого воздуха, *b* – влажный обезжиренный образец в паровоздушной среде, *c* – маловлажный жирный образец в среде сухого воздуха, *d* – маловлажный жирный образец в паровоздушной среде; ц160, ц200, ц240 – изменение температуры в центре образца при температуре греющей среды соответственно 160 °C, 200 и 240 °C

Fig. 3. The change in the dimensionless temperature in the center of the products in the form of a cylinder from the Fourier number at the stage of the regular regime $Fo \geq 0.2$: *a* – a moist fat-free sample in a dry air environment, *b* – a moist fat-free sample in a vapor-air environment, *c* – a low-moisture fatty sample in a dry air environment, *d* – a low-moisture fatty sample in a vapor-air environment; ц160, ц200, ц240 – temperature change in the center of the sample at the temperature of the heating medium, respectively 160 °C, 200 and 240 °C

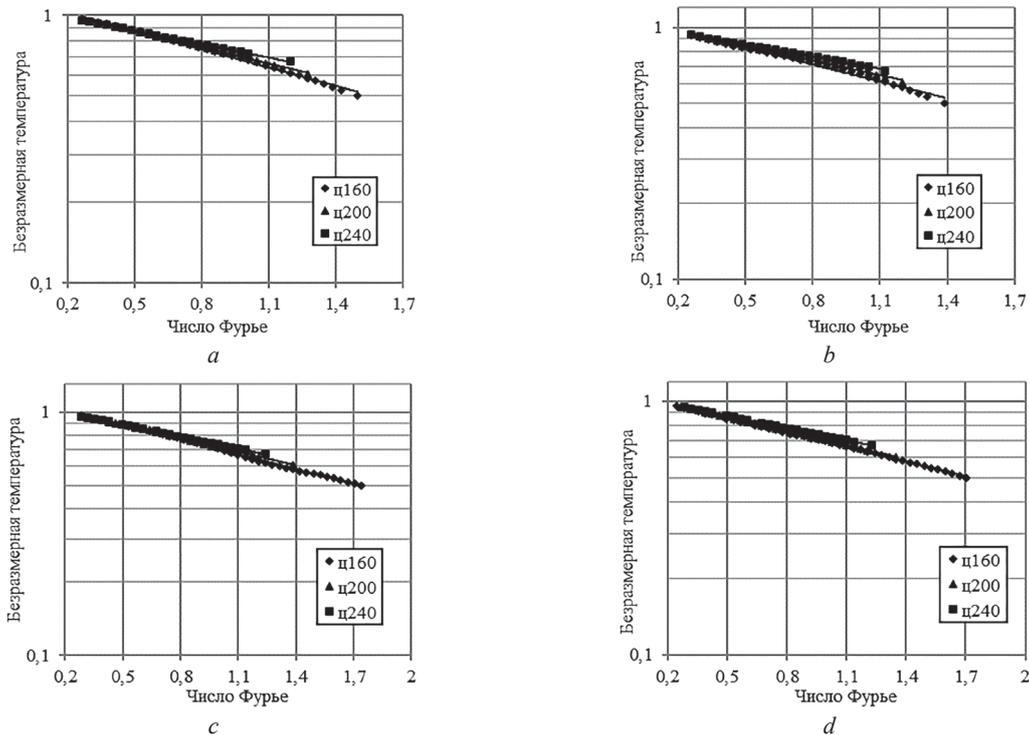


Рис. 4. Изменение безразмерной температуры в центре изделий в виде пластины от числа Фурье на стадии регулярного режима $Fo \geq 0,2$: *a* – влажный обезжиренный образец в среде сухого воздуха, *b* – влажный обезжиренный образец в паровоздушной среде, *c* – маловлажный жирный образец в среде сухого воздуха, *d* – маловлажный жирный образец в паровоздушной среде; ц160, ц200, ц240 – изменение температуры в центре образца при температуре греющей среды соответственно 160 °С, 200 и 240 °С

Fig. 4. The change in the dimensionless temperature in the center of products in the form of a plate from the Fourier number at the stage of the regular regime $Fo \geq 0.2$: *a* – a moist fat-free sample in a dry air environment, *b* – a moist fat-free sample in a vapor-air environment, *c* – a low-moisture fatty sample in a dry air environment, *d* – a low-moisture fatty sample in a vapor-air environment; ц160, ц200, ц240 – temperature change in the center of the sample at the temperature of the heating medium, respectively 160 °C, 200 and 240 °C

Коэффициент теплоотдачи при определении числа Био находили суммированием конвективной и лучистой составляющей. Коэффициент теплоотдачи конвекцией определяли по теории подобия из критериального уравнения $Nu = f(Re, Pr)$ [22, 23] при скорости движения теплоносителя 3,9 м/с согласно замерам многофункционального измерительного прибора Testo 435-4 (Германия) в рабочей зоне камеры пароконвекционного аппарата. Коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием определяли по формуле Стефана–Больцмана [22, 23].

Обращают на себя внимание (см. табл. 1) несколько меньшие значения полученных коэффициентов μ_1^2 и $N(Bi)$ для изделий, обработанных в паровоздушной смеси. Данный эффект связан с характером колебаний температурных градиентов. На начальном этапе нагревания при неупорядоченном режиме заготовка получает значительно большее количество теплоты по сравнению с образцами, обработанными в сухом воздухе, из-за наличия конденсационных процессов. К моменту наступления регулярного режима для паровоздушной смеси конденсационные процессы прекращаются, и далее теплоотдача происходит в условиях свободной конвекции. В воздушной среде рост температуры более равномерен и протекает при практически постоянных значениях коэффициента теплоотдачи.

Для маловлажных жирных образцов характерны более низкие значения полученных коэффициентов μ_1^2 и $N(Bi)$ по сравнению с влажными обезжиренными, что объяснимо низкой теплопроводностью материала.

Проверка достоверности полученных критериальных уравнений и сопоставление экспериментальных и расчетных значений продолжительности тепловой обработки исследуемых изделий показаны в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений продолжительности тепловой обработки исследуемых изделий

Table 2. Comparison of experimental and calculated values of the duration of heat treatment of the studied products

Вид материала	Температура греющей среды, °С	Греющая среда			
		сухой воздух		паровоздушная смесь	
		$\tau_{\text{эсп.}}$, МИН	$\tau_{\text{расч.}}$, МИН	$\tau_{\text{эсп.}}$, МИН	$\tau_{\text{расч.}}$, МИН
<i>Форма – цилиндр</i>					
Влажный обезжиренный образец	160	37	37,25	35	35,22
	200	32	31,93	30,5	30,42
	240	29	28,9	27,5	27,55
Маловлажный жирный образец	160	48	49,1	47,5	47,4
	200	38	38,66	37,5	37,34
	240	33	33,4	33	32,6
<i>Форма – пластина</i>					
Влажный обезжиренный образец	160	40	40,9	37	37,8
	200	34	34,51	32	32,78
	240	32	31,57	30	30,74
Маловлажный жирный образец	160	49	48,7	48	49,13
	200	39	39,39	38	37,86
	240	35	34,5	34,5	34,04

Применение в ходе экспериментальных исследований одномерных тел позволяет сравнить полученные коэффициенты $N(Bi)$ и μ_1^2 с табличными значениями [19] для твердых тел (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Значения коэффициентов $N(Bi)$ и μ_1

Table 3. Values of coefficients $N(Bi)$ and μ_1

Форма	$Bi_{\text{экв}}$	$N(Bi)$		μ_1^2	
		экспериментальные	справочные	экспериментальные	справочные
Цилиндр	Влажный обезжиренный образец				
	<i>Греющая среда – сухой воздух</i>				
	2,41	1,292	1,376	2,727	2,849
	2,47	1,202	1,381	2,299	2,885
	2,54	1,106	1,387	1,834	2,932
	<i>Греющая среда – паровоздушная смесь</i>				
	2,322	1,153	1,368	2,538	2,785
	2,386	1,134	1,374	2,208	2,83
	2,476	1,035	1,381	1,666	2,889
	Маловлажный жирный образец				
	<i>Греющая среда – сухой воздух</i>				
	2,278	1,218	1,364	2,03	2,755
	2,330	1,205	1,369	1,994	2,791
	2,399	1,178	1,375	1,872	2,839
	<i>Греющая среда – паровоздушная смесь высокой влажности</i>				
	2,191	1,152	1,356	1,971	2,693
	2,257	1,143	1,362	1,906	2,740
2,341	1,132	1,370	1,781	2,799	
Пластина	Влажный обезжиренный образец				
	<i>Греющая среда – сухой воздух</i>				
	1,522	1,139	1,155	0,526	0,983
	1,546	1,099	1,156	0,462	0,993
	1,580	1,062	1,158	0,385	1,008
	<i>Греющая среда – паровоздушная смесь</i>				
	1,462	1,082	1,151	0,518	0,957
	1,491	1,055	1,153	0,444	0,970
1,536	1,029	1,155	0,368	0,989	

Окончание табл. 3

Форма	В _{экв}	N(Bi)		μ_1^2	
		экспериментальные	справочные	экспериментальные	справочные
Маловлажный жирный образец					
<i>Греющая среда – сухой воздух</i>					
	1,440	1,117	1,150	0,465	0,947
	1,462	1,095	1,151	0,424	0,956
	1,494	1,072	1,153	0,379	0,969
<i>Греющая среда – паровоздушная смесь</i>					
	1,239	1,075	1,137	0,439	0,859
	1,276	1,070	1,139	0,424	0,875
	1,320	1,055	1,142	0,371	0,895

Из табл. 3 видно, что экспериментальные коэффициенты $N(Bi)$ и μ_1^2 имеют меньшие значения по сравнению с табличными данными для твердых тел, что может быть объяснено влиянием на процесс теплообмена фазовых и физико-химических превращений.

Характер изменения $N(Bi)$ и μ_1^2 для твердых тел и изучаемых изделий противоположен. При росте числа Био для твердых тел свойственно увеличение $N(Bi)$ и μ_1^2 , в то время как для изделий из мясных фаршей характерно их уменьшение. Можно предположить, что интенсивность фазовых и физико-химических превращений возрастает по мере повышения температуры, что приводит к удельному снижению интенсивности нагревания. То есть при прочих равных условиях, чем больше потери энергии, связанные с агрегатными изменениями, тем меньший темп нагревания.

Полученные зависимости распространяются и на современную номенклатуру продукции мясоперерабатывающих производств. Мясные кулинарные изделия рассматриваются в данном случае как тела конечных размеров. Расчет температурного поля проводится на основе теоремы перемножения решений.

Заключение. Представлены результаты обработки на основе теории регулярного режима нестационарной теплопроводности опытных данных процесса нагревания влажных капиллярно-пористых тел различного состава (мясных изделий) в сухом воздухе и паровоздушной смеси. Показаны особенности протекания теплообменных процессов в центральном слое изделий из мясного фарша при прямом контакте греющей среды с поверхностью продукта. Получены критериальные уравнения подобия, описывающие протекание процесса нагревания в центральном слое изучаемых образцов при исследуемых режимных параметрах. Проведено аналитическое сравнение экспериментальных коэффициентов в критериальных уравнениях подобия для различных образцов и режимных параметров с табличными значениями для твердых тел. Дана проверка и сопоставление экспериментальных и расчетных значений продолжительности тепловой обработки изделий из измельченного мяса.

Практическая значимость исследований состоит в повышении качественных характеристик мясных рубленых изделий и оптимизации оперативного производственного планирования за счет применения методики прогнозного расчета продолжительности тепловых операций.

Список использованных источников

1. Николаев, Н. С. Моделирование процесса термообработки мясного сырья как сложной системы: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук : 05.18.12 / Н. С. Николаев; Моск. гос. акад. приклад. биотехнологии. – М., 1996. – 55 с.
2. Рогов, И. А. Технология мяса и мясных продуктов / И. А. Рогов, А. Г. Забашта, Г. П. Казюлин. – М.: КолосС, 2009. – Кн. 2: Технология мясных продуктов. – 712 с.
3. Гинзбург, А. С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов: справочник / А. С. Гинзбург, М. А. Громов, Г. И. Красовская. – 2-е изд. – М.: Пищ. пром-сть, 1980. – 288 с.
4. Marcotte, M. Thermophysical properties of processed meat and poultry products / M. Marcotte, Ali R. Taherian, Y. Karimi // J. Food Eng. – 2008. – Vol. 88, iss. 3. – P. 315–322. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.02.016>
5. Дульгер, Н. В. Экспериментальная оценка теплофизических характеристик продуктов животного происхождения / Н. В. Дульгер, Р. Н. Зарипов, В. Н. Лысова // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. – 2005. – № 2 (25). – С. 284–287.
6. Светлов, Ю. В. Эффективная теплопроводность и внутренняя поверхность переноса пористых и волокнистых структур (на примере пищевых материалов) / Ю. В. Светлов, Ю. Б. Никифоров // Тонкие хим. технологии. – 2015. – Т. 10, № 6. – С. 71–78.

7. Косой, В. Д. Совершенствование производства колбас: учеб. пособие / В. Д. Косой, В. П. Дорохов. – М.: ДеЛи принт, 2006. – 766 с.
8. Бражников, А. М. Теория термической обработки мясосюродуков / А. М. Бражников. – М.: Агропромиздат, 1987. – 271 с.
9. Расчет продолжительности процесса термовлажностной обработки полуфабрикатов на основе животного и растительного сырья / Л. Э. Глаголева [и др.] // Вестн. Воронеж. гос. ун-та инженер. технологий. – 2018. – Т. 80, № 2. – С. 51–57. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-2-51-57>
10. Верболоз, Е. И. Особенности низкотемпературной тепловой обработки мясосюродуков в пароконвектомате с наложением ультразвуковых колебаний / Е. И. Верболоз, С. А. Романчиков // Вестн. Воронеж. гос. ун-та инженер. технологий. – 2017. – Т. 79, № 3. – С. 35–41. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2017-3-35-41>
11. Isleroglu, H. Modelling of heat and mass transfer during cooking in steam-assisted hybrid oven / H. Isleroglu, F. Kaymak-Ertekin // J. Food Eng. – 2016. – Vol. 181. – P. 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.02.027>
12. Ahmad, S. Mathematical modeling of meat cylinder cooking / S. Ahmad, M. A. Khan, M. Kamil // LWT – Food Science and Technology. – 2015. – Vol. 60, iss. 2, part 1. – P. 678–683. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.10.061>
13. Combined heat transfer and kinetic models to predict cooking loss during heat treatment of beef meat / A. Kondjoyan [et al.] // Meat Sci. – 2013. – Vol. 95, iss. 2. – P. 336–344. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.04.061>
14. Rinaldi, M. Real-time estimation of slowest heating point temperature and residual cooking time by coupling multipoint temperature measurement and mathematical modelling: Application to meat cooking automation / M. Rinaldi, E. Chiavaro, R. Massini // Food Control. – 2012. – Vol. 23, iss. 2. – P. 412–418. <http://doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.08.009>
15. Chen, H. Modeling coupled heat and mass transfer for convection cooking of chicken patties / H. Chen, B. P. Marks, R. Y. Murphy // J. Food Eng. – 1999. – Vol. 42, iss. 3. – P. 139–146. <https://doi.org/10.1016/S0260-8774%2899%2900111-9>
16. Erdođdu, F. Mathematical approaches for use of analytical solutions in experimental determination of heat and mass transfer parameters / F. Erdođdu // J. Food Eng. – 2005. – Vol. 68, iss. 2. – P. 233–238. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.038>
17. Multiscale modeling of food thermal processing for insight, comprehension, and utilization of heat and mass transfer: A state-of-the-art review / J. Li [et al.] // Trends in Food Sci. & Technology. – Vol. 131. – P. 31–45. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.11.018>
18. Химический состав российских пищевых продуктов: справочник / под ред. И. М. Скурихина, В. А. Тутельяна. – М.: ДеЛи принт, 2002. – 236 с.
19. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник / Е. В. Аметистов [и др.]; под общ. ред. Е. А. Григорьева, В. М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.
20. Смагина, М. Н. Влияние изменения теплофизических характеристик материала на процесс нагревания изделий из мясного фарша / М. Н. Смагина, Д. А. Смагин, А. А. Смоляк // Пищевая промышленность: наука и технология. – 2020. – № 4 (5). – С. 61–68. [https://doi.org/10.47612/2073-4794-2020-13-4\(50\)-61-69](https://doi.org/10.47612/2073-4794-2020-13-4(50)-61-69)
21. Смагин, Д. А. Методики расчета продолжительности запекания изделий из мясного фарша при тепловой обработке в конвекционных печах / Д. А. Смагин, А. А. Смоляк, М. Н. Смагина // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2020. – Т. 58, № 3. – С. 373–384. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2020-58-3-373-384>
22. Цветков, Ф. Ф. Задачник по тепломассообмену: учеб. пособие / Ф. Ф. Цветков, Р. В. Керимов, В. И. Величко. – 3-е изд. – М.: Изд. дом МЭИ, 2010. – 196 с.
23. Краснощеков, Е. А. Задачник по теплопередаче: учеб. пособие для вузов / Е. А. Краснощеков, А. С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1980. – 288 с.

References

1. Nikolaev N. S. *Modeling of the Process of Heat Treatment of Meat Raw Materials as a Complex System*. Moscow, Moscow State Academy of Applied Biotechnology, 1996. 55 p. (in Russian).
2. Rogov I. A., Zabashita A. G., Kaziulin G. P. *Technology of Meat and Meat Products. Book 2. Technology of Meat Products*. Moscow, KolosS Publ., 2009. 712 p. (in Russian).
3. Ginzburg A. S., Gromov M. A., Krasovskaya G. I. *Thermophysical Characteristics of Food Products*. 2nd ed. Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1980. 288 p. (in Russian).
4. Marcotte M., Taherian Ali R., Karimi Y. Thermophysical properties of processed meat and poultry products. *Journal of Food Engineering*, 2008, vol. 88, iss. 3, pp. 315–322. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.02.016>
5. Dul'ger N. V., Zaripov R. N., Lysova V. N. Experimental evaluation of thermophysical characteristics of animal products. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Astrakhan State Technical University*, 2005, no. 2 (25), pp. 284–287 (in Russian).
6. Svetlov Yu. V., Nikiforov Yu. B. Effective thermal conductivity and inner transfer surface of porous and fibrous materials on the example of foodstuffs. *Tonkie Khimicheskie Tekhnologii = Fine Chemical Technologies*. 2015, vol. 10, no. 6, pp. 71–78 (in Russian).
7. Kosoy V. D., Dorohov V. P. *Improving the Production of Sausages*. Moscow, DeLi print Publ., 2006. 766 p. (in Russian).
8. Bragnikov A. M. *Theory of Heat Treatment of Meat Products*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1987. 271 p. (in Russian).
9. Glagoleva L. E., Zatsepilina N. P., Kopylov M. V., Nesterenko I. V. Calculation of the duration of the process of heat and moisture treatment of semi-finished products based on animal and vegetable raw materials. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii = Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2018, vol. 80, no. 2, pp. 51–57 (in Russian). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-2-51-57>

10. Verboloz E. I., Romanchikov S. A. Features of low-temperature heat treatment of meat products in a steam convector with the imposition of ultrasonic vibrations. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii = Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2017, vol. 79, no. 3, pp. 35–41 (in Russian). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2017-3-35-41>
11. Isleroglu H., Kaymak-Ertekin F. Modelling of heat and mass transfer during cooking in steam-assisted hybrid oven. *Journal of Food Engineering*, 2016, vol. 181, pp. 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.02.027>
12. Ahmad S., Khan M. A., Kamil M. Mathematical modeling of meat cylinder cooking. *LWT – Food Science and Technology*, 2015, vol. 60, iss. 2, part 1, pp. 678–683. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.10.061>
13. Kondjoyan A., Ouilic S., Portanguen S., Gros J.-B. Combined heat transfer and kinetic models to predict cooking loss during heat treatment of beef meat. *Meat Science*, 2013, vol. 95, iss. 2, pp. 336–344. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.04.061>
14. Rinaldi M., Chiavaro E., Massini R. Real-time estimation of slowest heating point temperature and residual cooking time by coupling multipoint temperature measurement and mathematical modelling: Application to meat cooking automation. *Food Control*, 2012, vol. 23, iss. 2, pp. 412–418. <http://doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.08.009>
15. Chen H., Marks B. P., Murphy R. Y. Modeling coupled heat and mass transfer for convection cooking of chicken patties. *Journal of Food Engineering*, 1999, vol. 42, iss. 3, pp. 139–146. <https://doi.org/10.1016/S0260-8774%2899%2900111-9>
16. Erdoğan F. Mathematical approaches for use of analytical solutions in experimental determination of heat and mass transfer parameters. *Journal of Food Engineering*, 2005, vol. 68, iss. 2, pp. 233–238. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.038>
17. Jiaheng Li, Yong Deng, Weidong Xu, Runan Zhao, Tingting Chen, Mingzhe Wang, Enbo Xu, Jianwei Zhou, Wenjun Wang, Donghong Liu. Multiscale modeling of food thermal processing for insight, comprehension, and utilization of heat and mass transfer: A state-of-the-art review. *Trends in Food Science & Technology*, vol. 131, pp. 31–45. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.11.018>
18. Skurikhin I. M., Tutel'iana V. A. *Chemical Composition of Russian Food Products*. Moscow, DeLi print Publ., 2002. 236 p. (in Russian).
19. Grigor'ev V. A., Zorin V. M., eds. *Heat and Mass Transfer. Thermal Engineering Experiment*. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 512 p. (in Russian).
20. Smagina M. N., Smagin D. A., Smoliak A. A. The influence of changes in the thermophysical characteristics of the material on the heating process of minced meat products. *Pishchevaia promyshlennost': nauka i tekhnologii = Food Industry: Science and Technology*, 2020, no. 4 (5), pp. 61–68 (in Russian). [https://doi.org/10.47612/2073-4794-2020-13-4\(50\)-61-69](https://doi.org/10.47612/2073-4794-2020-13-4(50)-61-69)
21. Smagin D. A., Smolyak A. A., Smagina M. N. Methods for calculating the duration of baking of minced meat products during heat treatment in convection ovens. *Vestsi Natsyyanal'nay akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2020, vol. 58, no. 3, pp. 373–384 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2020-58-3-373-384>
22. Tsvetkov F. F., Kerimov R. V., Velichko V. I. *A Task Book on Heat and Mass Transfer*. 3rd ed. Moscow, Publishing House of MEI, 2010. 196 p. (in Russian).
23. Krasnoshchekov E. A., Sukomel A. S. *Taskbook on Heat Transfer*. 4th ed. Moscow, Energy Publ., 1980. 288 p. (in Russian).

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

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-149-155>
UDC [612.21-055.1]-047.37



Original article

Ina I. Revinskaya*, **Pavel V. Kamlach**, **Yauhen I. Liashchevich**

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

**HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX FOR STUDYING
OF BREATHING VOLUME PARAMETERS**

Abstract. In this paper, a developed hardware-software complex for studying volume parameters of breathing is considered. To estimate the volumetric parameters of breathing, a method for registering the movement of the chest and abdominal walls by changing the overall dimensions of the chest and abdomen with ranking according to the anatomical features of a person is proposed. A technique for researching the volumetric parameters of breathing based on the method of video recording of the movements of the chest and abdominal wall of a person was developed. The proposed method was used to estimate volume parameters of breathing among men aged 20–22 years. BMI (body mass index) ranged from 18.2 to 30.1 kg/m². The research of volumetric parameters of respiration was carried out using the hardware-software complex and the proposed technique for registering the biomechanics of breathing. Conclusions about the relation between volumetric parameters of breathing and the values of changes in the overall dimensions of the chest and abdomen during respiration were drawn. A correlation-regression analysis of the volumes of inhaled/exhaled air and the values of deviations of the overall dimensions of the chest and abdomen was carried out. The results obtained indicate a strong relation between volumetric parameters of breathing and the values of deviations in the overall dimensions of the chest and abdomen.

Keywords: biomechanics, breathing, COVID-19, spirometry, videocamera, lung volumes

Acknowledgements. The scientific work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research and Ministry of Education of the Republic of Belarus (projects No. T22MB-017 and No. 22-3163M § 57.99.00).

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

Information about the authors: *Ina I. Revinskaya** – Graduate Student of the Department of Electronic Technology and Engineering, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. <https://orcid.org/0000-0003-2664-7075>. E-mail: inna_revinskaya@bsuir.by; *Pavel V. Kamlach* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electronic Engineering and Technology, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. <https://orcid.org/0000-0002-2329-9063>. E-mail: kamlachpv@bsuir.by; *Yauhen I. Liashchevich* – Graduate Student of the Department of Electronic Technology and Engineering, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. <https://orcid.org/0000-0002-8218-6544>. E-mail: e.leshchevich@bsuir.by

Contribution of the authors: *Ina I. Revinskaya* – development of the hardware-software complex, planning and conducting research, statistical processing of the obtained results, writing and formatting of the text of the manuscript; *Pavel V. Kamlach* – formulation of the task for the research, discussion of the results, editing of the text of the manuscript; *Yauhen I. Liashchevich* – development of the hardware-software complex, conducting research and editing of the text of the manuscript.

For citation: Revinskaya I. I., Kamlach P. V., Liashchevich E. I. Hardware-software complex for studying of breathing volume parameters. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 2, pp. 149–155. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-149-155>

Received: 16.11.2022

Approved for printing: 25.05.2023

Оригинальная статья

И. И. Ревинская*, П. В. Камлач, Е. И. Лещевич

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь***АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЫХАНИЯ**

Аннотация. Приводится описание разработанного аппаратно-программного комплекса для исследования объемных параметров дыхания. Для определения указанных параметров дыхания (жизненной емкости легких и дыхательного объема) предлагается способ регистрации движения грудной и брюшной стенок по изменению габаритных размеров грудной клетки и живота с ранжированием по анатомическим особенностям человека. Разработана методика исследования объемных параметров дыхания, основанная на методе видеосъемки движения грудной клетки и брюшной стенки человека. Предложенная методика была использована при оценке объемных параметров дыхания среди мужчин в возрасте 20–22 лет. Индекс массы тела (ИМТ) варьировался от 18,2 до 30,1 кг/м². С помощью аппаратно-программного комплекса проведены исследования объемных параметров дыхания совместно с предложенным способом регистрации биомеханики дыхания, сделаны выводы о взаимосвязи объемных параметров дыхания и значений отклонений габаритных размеров грудной клетки и живота во время дыхания. Проведен корреляционно-регрессионный анализ объемов вдыхаемого/выдыхаемого воздуха и значений отклонений габаритных размеров грудной клетки и живота. Полученные результаты свидетельствуют о сильной взаимосвязи объемных параметров дыхания и значений отклонений габаритных размеров грудной клетки и живота.

Ключевые слова: биомеханика, дыхание, COVID-19, спирометрия, видеорегилятор, объем легких

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Министерства образования Республики Беларусь в рамках научных проектов T22MB-017 и ГБЦ № 22-3163М § 57.99.00.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Ревинская Инна Ивановна** – аспирант кафедры электронной техники и технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. <https://orcid.org/0000-0003-2664-7075>. E-mail: inna_revinskaya@bsuir.by; *Камлач Павел Викторович* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электронной техники и технологии, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. <https://orcid.org/0000-0002-2329-9063>. E-mail: kamlachpv@bsuir.by; *Лещевич Евгений Игоревич* – аспирант кафедры электронной техники и технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. <https://orcid.org/0000-0002-8218-6544>. E-mail: e.leshchevich@bsuir.by

Вклад авторов: *Ревинская Инна Ивановна* – разработка аппаратно-программного комплекса, планирование и проведение экспериментальных исследований, статистическая обработка полученных результатов, написание и оформление текста рукописи; *Камлач Павел Викторович* – постановка задач для проведения исследования и обсуждение полученных результатов, редактирование текста рукописи; *Лещевич Евгений Игоревич* – разработка аппаратно-программного комплекса, проведение экспериментальных исследований, редактирование текста рукописи.

Для цитирования: Ревинская, И. И. Аппаратно-программный комплекс для исследования объемных параметров дыхания / И. И. Ревинская, П. В. Камлач, Е. И. Лещевич // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 2. – С. 149–155. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-149-155>

Поступила в редакцию: 16.11.2022

Утверждена к печати: 25.05.2023

Introduction. Breathing movements of the chest and abdomen are carried out by the respiratory muscles and closely correlate with the increase and decrease in the volume of the chest, which in turn describes changes in the volume of inhaled and exhaled air [1]. Since external respiration is carried out by changes in chest volume and concomitant changes in lung volume, it is worth mentioning how the biomechanics of breathing occurs.

Inhalation occurs due to an increase in the volume of the chest cavity in three directions – vertical, sagittal and frontal [2, 3]. This is due to the rise of the ribs and the lowering of the diaphragm. The volume of the chest and the lungs in it increase on inspiration; at the same time, the pressure in them decreases, and air enters the pulmonary alveoli through the airways. During inhalation, the respiratory muscles of a person overcome a number of forces: 1) the severity of the ribs raised upward; 2) elastic resistance of costal cartilages; 3) the resistance of the walls of the abdomen and abdominal viscera, pressed downwards by the descending dome of the diaphragm.

Exhalation is carried out passively: the respiratory muscles relax, under the influence of these forces, the ribs fall, and the diaphragm rises. As a result, the volume of the chest decreases. The abdominal muscles contract and push the abdominal organs and the dome of the diaphragm upward. On exhalation,

the volume of the chest, and, consequently, of the lungs, decreases, the pressure in the alveoli increases and the air comes out of the lungs.

Classical research methods for respiratory function (spirometry, pneumotachometry, etc.) make it possible to identify possible pathologies of respiratory function, respiratory diseases such as COPD, asthma, bronchitis, etc. Spirometry is designed to measure the volume of inhaled and exhaled air and is considered the “gold standard” for diagnosing chronic obstructive pulmonary disease [4].

Preparation for spirometry requires the use of disposable consumables (mouthpiece, antibacterial filter, replaceable mesh, etc.) [4], regular sanitization of the measuring tube from sputum after each patient, which is especially important in the context of the COVID-19 pandemic. In addition, after regular sanitization (in the case of disassembly and assembly of the measuring tube), calibration of the device is required, which increases the time it takes to prepare the equipment for use. During measurements, the use of a nose clip is mandatory for reliable results, which causes discomfort to the subject and may affect the normal breathing pattern of the subject. The psychological factor of influence on the results of the research should be taken into account. In addition, spirometry does not allow for long-term studies of breathing parameters [4, 5].

Currently, it is becoming more and more important to use both contact and non-contact methods for researching the function of external respiration. Recent scientific research in this area substantiates the possibility of using methods based on the analysis of the movement of the chest and abdomen [6]. There are three approaches to breath analysis: based on the recording of chest deformation caused by respiratory activity (strain sensors); based on changes in transthoracic impedance (impedance sensors); based on the recording of chest movements (for example, chest tilt, acceleration and speed) using an accelerometer, gyroscope, magnetometer.

These methods make it possible to indirectly estimate the volumetric parameters of breathing from the values obtained from the sensors (change in the impedance of the chest during breathing, change in the capacitance of the sensor, resistance, etc.) due to the movement of the chest and abdominal cavity. Thus, it is relevant and promising to develop methods for researching the function of external respiration by the movement of the chest and abdomen. Such methods will solve the previously described disadvantages.

In this paper, it is proposed to use the method of recording the movement of the chest and abdominal walls by changing the overall dimensions of the chest and abdomen with ranking according to the anatomical features of a person to determine the volumetric breathing parameters.

Material and methods. For studying the volumetric parameters of breathing a hardware-software complex (HSC) was developed. The structure of the HSC (Figure 1) includes a spirometer, a video camera and a personal computer (PC).

An automated multifunctional spirometer MAC-1 was used to measure of volume capacity (V_C) and tidal volume (V_T). The main technical characteristics of the spirometer: air volume measurement limit 1–8 dm³, measured flow up to – 18 l/s, accuracy class – 5 %, automatic quality control tests in accordance with ATS-1994 and ATS/ERS-2005 [7]. Spirometry was used as a reference method for measuring the volume of inhaled and exhaled air and to estimate the validity of the proposed method of measurement based on the analysis of the movement of the chest and abdomen.

A video camera was used to record the movements of the chest and abdominal walls of the subject during breathing. According to the obtained video fragments, the values of deviations of the chest and abdomen were calculated. Main technical characteristics of the video camera: screen resolution

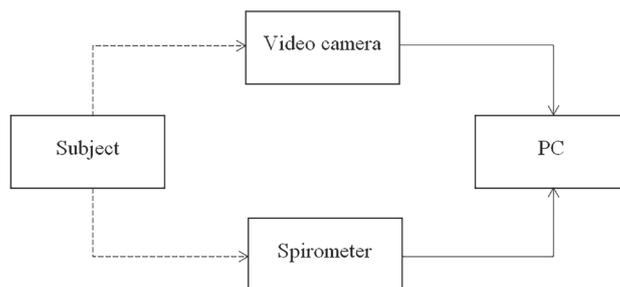


Figure 1. Structural diagram of the hardware-software complex for the study of the volumetric parameters of breathing

1080 × 1920, number of matrix dots – 12 MP, maximum frames per second – 240 frames/s (1280 × 720), optical stabilization. The video camera was mounted on a tripod at a distance of 50–60 cm to the right of the subject. The height of the video camera was adjusted depending on the height of the subject. On the left of the subject, a calibration board was placed with a division value of 0.5 and 1.0 cm along the X axis, and 2 cm along the Y axis.

Using a PC with specialized software, video files were divided into video fragments, video fragments were processed, data was extracted from the spirometer, and the statistical analysis of the obtained experimental data was carried out.

Method for assessing volumetric parameters of breathing. A technique for registering volumetric parameters of breathing using the hardware-software complex was developed and includes six steps:

1. Collection of anamnesis (age, height, weight, presence of diseases, including chronic ones).

2. Placement of markers on the human body (Figure 2, *a–d*) – in the sagittal plane, in the direction of the video camera. The first mark was attached at the midpoint relative to the line of the armpits and nipples, the second mark is at the level of the solar plexus, the third – at the level of the abdomen (waist). The marks help to determine correctly the places, at the level of which the deviations of the overall dimensions of the chest and abdomen were calculated.

3. The subject must be properly seated.

4. Installation of a video camera and a calibration board. The height of the video camera and the board can be adjusted depending on the height of the subject. The video camera must be placed parallel to the measurement plane.

5. Setting up the spirometer. Entering patient data.

6. Starting the video camera and performing spirometry tests.

Spirometry tests were carried out in accordance with the guidelines of the Ministry of Health of the Republic of Belarus [8]. During the research, the current lung volumes were assessed and, at the same time, the images obtained by the video camera were recorded during calm breathing on inspiration (see Figure 2, *a*), on exhalation (see Figure 2, *b*), then, on command, the subject took a deep breath (see Figure 2, *c*) and calm full exhalation (see Figure 2, *d*), respectively.

The determination of the correlation of volumetric breathing parameters (volume capacity) and the values of deviations of the overall dimensions of the chest and abdomen is computed by six levels as shown in Figure 2, *a–d*. Chest movements are determined by points A, B, C, abdominal movements – by points D, E, F. The value Δx_i was determined as a deviation from the minimum difference in the coordinates of the extreme points of the back and chest (or abdomen), index i denotes the number of measurements.

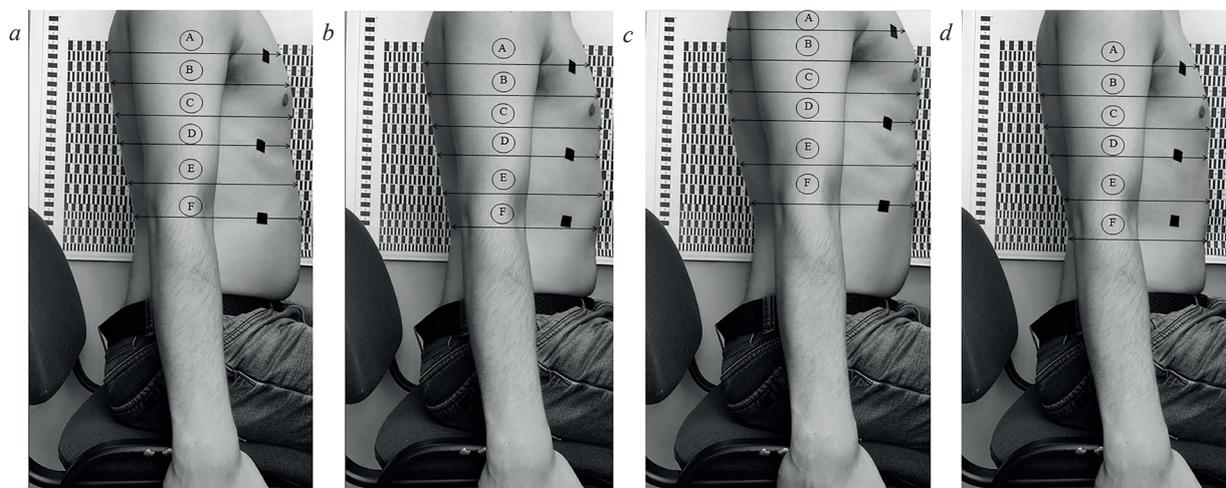


Figure 2. Fragments of video recording during the spirometry test: *a* – inspiration, *b* – expiration, *c* – deep breath, *d* – quiet full exhalation; estimation of deviations of the chest and abdomen is computed by six levels: A – at the level of the armpit; B – as the midpoint between A and C; C – 2 cm below the nipple; D – at the level of the solar plexus (diaphragm); E – the midpoint between D and F; F – at the level of the maximum deflection of the abdomen during breathing

To assess the nonlinear relationship between the volumes of inhaled and exhaled air and the deviation values, the correlation ratio [9, 10] is calculated by the formula

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{\sigma_{\text{res}}^2}{\sigma^2}} = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

where σ_{res} is the residual dispersion, σ is the variance of the actual values of the resulting feature, \hat{y} are the theoretical values obtained from the regression equation \bar{y} is the arithmetic mean deviation of value and y_i are the empirical values.

The root expression of the correlation relationship is the coefficient of determination and is calculated by the formula

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}. \quad (2)$$

The coefficient of determination shows how closely the observed values adjoin the regression line.

To check the adequacy of the regression model [10], Student's t -test is used and is calculated by the formula and was signed as t_η

$$t_\eta = \frac{\eta}{m_\eta} = \eta \sqrt{\frac{N - 2}{1 - \eta^2}}, \quad (3)$$

where $(N - 2)$ is the number of degrees of freedom at a given significance level and sample size N ; m_η is the standard error of correlation ratio η . The standard error for the correlation coefficient can be written as $\eta \pm m_\eta$.

Result and discussion. Research on the biomechanics of breathing was carried out on the basis of the Department of Electronic Technique and Technology of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. According to the method described above using the hardware-software complex, 26 people (men) aged from 20 to 22 years were researched, while the subjects were divided into two groups according to the value of the body mass index (BMI): 18.2–25.0 kg/m² (normal) and 25.0–30.1 kg/m² (overweight).

For each subject, the correlation coefficients were calculated by six levels A–F (see Figure 2, *a–d*). When assessing the parameters from the group with normal BMI, a subgroup with the highest was identified (6 people, age 20–22 years, height 169–182 cm, weight 55–70 kg, BMI 19.3–21.5 kg/m²).

Figure 3, *a–f* shows the dependency of volume capacities on the values of deviations of the chest and abdominal walls for this subgroup for levels A–F. On the x -axis the deviations of the chest / abdomen $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$ in centimeters (cm) are shown, on the y -axis – volume capacity in liters (L).

The approximation curve describes a non-linear functional relationship between the experimental data in the form of a polynomial curve. The non-linear relationship is explained by the fact that in the process of breathing, the lung volumes changes together with the movements of the walls of the chest and abdomen in the horizontal, sagittal and frontal planes. The measurements were carried out in the sagittal plane, since during normal breathing the body walls move with the largest amplitude.

Table summarizes the calculated correlation coefficients η_i (taking into account the standard error of the correlation coefficients m_η) and determination coefficients R^2 .

The values of the correlation relation and the coefficient of determination for points A–D

Parameter / Point	A (Δx_1)	B (Δx_2)	C (Δx_3)	D (Δx_4)	E (Δx_5)	F (Δx_6)
Correlation relation $\eta \pm m_\eta$	0.92 ± 0.08	0.92 ± 0.08	0.98 ± 0.05	0.84 ± 0.11	0.66 ± 0.16	0.47 ± 0.19
Determination coefficient R^2	0.84	0.84	0.95	0.70	0.44	0.22

The experimental data are closest to the approximating curve at level C (Figure 3, *c*), correlation relation $\eta = 0.98 \pm 0.05$, for levels A and B $\eta = 0.92 \pm 0.08$ (Figure 3, *a, b*). Dispersion value for point D is significant (Figure 3, *d*), but there is still a strong relation. The largest dispersion of values and the lowest values of the correlation ratio for points E ($\eta = 0.66$) and F ($\eta = 0.47$) can be explained by the fact that the subjects were dominated by the thoracic type of breathing, and the movement of the chest and abdomen occurs inconsistently.

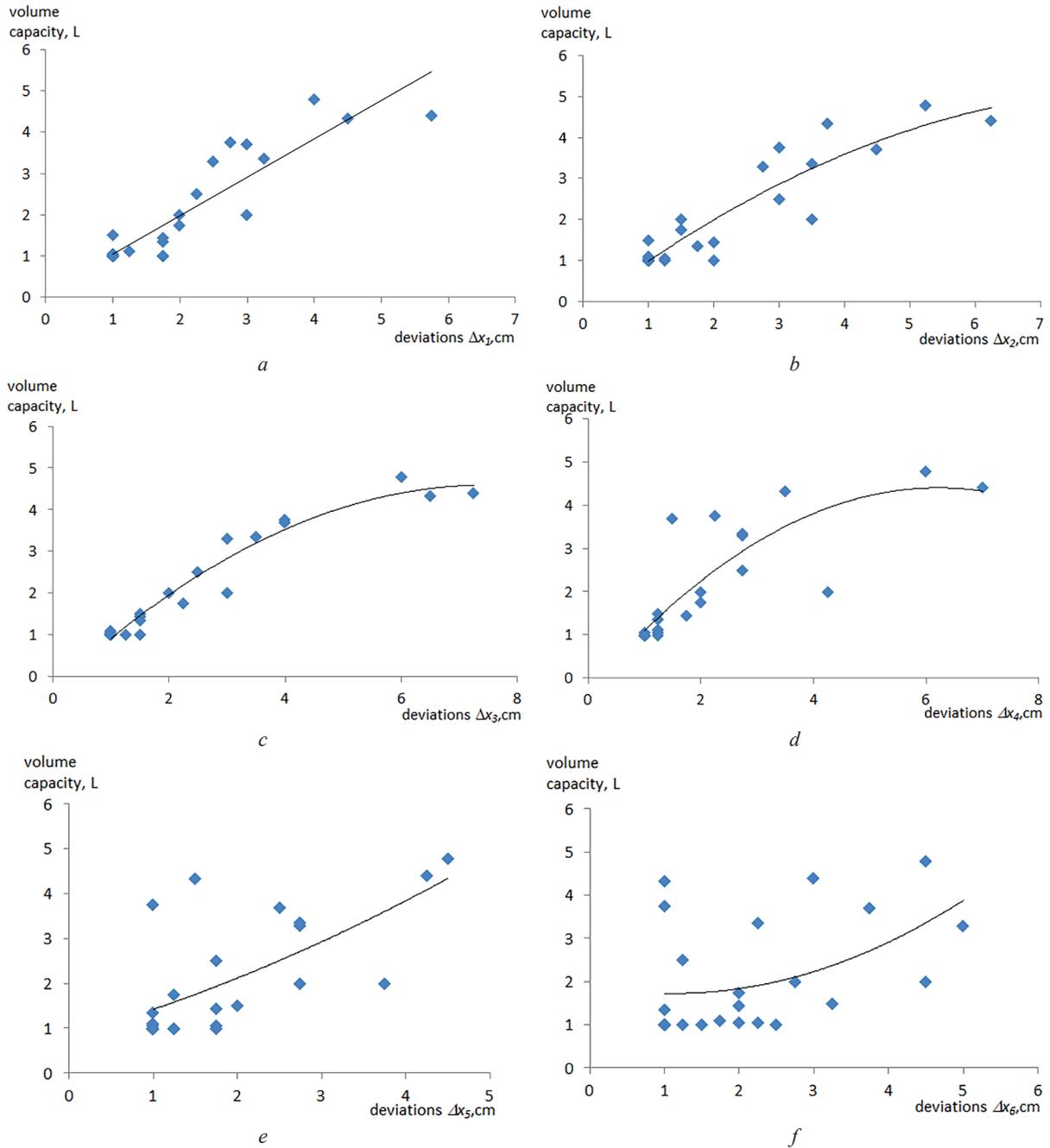


Figure 3. Scatterplots between volume capacity measurements and deviations of the chest and abdomen:
a – at level A, *b* – at level B, *c* – at level C, *d* – at level D, *e* – at level E, *f* – at level F

Conclusion. The hardware-software complex was developed to estimate the volumetric parameters of breathing. It includes a spirometer, a video camera and a personal computer with specialized software. The research of volumetric parameters of respiration was carried out using the hardware-software complex and the proposed technique for registering the biomechanics of breathing.

The obtained results confirm the possibility of using the developed hardware-software complex in the study of lung volumes. Applying the correlation-regression analysis of the experimental results, it was found that the polynomial regression model most accurately describes the tightness of the relationship between the volume capacity and the deviations in the overall dimensions of the chest. The proposed hardware-software complex will allow in the future to estimate the volume capacity in real-time under conditions of long-term monitoring, where the use of standard research methods is difficult.

References

1. Dubrovsky V. I., Fedorova V. N. *Biomechanics*. Moscow, VLADOS-PRESS, Publ., 2003. 550 p. (in Russian).
2. Revinskaya I. I., Kamlach P. V., Madveiko S. I., Kosareva A. A., Bondarik V. M. Application of linear filtering in the evaluation of respiratory parameters. *BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA i analiz vysokogo urovnya: sbornik materialov V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA and High-Level Analysis: Collection of Materials of the 5th International Scientific and Practical Conference]. Minsk, 2019, pp. 27–32 (in Russian).
3. Davydchenko S. V., Bova A. A. *The Study of the Ventilation Function of the Lungs in Clinical Practice*. Minsk, Belarusian State Medical University, 2007. 112 p. (in Russian).
4. Chu M., Nguyen T., Pandey V., Zhou Y., Pham H. N., Bar-Yoseph R., Radom-Aizik S. [et al.]. Respiration rate and volume measurements using wearable strain sensors. *npj Digital Medicine*, 2019, vol. 2, iss. 1, art. ID 8. <https://doi.org/10.1038/s41746-019-0083-3>
5. Moeyersons J., Morales J., Seews N., Van Hoof C., Hermeling E., Groenendaal W., Willems R. [et al.]. Artefact Detection in Impedance Pneumography Signals: A Machine Learning Approach. *Sensors*, 2021, vol. 21, iss. 8, p. 2613. <https://doi.org/10.3390/s21082613>
6. Massaroni C., Nicolò A., Lo Presti D., Sacchetti M., Silvestri S., Schena E. Contact-Based Methods for Measuring Respiratory Rate. *Sensors*, 2019, vol. 19, iss. 4, p. 908. <https://doi.org/10.3390/s19040908>
7. Miller M. R., Hankinson J., Brusasco V., Burgos F., Casaburi R., Coates A., Crapo R. [et al.]. Standardisation of spirometry. *European Respiratory Journal*, 2005, vol. 26, p. 319–338. <https://doi.org/10.1183/09031936.05.00034805>
8. Turina O. I., Lapteva I. M., Kalechits O. M., Manichev I. A., Shcherbitsky V. G. *Organization of Work on the Study of the Functional State of the Lungs Using Spirography and Pneumotachography and the Use of These Methods in Clinical Practice*. Minsk, 2002. 81 p. (in Russian).
9. Kharchenko M. A. *Correlation Analysis*. Voronezh, Publ. House of Voronezh State University, 2008. 31 p. (in Russian).
10. Gusarov V. M. *Statistics*. Moscow, UNITY-DANA Publ., 2003. 463 p. (in Russian).

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-156-166>
UDC 621.382.323



Original article

Vladislav S. Volcheck*, **Viktor R. Stempitsky**

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

**DEVICE CHARACTERIZATION OF GALLIUM NITRIDE HIGH ELECTRON
MOBILITY TRANSISTOR WITH A BORON NITRIDE HEAT-SPREADING ELEMENT**

Abstract. A local thermal management solution for high electron mobility transistors based on GaN was developed using a BN layer as a heat-spreading element. The thermally conducting and electrically insulating nature of BN allows it to be placed close to the active area and to be in direct contact with the electrodes and the heat sink, thus introducing an additional heat-escaping route. The numerical simulations of a GaN high electron mobility transistor with the BN heat-spreading element revealed the improvement in the DC, breakdown, small-signal AC and transient characteristics. In case of sapphire substrate, the maximum temperature in the device structure operating at a power density of 3.3 W/mm was reduced by 82.4 °C, while the breakdown voltage at a gate-source voltage of 2 V was increased by 357 V. The cut-off frequency and the maximum oscillation frequency at a gate-source voltage of 6 V and a drain-source voltage of 30 V were enhanced by 1.38 and 1.49 times, respectively. We suppose that the proposed thermal management method can be adapted to other high-power devices.

Keywords: BN, device simulation, GaN, heat dissipation, heat-spreading element, heterostructure field-effect transistor, high electron mobility transistor, power electronics, self-heating, thermal management

Acknowledgments. This work was carried out with the support of the State Program of Scientific Research “Photonics and Electronics for Innovation” (task 3.1).

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

Information about the authors: *Vladislav S. Volcheck** – Researcher, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. E-mail: vlad.volchek@bsuir.by; *Viktor R. Stempitsky* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Vice-Rector for Research and Development, Head of Research and Development Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. E-mail: vstem@bsuir.by

Contribution of the authors: *Vladislav S. Volcheck* – analysis and synthesis of literature, computer simulation, interpretation of the research results, writing and formatting of the text of the manuscript; *Viktor R. Stempitsky* – substantiation of the concept, development of the research methodology, critical revision of the text of the manuscript.

For citation: Volcheck V. S., Stempitsky V. R. Device characterization of gallium nitride high electron mobility transistor with a boron nitride heat-spreading element. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 2, pp. 156–166. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-156-166>

Received: 30.01.2023

Approved for printing: 25.05.2023

Оригинальная статья

В. С. Волчэк*, **В. Р. Стемпицкий**

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь*

**ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРА С ВЫСОКОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ
ЭЛЕКТРОНОВ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ С ТЕПЛОТВОДЯЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ
НА ОСНОВЕ НИТРИДА БОРА**

Аннотация. Предлагается метод уменьшения влияния эффекта саморазогрева в транзисторах с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия, который заключается в использовании слоя нитрида бора в качестве теплоотводящего элемента. Высокая теплопроводность и низкая электрическая проводимость нитрида бора позволяют располагать слой на его основе вблизи активной области и находиться в плотном контакте с электродами и теплопоглощающим элементом, формируя таким образом дополнительный канал для отведения избыточного тепла. Результаты

численного моделирования транзистора с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия с теплоотводящим элементом на основе нитрида бора указывают на улучшение электрических, частотных и переходных характеристик, увеличение напряжения пробоя. В случае сапфировой подложки максимальная температура в структуре прибора, работающего на уровне 3,3 Вт/мм, снижается на 82,4 °С, при этом напряжение пробоя, рассчитанное при напряжении затвор-исток 2 В, повышается на 357 В. Граничная частота и максимальная частота генерации, определенные при напряжении затвор-исток 6 В и напряжении сток-исток 30 В, увеличиваются в 1,38 и 1,49 раз, соответственно. Предлагаемое конструктивно-технологическое решение может использоваться и для других мощных приборов.

Ключевые слова: гетероструктурный полевой транзистор, нитрид бора, нитрид галлия, приборное моделирование, рассеяние тепла, саморазогрев, силовая электроника, теплоотводящий элемент, транзистор с высокой подвижностью электронов, управление тепловым режимом

Благодарности. Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций» (задание 3.1).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Волчэк Владислав Сергеевич* – научный сотрудник, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. E-mail: vlad.volchek@bsuir.by; Стемпичкий Виктор Романович – кандидат технических наук, доцент, проректор по научной работе, начальник научно-исследовательской части, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. E-mail: vstem@bsuir.by

Вклад авторов: Волчэк Владислав Сергеевич – анализ и обобщение данных литературы, компьютерное моделирование, интерпретация результатов исследования, написание и оформление текста рукописи; Стемпичкий Виктор Романович – обоснование концепции, разработка методологии исследования, критический пересмотр текста рукописи.

Для цитирования: Волчэк, В. С. Эксплуатационные характеристики транзистора с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия с теплоотводящими элементами на основе нитрида бора / В. С. Волчэк, В. Р. Стемпичкий // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 2. – С. 156–166. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-156-166>

Поступила в редакцию 30.01.2023

Утверждена к печати: 25.05.2023

Introduction. The advent of power semiconductor devices in the middle of the last century laid a solid foundation for modern power electronics – the branch of electrical engineering that is engaged in the control and conversion of electric power. It has found a broad spectrum of applications, varying in size from a switch-mode power supply in AC adapters, through a variable-frequency drive used in pumping plants, up to a high-voltage DC electric power transmission system. Advancements in power electronics are crucial to unlocking efficient generation, distribution and consumption of electrical energy, since a power conversion system can be found in virtually every electronic component. A major breakthrough that would greatly improve the efficiency by ensuring low switching and conduction losses is expected from the use of novel materials. Since the inception of solid-state electronics, the basic semiconductor for manufacturing power devices has been silicon. However, silicon technology is now failing to meet the requirements of up-to-date industrial applications and, to current opinion, is about to reach its limits [1]. Consequently, there is a continuous trend towards the introduction of next-generation power devices based on wide band gap semiconductors. One of these attractive materials is GaN – a representative of unique group-III nitrides. In 2021, global sales of GaN devices were valued at \$1.88 billion and are estimated to expand at a compound annual growth rate of 24.4 % from 2022 to 2030 [2]. Among the benefits offered by GaN transistors, a low on-state resistance, a high breakdown voltage, a high operational switching frequency, along with excellent thermal and radiation stability should be mentioned. Moreover, a definite advantage of GaN is the ability to form different top-quality heterostructures with other group-III nitrides using band-gap engineering. In particular, a two-dimensional electron gas with a sheet concentration of 10^{13} cm^{-2} and a carrier mobility of $2,000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ is usually created in AlGaIn/GaN heterostructures [3, 4] due to the spontaneous and piezoelectric components of electrical polarization and to the donor-like surface states acting as the source of electrons [5, 6].

One of the most appealing devices for power electronics is a high electron mobility transistor (HEMT), or a heterostructure field-effect transistor, based on group-III nitrides. It exploits the high in-plane mobility of the two-dimensional electron gas that is generated in the quantum well near the heterojunction. Although GaN HEMTs have significantly advanced in recent times [7, 8], to reveal them as reliable and economically viable devices there are still several fundamental challenges that must be resolved. One such critical problem is the self-heating effect. When a GaN HEMT operates at a high power level, ohmic heating leads to the degradation of the current-voltage characteristics and results in device reliability issues [9]. This phenomenon is observed because of the inherently poor heat dissipation capability of lateral GaN HEMTs.

In order to suppress the self-heating effect, a wide variety of approaches has been proposed to date [10–14]. Most of them, however, act at the package level and fail to remove adequately the excess heat from the active region of the transistor. Therefore, it is necessary to establish a local thermal management method that could be applied at the micrometer scale, or at the device level. Yan *et al.* have demonstrated that the heat dissipation capability of GaN HEMTs can be increased at the micrometer scale by a graphene-graphite heat-spreading element covering the drain contact [15]. Graphene has very exciting prospects for thermal management applications due to its superior in-plane thermal conductivity. Additionally, the heat conduction in graphene is noticeably anisotropic and the out-of-plane thermal conductivity is estimated to be about 0.1 W/(cm·K). This actually may be advantageous, since the heat-spreading element would remove the heat away rather than dissipate it around the hot spot. On the other hand, the extremely good electrical conductance of graphene imposes a limitation on the location of the heat-spreading element, thus requiring an extra photolithography step to pattern graphene and complicating the process flow [16, 17]. Consequently, there is a strong demand for highly thermally conducting but electrically insulating materials. It is well known that diamond falls into this category, but its high temperature and pressure synthesis process is still unacceptably expensive. One of the most promising materials that possess the required properties is BN. Recent measurements showed that the in-plane thermal conductivity of its isotopically near-natural (78 % ^{11}B , 22 % ^{10}B) hexagonal form (α -BN) equals to 4.08 W/(cm·K). For the monoisotopic ^{10}B and ^{11}B α -BN crystals, the values of 5.85 and 5.50 W/(cm·K) were obtained, respectively. By analogy with graphene, the heat conduction in hexagonal BN is anisotropic as its out-of-plane thermal conductivity does not exceed a value of 0.033 W/(cm·K) [18]. An efficient local thermal management method using a few-layer α -BN heat-spreading element covering the whole top surface of the device structure was proposed by Lin *et al.* [16].

According to the latest experimental studies, the thermal conductivity of isotopically natural (78.3 % ^{11}B , 21.7 % ^{10}B) cubic BN (β -BN) reaches 8.8 W/(cm·K), which is twice as high as the respective value in hexagonal BN. For the isotopically purified ^{10}B and ^{11}B β -BN samples, the values of 16.5 and 16.6 W/(cm·K) were attained, respectively [19]. These results suggest that, at least in terms of thermal conductivity, the cubic form has an advantage over the hexagonal one. In this paper, we show that the performance of GaN HEMTs can be substantially enhanced by the introduction of a heat-spreading element based on β -BN. The thermally conducting and electrically insulating nature of β -BN allows it to be placed close to the conducting channel and to be in direct contact with the electrodes and the heat sink, thus constituting an additional heat-escaping route.

Device Structure. The main object of the research is a normally-off GaN HEMT augmented with a heat-removing system consisting of a β -BN heat-spreading element and a pyrolytic graphite heat sink. A two-dimensional representation of the device structure is shown in Figure 1.

We specifically used AlGaN/AlN/GaN HEMTs with the layered structure that is composed of a 15-nm-thick $\text{Al}_{0.14}\text{Ga}_{0.86}\text{N}$ barrier layer, a 2-nm AlN spacer and a 1.5- μm GaN buffer layer deposited on either a sapphire or a 6H-SiC substrate. Both the barrier layer and the spacer are undoped.

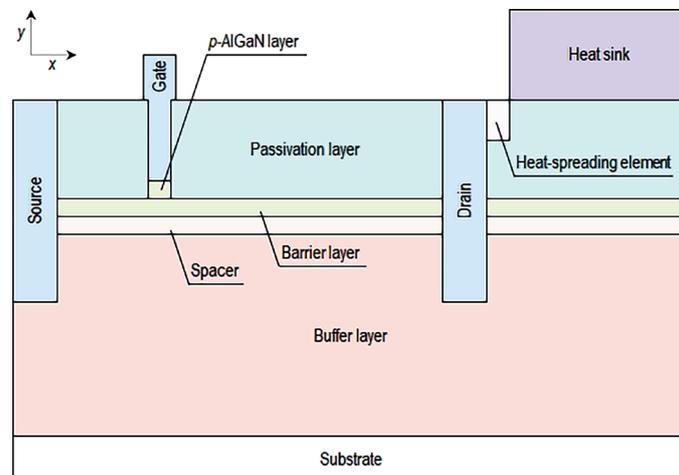


Figure 1. GaN HEMT with a BN heat-spreading element

In the buffer layer, iron-induced deep-level acceptor trap states with an associated energy of 0.7 eV below the conduction band minimum and a uniform concentration of $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ are introduced to control the drain current in the subthreshold region. Additionally, a 20-nm *p*-type $\text{Al}_{0.14}\text{Ga}_{0.86}\text{N}$ layer with an acceptor concentration of $5.3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ is formed beneath the gate to yield a normally-off device [20]. The source, drain and gate electrodes are nominally made of gold and set to be ohmic contacts. Finally, an 0.2- μm SiO_2 layer is applied for surface passivation.

The substrate thickness equals to 100 μm . The lengths of the source and drain electrodes are 1 μm , while the lengths of the lower (foot) and higher (head) parts of the T-shaped gate electrode are, respectively, 0.5 and 0.7 μm . The thickness of the gate head is 0.1 μm . The distance from the source to the gate foot is 2 μm and the distance from the gate foot to the drain is 6 μm . The thickness of the heat-spreading element equals to 80 nm. The 20- μm -thick heat sink is located at a distance of 0.5 μm from the drain. The device structure is 1 mm wide.

With the purpose of accurately simulating the temperature distribution, two thermal boundary conditions are imposed, one on the bottom of the substrate and another on the top surface of the heat sink. Both of these regions are sufficiently thick to assume that the temperature at the thermal contacts remains rigid. The thermal boundary resistance (TBR) at the interfaces between the ambient and both the substrate and the heat sink is not taken into consideration. With reference to this, the heat transfer coefficient goes to infinity.

Since the GaN HEMT is grown on a foreign substrate, the self-heating effect is aggravated by the TBR between the substrate and the GaN buffer layer. Although the TBR at the sapphire–GaN interface is negligible owing to the low thermal conductivity of the substrate, this is not the case for the SiC–GaN contact. One approach to model the TBR is to incorporate a very narrow heat isolation layer between the SiC and GaN regions. For a 10-nm-thick layer, its effective thermal conductivity should be set to a value of 0.003 W/(cm·K) [21].

Simulation details. The electrical behavior of semiconductor devices is operated by a mathematical model consisting of a coupled set of fundamental partial differential equations that bind together the electrostatic potential and the carrier concentration. The framework of this model is provided by the Poisson and the carrier continuity equations.

The Poisson equation governs the interaction between the potential and the space charge density:

$$\nabla(\epsilon\epsilon_0\nabla\varphi) = q(n - p - N_d^+ + N_a^-) - Q, \quad (1)$$

where ϵ is the relative permittivity, ϵ_0 is the electric constant, φ is the electrostatic potential, q is the elementary charge, n and p are the electron and hole concentrations, N_d^+ and N_a^- are the ionized donor and acceptor impurity concentrations, Q is the charge density induced by traps and other defects.

The continuity equations describe the way the electron and hole concentrations evolve as a result of transport, generation and recombination processes:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \bar{J}_n + G_n - R_n, \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \nabla \bar{J}_p + G_p - R_p, \quad (3)$$

where \bar{J}_n and \bar{J}_p are the electron and hole current densities, G_n and G_p are the generation rates for electrons and holes, R_n and R_p are the recombination rates for electrons and holes.

The current density equations, or charge transport models, are often derived by applying various approximations to the Boltzmann transport equation. The simplest transport model is the drift-diffusion model, which has the advantage of not introducing any independent variables in addition to the potential and the carrier concentration:

$$\bar{J}_n = qD_n\nabla n + q\mu_n n\bar{E}, \quad (4)$$

$$\bar{J}_p = qD_p\nabla p - q\mu_p p\bar{E}, \quad (5)$$

where D_n and D_p are the diffusion coefficients for electrons and holes, μ_n and μ_p are the electron and hole mobilities, \bar{E} is the electric field related to the potential through the Gauss law:

$$\bar{E} = -\nabla\varphi. \quad (6)$$

Here, it should be noted that the Einstein relationship is tacitly assumed to hold:

$$D_n = V_T \mu_n, \quad (7)$$

$$D_p = V_T \mu_p, \quad (8)$$

where V_T is the thermal voltage:

$$V_T = \frac{\kappa_B T}{q}, \quad (9)$$

where κ_B is the Boltzmann constant, T is the temperature.

The self-consistent solution of the Poisson and the carrier continuity equations must satisfy the boundary conditions specified at the electrodes. Ohmic contacts are implemented as Dirichlet boundary conditions, or first-type boundary conditions, where the potential and the carrier concentration at the surface are fixed. If space charge neutrality is assumed and Maxwell–Boltzmann statistics is applied, the surface electron and hole concentrations are calculated as follows:

$$n_o = \frac{N_d^+ - N_a^- + \sqrt{(N_d^+ - N_a^-)^2 + 4n_{\text{int}}^2}}{2}, \quad (10)$$

$$p_o = \frac{n_{\text{int}}^2}{n_o}, \quad (11)$$

where n_{int} is the intrinsic carrier concentration.

In the (Al,Ga)N system, GaN features the narrowest band gap and is therefore used as the reference material in the band alignment. In this case, the surface potential is calculated by

$$\varphi_o = V_T \ln \left(\frac{N_c(\text{GaN})n_o}{n_{\text{int}}(\text{GaN})N_c(\text{AlGa})} \right) + \frac{\chi(\text{GaN})}{q} - \frac{\chi(\text{AlGa})}{q} - \frac{\varphi_n}{q}, \quad (12)$$

where N_c is the effective density of states for electrons, χ is the electron affinity, φ_n is the electron quasi-Fermi level.

The intrinsic carrier concentration is defined by

$$n_{\text{int}} = \sqrt{N_c N_v} \exp \left(-\frac{E_g}{2qV_T} \right), \quad (13)$$

where N_v is the effective density of states for holes, E_g is the band gap.

The temperature dependence of the band gap for AlN, GaN and 6H-SiC is commonly fitted to the empirical Varshni form:

$$E_g(T) = E_g(0 \text{ K}) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T}, \quad (14)$$

where α and β are adjustable (Varshni) parameters.

The parameters used in Eq. (14) for AlN, GaN and 6H-SiC are given in Table 1.

For AlGa, the dependence of the band gap on composition fraction is described by

$$E_g(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = E_g(\text{AlN})x + E_g(\text{GaN})(1-x) - C_g x(1-x), \quad (15)$$

where x is the composition fraction, C_g is the bowing parameter, which is recommended to be set to 1.0 eV [22].

Table 1. Material-dependent parameters for the band gap model

Material	Parameter		
	$E_g(0 \text{ K})$ (eV)	α (meV/K)	β (K)
AlN [22]	6.23	1.799	1462
GaN [22]	3.507	0.909	830
6H-SiC [23]	3.023	0.65	1200

The effective densities of states for electrons and holes, respectively, are defined by

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_c^* \kappa_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (16)$$

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* \kappa_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (17)$$

where m_c^* and m_h^* are the density of states effective masses of electrons and holes, h is the Planck constant.

For electrons and holes, we employed the low- and high-field temperature-dependent mobility models specifically developed by Farahmand *et al.* for the (Al,Ga)N material system [24].

In order to simulate the avalanche breakdown characteristics, an impact ionization model was turned on. The electron-hole pair generation rate due to impact ionization is defined by

$$G = \frac{1}{q} \left(\alpha_n |\bar{J}_n| + \alpha_p |\bar{J}_p| \right), \quad (18)$$

where α_n and α_p are the ionization coefficients for electrons and holes:

$$\alpha_n = a_n \exp \left(-\frac{E_n}{|\bar{E}|} \right), \quad (19)$$

$$\alpha_p = a_p \exp \left(-\frac{E_p}{|\bar{E}|} \right), \quad (20)$$

where a_n , a_p , E_n , E_p are adjustable parameters [25].

Modeling of the self-heating effect suggests the addition of a lattice heat flow equation to the coupled system consisting of the Poisson and the carrier continuity equations. In the framework of the thermodynamically rigorous model of lattice heating developed by Wachutka, the heat flow equation, which describes the evolution of the local lattice temperature, has the following form [26]:

$$C_V \frac{\partial T_L}{\partial t} = \nabla (\kappa \nabla T_L) + H, \quad (21)$$

where C_V is the volumetric heat capacity, T_L is the lattice temperature, κ is the thermal conductivity, H is the heat source per volume unit.

Since ohmic heating is the dominant heat generation process in GaN HEMTs, the other mechanisms are usually neglected [27]. As a result, the heat source per volume unit is reduced to the form

$$H = (\bar{J}_n + \bar{J}_p) \bar{E}. \quad (22)$$

It is well known that thermal conductivity and heat capacity are strongly dependent on temperature. This fact must be taken into account, as the operating temperature is very sensitive to the thermal conductivity and heat capacity values in certain regions of the device structure. Otherwise, a significant error will occur.

The temperature dependence of thermal conductivity is often expressed by

$$\kappa(T) = \kappa(300 \text{ K}) \left(\frac{T}{300} \right)^{\alpha_\kappa}, \quad (23)$$

where α_κ is the temperature dependence coefficient.

For AlGa_xN, the dependence of the thermal conductivity on composition fraction and temperature is described by [28]

$$\kappa(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N})(T) = \left[\frac{x}{\kappa(\text{AlN})(T)} + \frac{1-x}{\kappa(\text{GaN})(T)} + C_\kappa x(1-x) \right]^{-1}, \quad (24)$$

where C_{κ} is the bowing parameter:

$$C_{\kappa} = 3.649118 \times 10^{-3} T - 0.221037. \quad (25)$$

We used Eq. (23) for all the unary and binary materials except for gold, for which the thermal conductivity is approximated by a simple linear regression [29]:

$$\kappa(\text{Au})(T) = 3.365 - 6.5 \times 10^{-4} T. \quad (26)$$

The temperature dependence of the volumetric heat capacity of AlN, GaN, 6H-SiC and SiO₂ is defined by

$$C_V(T) = \rho C_p(300 \text{ K}) + \rho C_1 \frac{\left(\frac{T}{300}\right)^{\alpha_C} - 1}{\left(\frac{T}{300}\right)^{\alpha_C} + \frac{C_1}{C_p(300 \text{ K})}}, \quad (27)$$

where ρ is the mass density, C_p is the specific heat capacity, C_1 and α_C are adjustable parameters [30].

The dependence of the volumetric heat capacity of Al₂O₃, gold, β -BN and pyrolytic graphite on temperature is calculated by

$$C_V(T) = a_C + b_C T + c_C T^2 + \frac{d_C}{T^2}, \quad (28)$$

where a_C , b_C , c_C and d_C are adjustable parameters.

When a lattice heat flow equation is solved, at least one thermal boundary condition must be specified. If a thermal contact is implemented as a Robin boundary condition, or a third-type boundary condition, the following expression holds:

$$\alpha(T_L - T_0) = -\kappa \nabla T_L, \quad (29)$$

where α is the heat transfer coefficient, T_0 is the ambient temperature, which is assumed to be 300 K.

The material-dependent parameters used in Eqs. (23) and (28) are given in Table 2.

Table 2. Parameters for the thermal conductivity and volumetric heat capacity models

Material	Parameter					
	$\kappa(300\text{K})$ (W/(cm·K))	α_{κ}	a_C (J/(cm ³ ·K))	b_C (J/(cm ³ ·K ²))	c_C (J/(cm ³ ·K ³))	d_C (J·K/cm ³)
AlN	3.893 [28]	1.277	–	–	–	–
GaN	2.583 [28]	1.031	–	–	–	–
Al ₂ O ₃	0.387 [31]	1.195	2.839 [33]	0.005	$-2.746 \cdot 10^{-6}$	79 341.95
6H-SiC	3.736 [32]	-1.49	–	–	–	–
SiO ₂	0.014 [30]	0.33	–	–	–	–
β -BN	8.368 [19]	0.972	1.398 [34]	0.009	$-4.091 \cdot 10^{-6}$	120 197.2
Graphite	19.342 [29]	1.125	-0.944 [35]	0.01	$-5.723 \cdot 10^{-6}$	2661.553
Au	–	–	2.492 [36]	$6.605 \cdot 10^{-5}$	$3.35 \cdot 10^{-7}$	5489.457

Results. The primary subject of the research is a set of the DC, breakdown, small-signal AC and transient characteristics of the GaN HEMTs without and with the heat-spreading element based on cubic BN. In order to investigate the efficiency of our local thermal management solution, we employed a comparative analysis as the main research technique.

The drain current vs. gate-source voltage (curve 1) and transconductance vs. gate-source voltages (2) characteristics of the device structures under study are presented in Figure 2. The drain-source voltage (V_{DS}) is 0.1 V. As evident from the plot, the GaN HEMT features a normally-off operation with a threshold voltage of 1.98 eV. This value was mainly attained by tuning the acceptor concentration in the p -AlGaIn layer beneath the gate. Since a low power level is considered, the input characteristics are completely identical regardless of whether a heat-removing system is present or not. The substrate material also makes no difference.

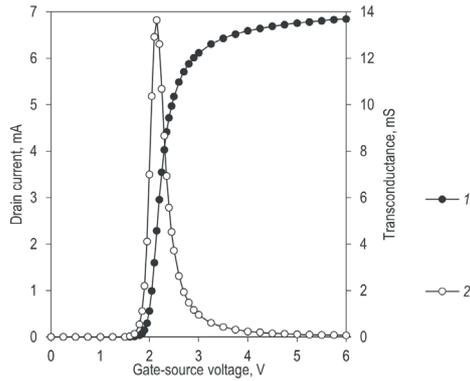


Figure 2. Input DC characteristics at $V_{DS} = 0.1$ V

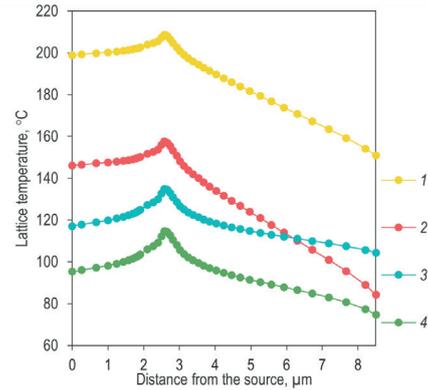


Figure 3. Lattice temperature distribution along the channel at $V_{GS} = 6$ V and $V_{DS} = 30$ V

The efficient operation of the β -BN heat-spreading element is best seen at a high power level. The distribution of the lattice temperature along the conducting channel (along the x axis) from the source to drain contacts of the GaN HEMTs without (curves 1, 3) and with (curves 2, 4) the β -BN layer is shown in Figure 3. The distribution profiles 1 and 2 correspond to sapphire substrate, while 3 and 4 are obtained on 6H-SiC substrate. The gate-source voltage (V_{GS}) is 6 V and the drain-source voltage is 30 V. After the additional heat-escaping route is introduced, the temperature falls dramatically over the whole length of the channel. For instance, at a distance of 0 μm from the source contact, the lattice temperature is decreased from a value of 198.8 to 146.1 $^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T_L = 52.8$ $^{\circ}\text{C}$) when sapphire substrate is used. In case of 6H-SiC substrate, the temperature is decreased from a value of 117.1 to 95.3 $^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T_L = 21.8$ $^{\circ}\text{C}$).

The drain current vs. drain-source voltage (curves 1–4) and maximum temperature vs. drain-source voltage (curves 5–8) characteristics of the GaN HEMTs without (curves 1, 3, 5, 7) and with (curves 2, 4, 6, 8) the β -BN heat-spreading element are presented in Figure 4. The curves 1, 2, 5 and 6 correspond to sapphire substrate, while curves 3, 4, 7 and 8 are obtained on 6H-SiC substrate. The gate-source voltage is 6 V. Owing to ohmic heating, the current-voltage characteristics show distinct negative-slope regions that indicate a degradation of the electron mobility. However, a reduction in the average temperature within the active area can lead to a partial recovery of the mobility and, consequently, to an improvement of the output power density. After the β -BN layer is formed, the drain current at a drain-source voltage of 30 V is increased by 32.5 %, from a level of 0.123 to 0.163 A, when sapphire substrate is used. The maximum temperature is simultaneously reduced from a value of 208.7 to 157.6 $^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T_L = 51.1$ $^{\circ}\text{C}$). In case of 6H-SiC substrate, the drain current is increased by 16.5 %, from a level of 0.194 to 0.226 A, and the maximum temperature is reduced from a value of 134.8 to 114.7 $^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T_L = 20.1$ $^{\circ}\text{C}$). As the thermal conductivity of 6H-SiC is much higher than that of sapphire, the relative contribution of the on-top heat-removing system to the heat dissipation will be less pronounced.

In Figure 5, the maximum temperature vs. output power density characteristics of the GaN HEMTs on sapphire substrate without (curve 1) and with (curve 3) the β -BN heat-spreading element are directly

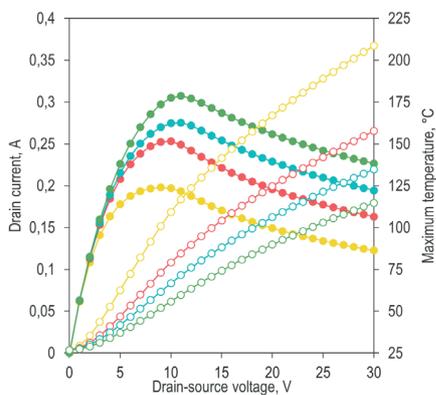


Figure 4. Output DC characteristics at $V_{GS} = 6$ V

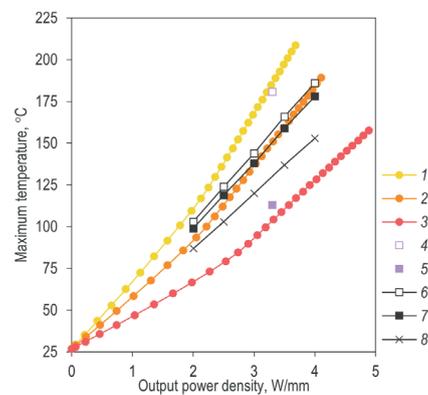


Figure 5. Maximum temperature as a function of the output power density

compared with the results published in [15, 16]. In the first paper, the heat dissipation was enhanced by a graphene-graphite quilt covering the drain contact and electrically connected with a graphite heat sink outside of the device structure. At a power density of 3.3 W/mm, the maximum temperature was decreased from a value of 181 °C (data point 4) to 113 °C (data point 5) ($\Delta T_L = 68.0$ °C). In the second paper, it was demonstrated that the local thermal management of a GaN HEMT can be substantially improved by a heat-spreading element based on few-layer hexagonal BN stretching over the whole top surface of the device structure. Curve 6 corresponds to the initial device structure. The authors considered two variants differing in the location of the β -BN heat sink that was formed either behind the drain contact (curve 7) or above the active area (curve 8). At the same power density, the maximum temperature was decreased from a value of 157.1 to 150.5 °C ($\Delta T_L = 6.6$ °C) and 130.1 °C ($\Delta T_L = 27.0$ °C), respectively. We have recently investigated the DC characteristics of a GaN HEMT with a graphene layer covering not only the drain contact but also the passivation layer [37]. The basic device structure was fully identical to the one used in the current work. The maximum temperature was reduced by 35.3°C, from a value of 185.8 to 150.6 °C, as shown by curve 2. The simulation results reveal that the β -BN heat-spreading element offers a much higher temperature reduction, to 103.4 °C ($\Delta T_L = 82.4$ °C). It can be explained by the fact that the BN layer partially substitutes the low thermal conductivity SiO_2 passivation layer separating the drain contact from the heat sink.

The heat generation and dissipation processes in GaN HEMTs operated in a pulsed mode are dependent on time, pulse period, duty cycle and other factors. The transient response of the drain current (curves 1, 2) and the maximum temperature (curves 3, 4) to a single pulse is given in Figure 6 for the GaN HEMTs on sapphire substrate without (curves 1, 3) and with (curves 2, 4) the β -BN heat-spreading element. The off- and on-states are presented by $V_{GS} = 0$ V and $V_{GS} = 6$ V, respectively. The drain-source voltage is 30 V. The pulse period and the duty cycle equal to 0.2 ms and 50 %, respectively. As seen from the chart, the device structure containing the β -BN layer is more robust with regard to the self-heating phenomenon. During the on-state time interval, the drain current degrades rapidly to a level of 0.166 A, which is only 37.2 % of an instantaneous value of 0.446 A that would have been obtained if the heat-removing system had been perfect. Simultaneously, the maximum temperature grows sharply and reaches a value of 152.4 °C. In its turn, the performance of the basic device structure is much poorer, as the drain current plummets down to a level of 0.132 A and the maximum temperature rises to a value of 194.9 °C. After being switched off, the transistors gradually cool down and ultimately reach thermal equilibrium with the ambient temperature. The recovery time is determined to be 0.566 and 0.779 ms, respectively.

Figure 7 shows the breakdown characteristics of the GaN HEMTs on sapphire substrate without (curve 1) and with (curve 2) the β -BN heat-spreading element. The gate-source voltage is 2 V. In stark contrast to the effect of graphene, the formation of the BN layer leads to an increase in the breakdown voltage, from a value of 821 to 1178 V.

The current gain vs. frequency (curves 1–4) and unilateral power gain vs. frequency (curves 5–8) characteristics of the GaN HEMTs without (curves 1, 3, 5, 7) and with (curves 2, 4, 6, 8) the β -BN heat-spreading element are presented in Figure 8. The gate-source voltage is 6 V and the drain-source voltage is 30 V. In case of sapphire substrate, the cut-off frequency and the maximum oscillation fre-

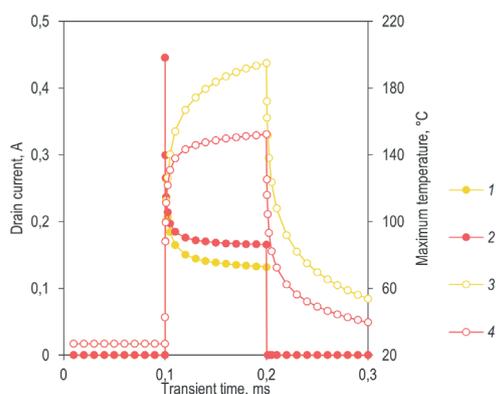


Figure 6. Transient response of the drain current and the maximum temperature to a single pulse

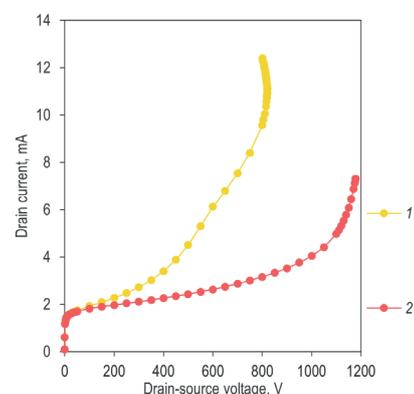


Figure 7. Breakdown characteristics at $V_{GS} = 2$ V

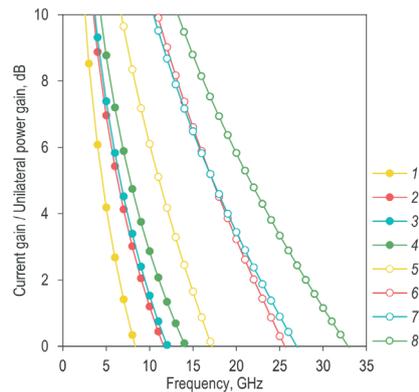


Figure 8. Small-signal AC characteristics at $V_{GS} = 6$ V and $V_{DS} = 30$ V

quency are raised by 1.38 times, from a value of 8.4 to 11.6 GHz, and 1.49 times, from a value of 17.2 to 25.6 GHz, respectively. When 6H-SiC substrate is used, the cut-off frequency and the maximum oscillation frequency are enhanced by 1.17 times, from a value of 12.1 to 14.2 GHz, and 1.22 times, from a value of 26.9 to 32.9 GHz, respectively. Nevertheless, these small-signal AC performance quantities are fairly modest in comparison with those provided by the graphene heat-spreading element [37].

Conclusions. In this work, an efficient local thermal management solution using a heat-spreading element based on cubic BN was presented. The thermally conducting and electrically insulating nature of BN allows it to be deposited close to the conducting channel and to be in direct contact with the electrodes and the heat sink, thus constituting an additional heat-escaping route. The numerical simulations of a GaN HEMT with the β -BN heat-spreading element partially substituting the low thermal conductivity SiO_2 passivation layer revealed the improvement in the DC, transient, breakdown and small-signal AC characteristics. In case of sapphire substrate, the maximum temperature in the device structure operating at a power density of 3.3 W/mm was reduced by 82.4 °C.

References

1. Wang Y., Ding Y., Yin Y. Reliability of wide band gap power electronic semiconductor and packaging: A review. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 18, art. ID 6670. <https://doi.org/10.3390/en15186670>
2. *Grand View Research*. Available at: <https://www.grandviewresearch.com> (accessed 28 October 2022).
3. Gaska R., Yang J. W., Osinsky A., Chen Q., Asif Khan M., Orlov A. O., Snider G. L., Shur M. S. Electron transport in AlGaIn-GaN heterostructures grown on 6H-SiC substrates. *Applied Physics Letters*, 1998, vol. 72, no. 6, pp. 707–709. <https://doi.org/10.1063/1.120852>
4. Gaska R., Shur M. S., Bykhovski A. D., Orlov A. O., Snider G. L. Electron mobility in modulation-doped AlGaIn-GaN heterostructures. *Applied Physics Letters*, 1999, vol. 74, no. 2, pp. 287–289. <https://doi.org/10.1063/1.123001>
5. Smorchkova I. P., Elsass C. R., Ibbetson J. P., Vetry R., Heying B., Fini P., Haus E., DenBaars S. P., Speck J. S., Mishra U. K. Polarization-induced charge and electron mobility in AlGaIn/GaN heterostructures grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy. *Journal of Applied Physics*, 1999, vol. 86, no. 8, pp. 4520–4526. <https://doi.org/10.1063/1.371396>
6. Ibbetson J. P., Fini P. T., Ness K. D., DenBaars S. P., Speck J. S., Mishra U. K. Polarization effects, surface states, and the source of electrons in AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistors. *Applied Physics Letters*, 2000, vol. 77, no. 2, pp. 250–252. <https://doi.org/10.1063/1.126940>
7. Tang Y., Shinohara K., Regan D., Corrión A., Brown D., Wong J., Schmitz A., Fung H., Kim S., Micovic M. Ultra-high-speed GaN high-electron-mobility transistors with f_T/f_{max} of 454/444 GHz. *IEEE Electron Device Letters*, 2015, vol. 36, no. 6, pp. 549–551. <https://doi.org/10.1109/LED.2015.2421311>
8. Chu J., Wang Q., Jiang L., Feng C., Li W., Liu H., Xiao H., Wang X. Room temperature 2DEG mobility above 2350 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ in AlGaIn/GaN HEMT grown on GaN substrate. *Journal of Electronic Materials*, 2021, vol. 50, no. 5, pp. 2630–2636. <https://doi.org/10.1007/s11664-021-08778-y>
9. Trew R. J., Green D. S., Shealy J. B. AlGaIn/GaN HFET reliability. *IEEE Microwave Magazine*, 2009, vol. 10, no. 4, pp. 116–127. <https://doi.org/10.1109/MMM.2009.932286>
10. Alomari M., Dussaigne A., Martin D., Grandjean N., Gaquiere C., Kohn E. AlGaIn/GaN HEMT on (111) single crystalline diamond. *Electronics Letters*, 2010, vol. 46, no. 4, pp. 299–301. <http://dx.doi.org/10.1049/el.2010.2937>
11. Hiroki M., K. Kumakura K., Yamamoto H. Substrate-transfer technique using h-BN for GaN-based high-power transistors. *NTT Technical Review*, 2016, vol. 14, no. 8, pp. 1–6.
12. Feghhi R., Joodaki M. Thermal analysis of microwave GaN-HEMTs in conventional and flip-chip assemblies. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2018, vol. 28, no. 8, art. ID e21513. <https://doi.org/10.1002/mmce.21513>

13. Pavlidis G., Kim S. H., Abid I., Zegaoui M., Medjdoub F., Graham S. The effects of AlN and copper back side deposition on the performance of etched back GaN/Si HEMTs. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, vol. 40, no. 7, pp. 1060–1063. <https://doi.org/10.1109/LED.2019.2915984>
14. Fujitsu. Available at: <https://www.fujitsu.com> (accessed 19 January 2023).
15. Yan Z., Liu G., Khan J. M., Balandin A. A. Graphene quilts for thermal management of high-power GaN transistors. *Nature Communications*, 2012, vol. 3, no. 1, art. ID 827. <https://doi.org/10.1038/ncomms1828>
16. Lin Z., Liu C., Chai Y. High thermally conductive and electrically insulating 2D boron nitride nanosheet for efficient heat dissipation of high-power transistors. *2D Materials*, 2016, vol. 3, no. 4, art. ID 041009. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/3/4/041009>
17. Cai Q., Scullion D., Gan W., Falin A., Zhang S., Watanabe K., Taniguchi T., Chen Y., Santos E. J. G., Li L. H. High thermal conductivity of high-quality monolayer boron nitride and its thermal expansion. *Science Advances*, 2019, vol. 5, no. 6, art. ID eaav0129. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav0129>
18. Yuan C., Li J., Lindsay L., Cherns D., Pomeroy J. W., Liu S., Edgar J. H., Kuball M. Modulating the thermal conductivity in hexagonal boron nitride via controlled boron isotope concentration. *Communications Physics*, 2019, vol. 2, no. 1, art. ID 43. <https://doi.org/10.1038/s42005-019-0145-5>
19. Chen K., Song B., Ravichandran N. K., Zheng Q., Chen X., Lee H., Sun H., Li S., Gamage G. A., Tian F., Ding Z., Song Q., Rai A., Wu H., Koirala P., Schmidt A. J., Watanabe K., Lv B., Ren Z., Shi L., Cahill D. G., Taniguchi T., Brodov D., Chen G. Ultrahigh thermal conductivity in isotope-enriched cubic boron nitride. *Science*, 2020, vol. 367, no. 6477, pp. 555–559. <https://doi.org/10.1126/science.aaz6149>
20. Uemoto Y., Hikita M., Ueno H., Matsuo H., Ishida H., Yanagihara M., Ueda T., Tanaka T., Ueda D. Gate injection transistor (GIT)—A normally-off AlGaIn/GaN power transistor using conductivity modulation. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2007, vol. 54, no. 12, pp. 3393–3399. <https://doi.org/10.1109/TED.2007.908601>
21. Sarua A., Ji H., Hilton K. P., Wallis D. J., Uren M. J., Martin T., Kuball M. Thermal boundary resistance between GaN and substrate in AlGaIn/GaN electronic devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2007, vol. 54, no. 12, pp. 3152–3158. <https://doi.org/10.1109/TED.2007.908874>
22. Vurgaftman I., Meyer J. R., Ram-Mohan L. R. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys. *Journal of Applied Physics*, 2001, vol. 89, no. 11, pp. 5815–5875. <https://doi.org/10.1063/1.1368156>
23. Choyke W. J. Optical properties of polytypes of SiC: Interband absorption, and luminescence of nitrogen-exciton complexes. *Materials Research Bulletin*, 1969, vol. 4, pp. S 141–S 152. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-006768-1.50018-8>
24. Farahmand M., Garetto C., Bellotti E., Brennan K. F., Goano M., Ghillino E., Ghione G., Albrecht J. D., Ruden P. P. Monte Carlo simulation of electron transport in the III-nitride wurtzite phase materials system: Binaries and ternaries. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, vol. 48, no. 3, pp. 535–542. <https://doi.org/10.1109/16.906448>
25. Kunihiro K., Kasahara K., Takahashi Y., Ohno Y. Experimental evaluation of impact ionization coefficients in GaN. *IEEE Electron Device Letters*, 1999, vol. 20, no. 12, pp. 608–610. <https://doi.org/10.1109/55.806100>
26. Wachutka G. K. Rigorous thermodynamic treatment of heat generation and conduction in semiconductor device modeling. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 1990, vol. 9, no. 11, pp. 1141–1149. <https://doi.org/10.1109/43.62751>
27. Pomeroy J. W., Uren M. J., Lambert B., Kuball M. Operating channel temperature in GaN HEMTs: DC versus RF accelerated life testing. *Microelectronics Reliability*, 2015, vol. 55, no. 12, pp. 2505–2510. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2015.09.025>
28. Volcheck V., Hvezdouski D., Baranova M., Stempitsky V. Temperature dependence of the thermal conductivity of wurtzite aluminum nitride, gallium nitride and aluminum-gallium nitride. *Nano-Desing, Tehnology, Computer Simulations: Book of abstracts of XIX International Workshop, Minsk, 28–29 Oct. 2021*. Minsk, BSUIR, 2021, pp. 33–35.
29. Ho C. Y., Powell R. W., Liley P. E. Thermal conductivity of the elements. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1972, vol. 1, no. 2, pp. 279–421. <https://doi.org/10.1063/1.3253100>
30. Palankovski V., Quay R. *Analysis and Simulation of Heterostructure Devices*. Vienna, Springer, 2004. 289 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0560-3>
31. Dongre B., Carrete J., Mingo N., Madsen G. K. H. Ab initio lattice thermal conductivity of bulk and thin-film α -Al₂O₃. *MRS Communications*, 2018, vol. 8, no. 3, pp. 1119–1123. <https://doi.org/10.1557/mrc.2018.161>
32. Burgemeister E. A., von Muench W., Pettenpaul E. Thermal conductivity and electrical properties of 6H silicon carbide. *Journal of Applied Physics*, 1979, vol. 50, no. 9, pp. 5790–5794. <https://doi.org/10.1063/1.326720>
33. Ditmars D. A., Ishihara S., Chang S. S., Bernstein G., West E. D. Enthalpy and heat-capacity standard reference material: Synthetic sapphire (α -Al₂O₃) from 10 to 2250 K. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1982, vol. 87, no. 2, pp. 159–163. <https://doi.org/10.6028/jres.087.012>
34. Prelas M. A., Gielisse P., Popovici G., Spitsyn B. V., Stacy T. (eds). *Wide Band Gap Electronic Materials*. Dordrecht, Springer, 1995. 531 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-0173-8>
35. Butland A. T. D., Maddison R. J. The specific heat of graphite: An evaluation of measurement. *Journal of Nuclear Materials*, 1973, vol. 49, no. 1, pp. 45–56. [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(73\)90060-3](https://doi.org/10.1016/0022-3115(73)90060-3)
36. Takahashi Y., Akiyama H. Heat capacity of gold from 80 to 1000 K. *Thermochimica Acta*, 1986, vol. 109, no. 1, pp. 105–109. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(86\)85012-2](https://doi.org/10.1016/0040-6031(86)85012-2)
37. Dao D. H., Volcheck V., Stempitsky V., Tran T. T. DC, AC and breakdown simulation of the gallium nitride high electron mobility transistor with a few-layer graphene heat-removal system. *Advanced Technologies for Communications. Proc. 2022 Intern. conf., Hanoi, 20–22 Oct. 2022*. Hanoi, 2022, pp. 121–125. <https://doi.org/10.1109/ATC55345.2022.9943047>

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-167-176>
УДК 623.746.4-519 +533.6.013.622



Оригинальная статья

А. С. Солонар¹, С. В. Цуприк¹, П. А. Хмарский^{2*}

¹Военная академия Республики Беларусь,
пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь
²Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ФОРМИРОВАНИЯ ОПОРНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ БОРТОВОЙ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СОПРОВОЖДЕНИЯ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

Аннотация. Для повышения эффективности бортовой корреляционно-экстремальной системы сопровождения при наличии изоморфных преобразований текущего изображения объекта (изменения уровня яркости, масштаба, сдвига и поворота изображения), а также помех естественного и искусственного происхождения в процессе наблюдения предлагается новый способ адаптивного формирования опорного изображения. Он заключается в применении многогипотезного измерителя с межобзорной памятью гипотез, в состав которого входят фильтры Калмана 0-го и 1-го порядка и фильтр Сингера 0-го порядка. Проводится сравнение предлагаемого способа адаптации с известными способами покadroвой смены и «экспоненциального сглаживания». Для проведения сопоставительного моделирования разработан комплекс математического моделирования, в котором использован имитатор входного воздействия на базе кроссплатформенной среды Unity3D, учитывающий кинематику движения наземных объектов и полета беспилотного летательного аппарата в нормальной системе координат. Эффективность сопровождения наземных объектов каждым из способов оценивалась по величине усредненного коэффициента проводки. Полученные результаты исследований могут быть использованы при разработке разведывательных БЛА, функционирующих в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: корреляционно-экстремальная система, опорное изображение, полумарковская модель яркости, фильтр Калмана, многогипотезный измеритель с межобзорной памятью гипотез, беспилотный летательный аппарат (БЛА)

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Ф23М-103).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Солонар Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизации, радиолокации и приемо-передающих устройств, Военная академия Республики Беларусь. E-mail: andssnew@yandex.ru; Цуприк Сергей Викторович – старший инженер учебной лаборатории кафедры автоматизации, радиолокации и приемо-передающих устройств, Военная академия Республики Беларусь. E-mail: Serhio.Observer@yandex.ru; Хмарский Петр Александрович* – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0003-3404-3917>. E-mail: pierre2009@mail.ru

Вклад авторов: Солонар Андрей Сергеевич – обоснование концепции исследования, формулирование идеи, исследовательских целей и задач, разработка методологии и модели исследования; Цуприк Сергей Викторович – сбор и систематизация данных, компьютерное и математическое моделирование, проведение сравнительного анализа, написание текста рукописи; Хмарский Петр Александрович – обобщение и интерпретация результатов исследования, редактирование текста рукописи, работа с графическими материалами.

Для цитирования: Солонар, А. С. Влияние способа формирования опорного изображения на эффективность бортовой корреляционно-экстремальной системы сопровождения наземных объектов / А. С. Солонар, С. В. Цуприк, П. А. Хмарский // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 2. – С. 167–176. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-167-176>

Поступила в редакцию: 15.05.2023

Утверждена к печати: 25.05.2023

*Original article*Andrei S. Solonar¹, Sergei V. Tsuprik¹, Petr. A. Khmarskiy^{2*}¹Military Academy of the Republic of Belarus, 220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus²Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus**INFLUENCE OF THE REFERENCE IMAGE FORMATION METHOD ON THE EFFICIENCY OF THE ONBOARD CORRELATION-EXTREME TRACKING SYSTEM FOR TRACKING GROUND OBJECTS**

Abstract. To improve the efficiency of the onboard correlation-extremal tracking system in the presence of isomorphic transformations of the current object image (changes in the brightness level, scale, shift and rotation of the image), as well as natural and artificial noise during the observation process, a new method of adaptive formation of the reference image is proposed. It consists in using an Interactive Multiple Model (IMM), which includes Kalman filters of the 0th and 1st order and a Singer filter of the 0th order. The proposed method of adaptation is compared with the known methods of frame-by-frame change and “exponential smoothing”. To carry out comparative modeling of a mathematical modeling complex, in which an input action simulator based on the Unity3D cross-platform environment was used, taking into account the kinematics of the movement of ground objects and the flight of an unmanned aerial vehicle in a natural coordinate system. The effectiveness of the evaluation of the tracking of ground objects of each of the evaluations was estimated by the value of the average coefficient of tracking. The obtained research results can be used in the development of reconnaissance UAVs operating in real time.

Keywords: correlation-extremal tracking system, reference image, semi-Markov model of brightness, Kalman filter, Interactive Multiple Model, unmanned aerial vehicle (UAV)

Acknowledgements. Research was carried out with the support of a grant from the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (project No. F23M-103).

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

Information about the authors: *Andrei S. Solonar* – Cand. Sci. (Engineering), Professor of the Department of Automation, Radar and Transceiver Devices, Military Academy of the Republic of Belarus. E-mail: andssnew@yandex.ru; *Sergey V. Tsuprik* – Senior Engineer of the Department of Automation, Radar and Transceiver Devices, Military Academy of the Republic of Belarus. E-mail: Serhio.Observer@yandex.ru; *Petr A. Khmarskiy** – Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher Scientist, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0003-3404-3917>. E-mail: pierre2009@mail.ru

Contribution of the authors: *Andrei S. Solonar* – substantiation of the research concept, formulation of ideas, research goals and objectives, development of methodology and research model; *Sergey V. Tsuprik* – collection and systematization of data, computer and mathematical modeling, comparative analysis, writing the text of the manuscript; *Petr A. Khmarskiy* – generalization and interpretation of the results of the study, editing the text of the manuscript, working with graphic material.

For citation: Solonar A. S., Tsuprik S., Khmarskiy P. A. Influence of the reference image formation method on the efficiency of the onboard correlation-extreme tracking system for tracking ground objects. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 2, pp. 167–176. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-167-176>

Received: 15.05.2023

Approved for printing: 25.05.2023

Введение. Развитие современных методов обработки изображений [1–6] получило широкое применение при создании высокоточных систем наведения беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Особый интерес представляют бортовые корреляционно-экстремальные системы (КЭС) сопровождения, которые обеспечивают решение задач однократного внутрикадрового обнаружения, поиска, распознавания, а также последовательного межкадрового автоматического сопровождения неподвижных и движущихся наземных объектов на фоне поверхности земли [7–10]. Принцип работы КЭС заключается в поиске максимума взаимной корреляционной функции (КФ) двух изображений – наблюдаемого объекта и опорного. Как правило, опорное изображение формируется оператором в момент выдачи целеуказания либо известно заранее. Однако наличие изоморфных преобразований текущего изображения объекта (изменения уровня яркости, масштаба, сдвига и поворота изображения относительно ориентации БЛА) и помех естественного и искусственного происхождения требует адаптивного формирования опорного изображения в процессе наблюдения [11].

Существует несколько способов адаптации опорного изображения [12]. Простейшим из них является покадровая смена. Между тем непосредственное использование изображения объекта неэффективно и приводит к быстрому накоплению ошибок измерения координат и искажению опорного изображения. Данная проблема подробно описана в [12], а в качестве решения предлагается применить для каждого пикселя процедуру «экспоненциального сглаживания».

Но данная процедура при наблюдении высокоманевренных объектов недостаточно эффективна, что также может приводить к срыву сопровождения. Поэтому для адаптивного формирования опорного изображения предложен новый способ, заключающийся в применении многогипотезного измерителя с межобзорной памятью гипотез (МИМППГ) [13–16], в состав которого входят фильтры Калмана 0-го и 1-го порядка и фильтр Сингера 0-го порядка. Статистический синтез МИМППГ проведен на основе полумарковской модели яркости, описанной в [17, 18].

Для оценки влияния способа адаптации опорного изображения на эффективность сопровождения КЭС требуется провести сопоставительное моделирование. Сравнить их эффективность и оценить качество сопровождения наземных объектов на фоне поверхности земли.

Таким образом, *цель исследования* – оценка эффективности КЭС сопровождения в зависимости от способа адаптации опорного изображения. Для этого необходимо провести сравнительный анализ точности определения координат для различных способов адаптации опорного изображения методами математического моделирования и полунатурных испытаний.

Комплекс математического моделирования. Степень влияние способа адаптации опорного изображения на эффективность КЭС оценивалась при помощи специального комплекса математического моделирования. Он включает в себя три основных элемента: имитатор входного воздействия, КЭС и блок пересчета координат. Структурная схема комплекса моделирования приведена на рис. 1. Имитатор входного воздействия представляет собой отдельный программный модуль, разработанный на базе кроссплатформенной среды Unity3D. Эта визуальная среда проектирования позволяет относительно просто и с высокой степенью адекватности формировать трехмерные сцены и их анимацию [19].

Имитатор включает в себя четыре основных блока. Модель окружающей среды задает условия наблюдения, уровень освещения и погодные условия, вид ландшафта, природное окружение и другие элементы. Имитация движения наземных объектов в сцене по заданной траектории осуществляется моделью наземного объекта, а полет БЛА – моделью летательного аппарата.

Модель камеры в сцене представляет собой отдельный элемент и определяет область в трехмерном пространстве, которая отображается в кадре. Перемещение камеры в пространстве определяется положением и ориентацией БЛА. В результате с блока формирования изображения последовательно во времени поступают синтезированные кадры $\mathbf{f}_{k+1}^{(c)}$, которые подаются на вход устройства корреляционно-экстремальной обработки в качестве входного воздействия.

Одновременно с изображением $\mathbf{f}_{k+1}^{(c)}$ подается опорное изображение. На начальном этапе опорное изображение $\Theta_{опk=0}^{(c)}$ формируется в момент выдачи целеуказания для сопровождения объекта. Далее рассчитывается взаимная корреляционная матрица $\mathbf{F}_{(k+1)i^*j^*}^{(c)}$ входного изображения $\mathbf{f}_{k+1}^{(c)}$ и опорного $\Theta_{опk+0}^{(c)}$, устанавливающая меру их близости. Номера элементов i^*j^* матрицы $\mathbf{F}_{(k+1)i^*j^*}^{(c)}$, в которых достигается глобальный максимум, определяют координаты объекта на изображении $\mathbf{f}_{k+1}^{(c)}$. Поиск глобального максимума $(i^*j^*) = \arg \max \left\{ \mathbf{F}_{(k+1)i^*j^*}^{(c)} \right\}$ осуществляется в блоке вычисле-

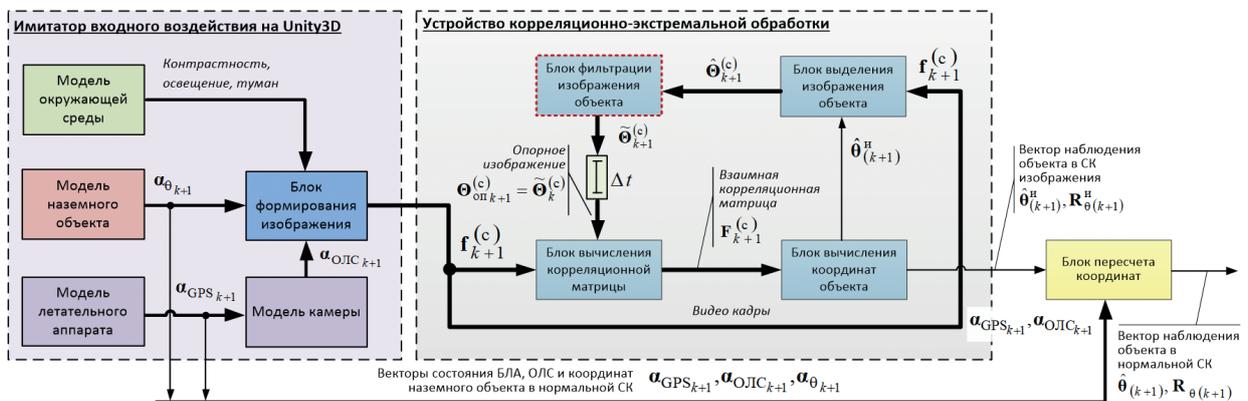


Рис. 1. Структурная схема комплекса моделирования на базе кроссплатформенного графического движка Unity3D

Fig. 1. Structural diagram of the modeling complex based on the Unity3D cross-platform graphics engine

ния координат объекта и выдается на выход в виде оценки вектора наблюдения $\hat{\theta}_{(k+1)}^n$ и корреляционной матрицы ошибок разового оценивания $\mathbf{R}_{\theta_{(k+1)}}^n$.

В состав вектора наблюдения $\hat{\theta}_{(k+1)}^n$ входят экранные координаты наблюдаемого объекта и его линейные размеры. По этим данным на входном изображении $\mathbf{f}_{k+1}^{(c)}$ выделяется область, принадлежащая изображению объекта $\hat{\Theta}_{(k+1)}^{(c)}$. Далее изображение объекта поступает на вход блока фильтрации, где формируется фильтрованное изображение $\hat{\Theta}_{(k+1)}^{(c)}$. В итоге полученное изображение объекта $\hat{\Theta}_{(k+1)}^{(c)}$ проходит через линию задержки на величину интервала обновления кадров Δt и используется в качестве опорного изображения на следующий кадр. В результате вектор наблюдения экранных координат $\hat{\theta}_{(k+1)}^n$ и ошибки РО $\mathbf{R}_{\theta_{(k+1)}}^n$ пересчитываются в прямоугольную систему в соответствии с разработанной в [20] методикой. Для выполнения данной операции на вход блока пересчета координат с имитатора входного воздействия дополнительно поступают истинные значения вектора состояния ориентации оптико-локационной системы (ОЛС) $\alpha_{\text{ОЛС}k+1}$, БЛА $\alpha_{\text{инс.}k+1}$ (углы ориентации и скорости их изменений в связанной СК) и $\alpha_{\text{GPS } k+1}$ (прямоугольные координаты и скорости их изменений в нормальной СК) в момент времени t_{k+1} .

Результаты математического моделирования. Для проведения математического моделирования сформированы типовые входные воздействия при помощи имитатора на Unity3D. В качестве типовых воздействий представлены синтезированные видеозаписи, на которых изображены различные автомобили, движущиеся на фоне дорожного покрытия. Входные воздействия отличаются между собой вариантами движения автомобиля: по прямой, повороты, разворот на 180° и круговое движение. По каждому из типовых сценариев проверялась эффективность сопровождения при помощи обобщенного системного показателя, определяемого экспериментально, – коэффициента проводки K_{Π} и его среднего значения \bar{K}_{Π} [22]:

$$K_{\Pi} = \frac{t_{\Sigma\theta}}{t_{\Sigma}} = \frac{N_{\Sigma\theta}}{N_{\Sigma}}, \quad \bar{K}_{\Pi} = \frac{1}{N_{\text{эксп}}} \sum_{k=1}^{N_{\text{эксп}}} K_{\Pi}(k), \quad (1)$$

где $t_{\Sigma\theta}$ – суммарное фактическое время сопровождения наземного объекта; t_{Σ} – общее время наблюдения наземного объекта; $N_{\Sigma\theta}$ – суммарное число кадров сопровождения наземного объекта; N_{Σ} – суммарное число кадров, в которых наблюдался наземный объект; $N_{\text{эксп}}$ – общее число модельных экспериментов.

На рис. 2 представлены результаты моделирования для первого типового воздействия.

Фон имеет сложную структуру, поскольку включает в себя различные элементы, такие как дорогу, растительность, деревья (см. рис. 2, *a*). Длительность входного воздействия составляет 1000 кадров. Размер строка изображения объекта – 32×32 пикселя. Моделирование осуществляется на всем интервале наблюдения. При моделировании проводилось $N_{\text{эксп}} = 10000$ модельных экспериментов для каждого типового сценария, что с запасом удовлетворяет доверительной вероятности 0,95. На рис. 2, *b* изображена истинная траектория движения автомобиля в нормальной прямоугольной системе координат x (север), y (высота), z (восток), а также результаты оценивания координат для трех способов адаптации опорного изображения. В отсутствие динамики при движении автомобиля все способы адаптации показывают хороший результат. Так, на рис. 2, *c* приведены расчеты среднего значения коэффициента проводки \bar{K}_{Π} . При покадровой смене опорного изображения среднее значение коэффициента проводки составило $\bar{K}_{\Pi} = 0,72$ ввиду медленного накопления ошибок измерения координат за счет влияния флуктуационных ошибок яркости наблюдаемого изображения. Для экспоненциального сглаживания коэффициент проводки составил $\bar{K}_{\Pi} = 0,83$, а для ИММ-измерителя $\bar{K}_{\Pi} = 0,98$.

Результаты моделирования для второго типового воздействия представлены на рис. 3, на котором изображен легковой автомобиль, осуществляющий движение по прямой с поворотами. В данном случае оценивалась устойчивость сопровождения при совершении маневра в виде поворота на 90° .

Как видно из рис. 3, *b*, при покадровой смене опорного изображения срыв сопровождения наступает на первом же повороте автомобиля, что свидетельствует о низкой эффективности данного способа при наличии маневра. При экспоненциальном сглаживании, по сравнению с покадровой сменой, время устойчивого сопровождения значительно возрастает, но с увеличением времени наблюдения вероятность срыва остается достаточно высокой. Применение

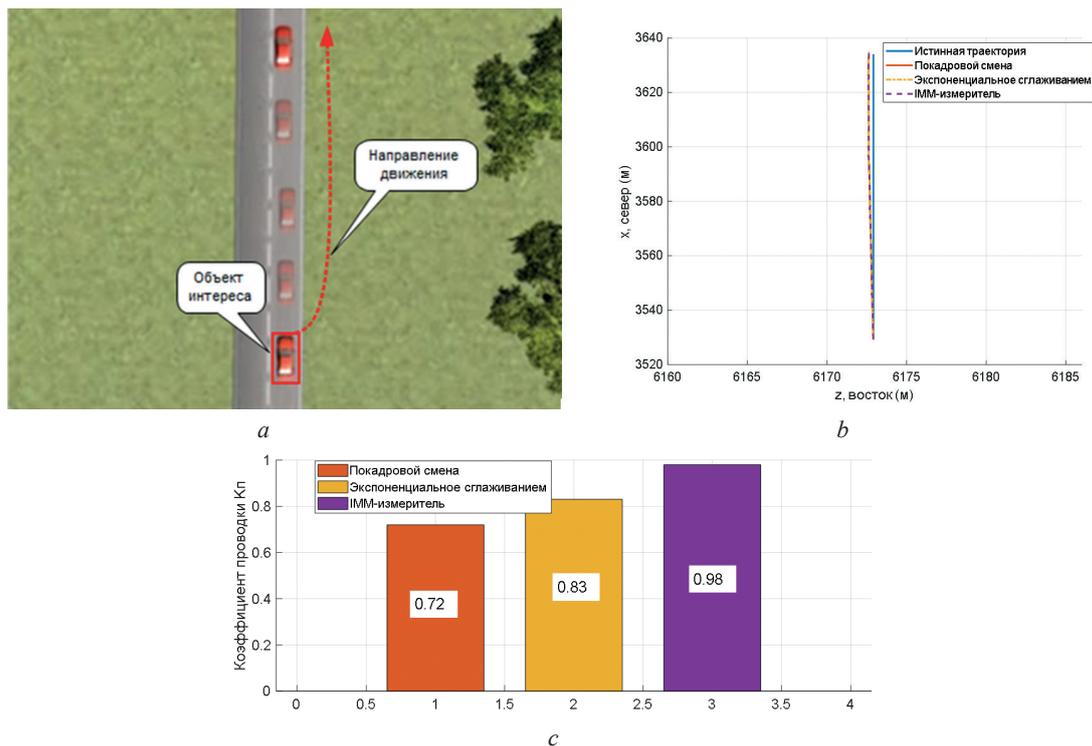


Рис. 2. Результаты математического моделирования для прямолинейного движения наземного объекта: *a* – условия наблюдения; *b* – результаты сопровождения наземного объекта; *c* – диаграмма средних значений коэффициента проводки

Fig. 2. Results of mathematical modeling for rectilinear motion of a ground object: *a* – observation conditions; *b* – ground object tracking results; *c* – average tracking ratio chart

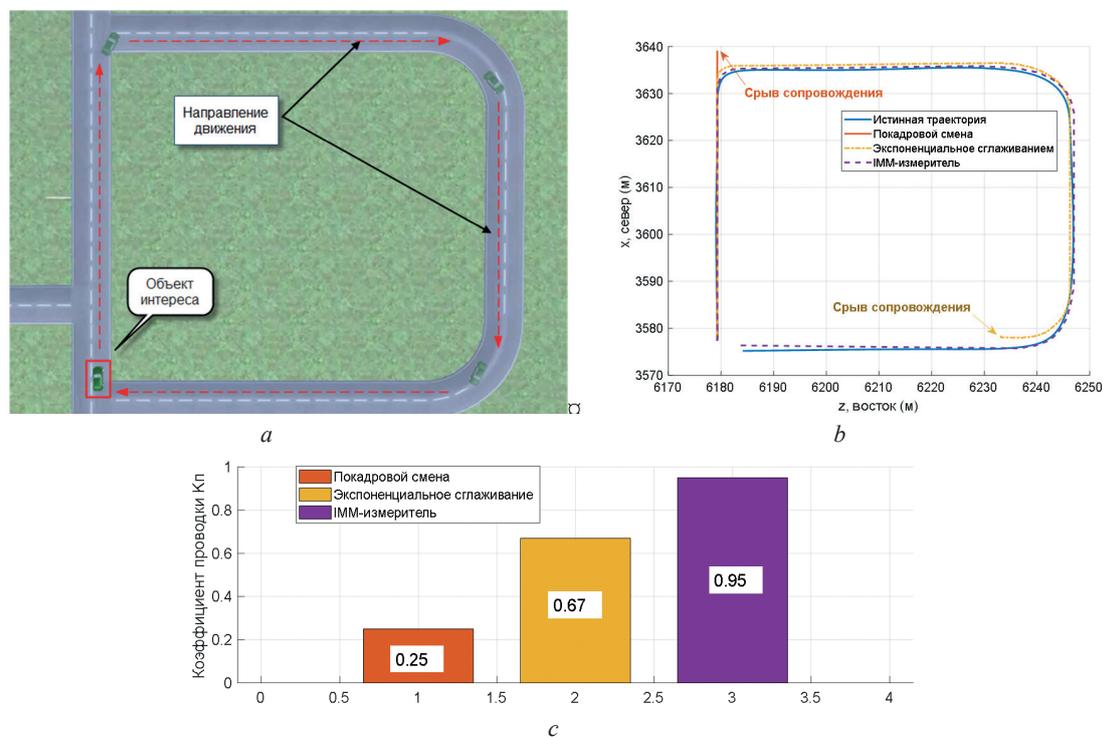


Рис. 3. Результаты математического моделирования для прямолинейного движения наземного объекта с поворотами: *a* – условия наблюдения; *b* – результаты сопровождения наземного объекта; *c* – диаграмма средних значений коэффициента проводки

Fig. 3. Results of mathematical modeling for rectilinear motion of a ground object with turns: *a* – observation conditions; *b* – ground object tracking results; *c* – average tracking ratio chart

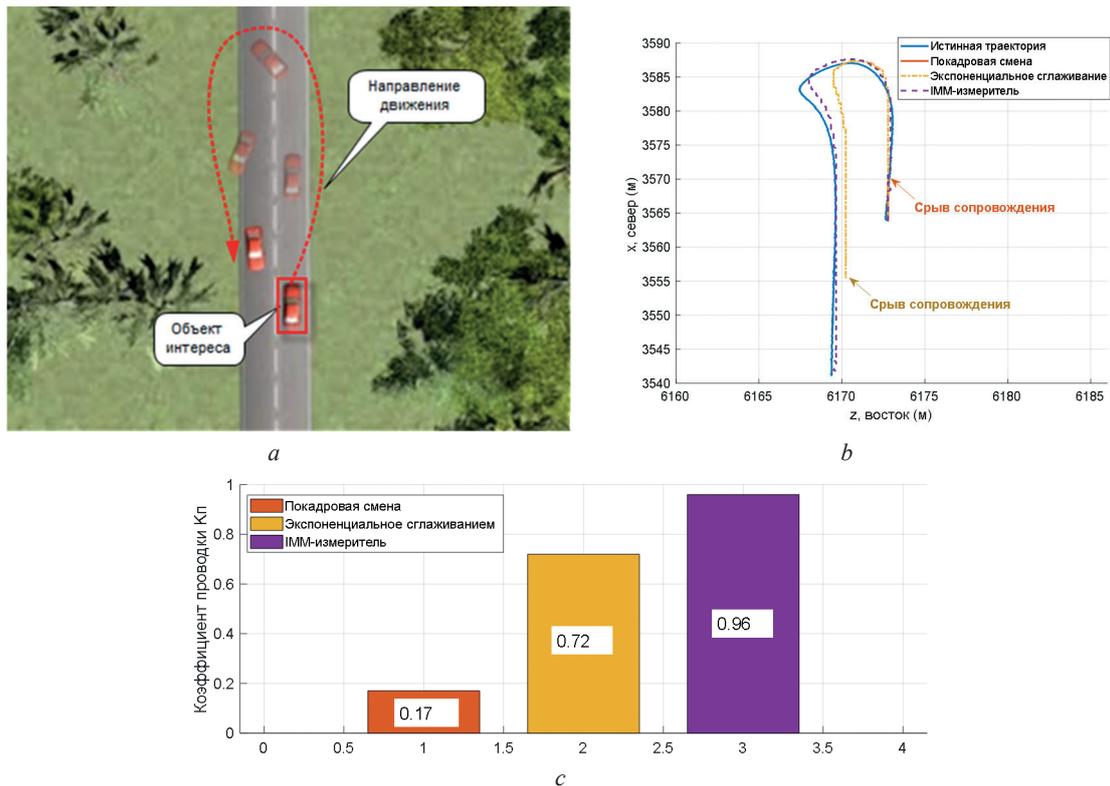


Рис. 4. Результаты математического моделирования для движения наземного объекта с разворотом на 180° : a – условия наблюдения; b – результаты сопровождения наземного объекта; c – диаграмма средних значений коэффициента проводки

Fig. 4. The results of mathematical modeling for the movement of a ground object with a turn of 180° : a – observation conditions; b – ground object tracking results; c – average tracking ratio chart

ИММ-измерителя позволило устойчиво сопровождать объект для данного типового воздействия на всем интервале наблюдения. Так, на рис. 3, c приведены расчеты среднего значения коэффициента проводки \bar{K}_n . При покадровой смене опорного изображения среднее значение коэффициента проводки составило $\bar{K}_n = 0,25$ по причине медленного накопления ошибок измерения координат за счет влияния флуктуационных ошибок яркости наблюдаемого изображения. Для экспоненциального сглаживания коэффициент проводки составил $\bar{K}_n = 0,67$, а для ИММ-измерителя $\bar{K}_n = 0,95$.

На рис. 4 представлены результаты моделирования для третьего типового воздействия, где изображен легковой автомобиль, который совершает разворот на 180° . Оценивается устойчивость сопровождения при совершении маневра в виде резкого разворота. Из рис. 4, b видно, что в случае полного разворота, как и для поворота на 90° , способ покадровой смены опорного изображения демонстрирует наихудший результат. Срыв произошел на ранних этапах маневра, а среднее значение коэффициента проводки составило $\bar{K}_n = 0,17$ (см. рис. 4, c).

Анализ проведенного математического моделирования показал, что лучший результат сопровождения по сравнению с покадровой сменой демонстрирует алгоритм корреляционно-экстремальной обработки при адаптации опорного изображения способом экспоненциального сглаживания. Полученная в результате траектория движения объекта близка к истинной. Однако после совершения маневра также наблюдается срыв сопровождения, а значение среднего коэффициента проводки равно $\bar{K}_n = 0,72$ (см. рис. 4, c). Наилучший результат показывает способ адаптации с применением ИММ-измерителя. Результаты РО координат близки к истинным значениям на всем интервале наблюдения, а величина среднего коэффициента проводки составила $\bar{K}_n = 0,96$ (см. рис. 4, c).

Таким образом, способ адаптации опорного изображения, основанный на применении МИМППГ, позволяет добиться значений коэффициента проводки $0,94$ – $0,98$, что в $1,36$ – $5,64$ раза больше, чем для способа покадровой смены, и в $1,18$ – $1,42$ раза больше, чем для способа экспоненциального сглаживания.

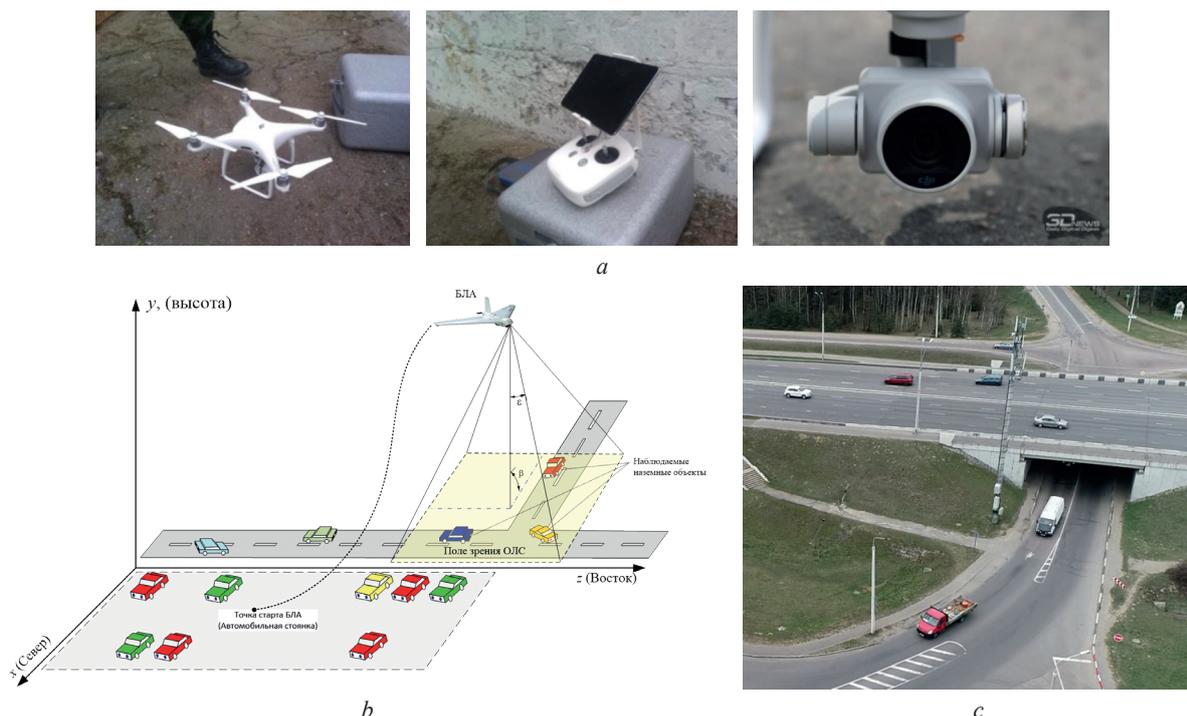


Рис. 5. Условия проведения полунатурных испытаний: *a* – внешний вид использованной для формирования видеозаписей аппаратуры; *b* – обобщенная схема; *c* – условия наблюдения

Fig. 5. Conditions for conducting semi-natural tests: *a* – appearance of the equipment used for the formation of video recordings; *b* – generalized scheme; *c* – observation conditions

Результаты полунатурных испытаний. В качестве аппаратуры для формирования видеозаписей использовался БЛА DJI Phantom 4, внешний вид и органы управления которого представлены на рис. 5, *a*.

Видеозаписи наземной фоно-целевой обстановки формировались по результатам съемки с Phantom 4 на различных участках движения. В кадре наблюдались легковые и грузовые автомобили, движущиеся на фоне дорожного покрытия. Ориентация оптической оси камеры Phantom 4 изменялась в процессе наблюдения при смене участка обзора. Средняя продолжительность нахождения каждого отдельно взятого объекта в среднем составляла 3–8 с.

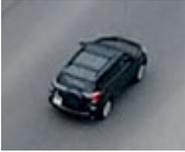
Испытания проводились по схеме, приведенной на рис. 5, *b*, в следующей последовательности:

1. Старт БЛА. Подъем на фиксированную высоту (до 50 м).
2. Съемка участка местности для различных положений камеры и ориентации БЛА в течение 2–8 мин. Средняя продолжительность БЛА в воздухе – 20 мин.
3. Возврат БЛА в точку старта. Замена АКБ и повторный старт.

Всего БЛА поднимался в воздух 3 раза. В результате были получены видеозаписи наземной фоно-целевой обстановки средней продолжительностью 2–8 мин. Одновременно с формированием видео записывались данные координат и ориентации БЛА, а также положение и углы пространственной ориентации камеры в процессе полета. Полученная телеметрия использовалась для пересчета экранных координат наблюдаемых объектов в прямоугольную. Обработка полученных записей осуществлялась в лабораторных условиях. Всего обработано более 200 записей для различных наземных объектов. Результаты обработки некоторых из них представлены в таблице.

Результаты полунатурных испытаний показали, что использование МИМППГ для адаптации опорного изображения к изменяющейся яркости изображения объекта позволяет повысить коэффициент проводки до 0,91–0,98, что в 1,32–3,72 раза больше, чем для способа покадровой смены, и в 1,14–1,47 раза больше, чем для способа экспоненциального сглаживания. Полученные значения коэффициента проводки согласуются с результатами математического моделирования.

Результаты обработки полунатурных испытаний
Processing results of semi-natural tests

Описание сценария		Коэффициент проводки K_n		
		Покадровая смена	Экспоненциальное сглаживание	Многогипотезный измеритель
Объект интереса – <i>грейдер</i> . Двигается прямо с поворотом на 90°. Число кадров – 450		$\frac{0,26}{3,5}^*$	$\frac{0,62}{1,47}$	0,91
Объект интереса – <i>грузовик</i> . Двигается прямо, слева на право (в кадре) не маневрирует. Число кадров – 300		$\frac{0,74}{1,32}$	$\frac{0,86}{1,14}$	0,98
Объект интереса – <i>черный легковой автомобиль</i> . Двигается прямо. Меняется ракурс наблюдения и масштаб. Число кадров – 650		$\frac{0,31}{2,97}$	$\frac{0,68}{1,35}$	0,92
Объект интереса – <i>белый легковой автомобиль</i> . Двигается прямо по дороге. Меняется ракурс наблюдения и масштаб. Число кадров – 300		$\frac{0,34}{2,82}$	$\frac{0,71}{1,35}$	0,96
Объект интереса – <i>грузовик</i> . Двигается прямо с поворотом на перекрестке. Число кадров – 500		$\frac{0,37}{2,47}$	$\frac{0,73}{1,26}$	0,92
Объект интереса – <i>красный автомобиль</i> . Двигается прямо. Меняется ракурс наблюдения и масштаб. Число кадров – 650		$\frac{0,25}{3,72}$	$\frac{0,75}{1,24}$	0,93

*Здесь и далее в таблице в числителе приводится значение коэффициента проводки для данного способа адаптации, в знаменателе – величина выигрыша относительно многогипотезного измерителя.

Заключение. Представлены основные результаты сравнения нового способа адаптации опорного изображения, основанного на применении многогипотезного измерителя яркости. Сравнение осуществлялось с наиболее известными и используемыми способами покадровой смены и экспоненциального сглаживания. Для сравнения был разработан комплекс моделирования, в состав которого входит имитатор входного воздействия, на базе кроссплатформенной среды Unity3D, учитывающей кинематику движения наземных объектов и полета БЛА.

В результате математического моделирования установлено, что способ адаптации опорного изображения, основанный на применении МИМППГ, позволяет добиться значений коэффициента проводки 0,94–0,98, что в 1,36–5,64 раза больше, чем для способа покадровой смены, и в 1,18–1,42 раза больше, чем для способа экспоненциального сглаживания.

Полученные результаты математического моделирования подтверждены полунатурными испытаниями, проведенными с использованием квадрокоптера DJI Phantom 4. Это позволило проверить адекватность разработанной математической модели и подтвердить необходимость практического использования для адаптации опорного изображения к изменяющейся яркости изображения объекта нового способа, основанного на применении МИМППГ.

Результаты полунатурных испытаний показали, что использование МИМППГ для адаптации опорного изображения к изменяющейся яркости изображения объекта позволяет повысить коэффициент проводки до 0,91–0,98, что в 1,32–3,72 раза больше, чем для способа покадровой смены, и в 1,14–1,47 раза больше, чем для способа экспоненциального сглаживания.

Результаты исследований могут быть использованы научно-техническими организациями и предприятиями при разработке устройств обработки информации бортовых оптико-локационных систем для повышения точности выдаваемых координат неподвижных и движущихся одиночных и групповых наземных объектов на фоне поверхности земли. Полученные технические решения будут полезны в сферах, где применяются беспилотные летательные аппараты: рекогносцировка местности, мониторинг окружающей среды, точное земледелие, обеспечение безопасности охраняемых объектов, патрулирование границ, контроль дорожного движения, оказание помощи при чрезвычайных ситуациях и пр.

Список использованных источников

1. Али, Б. Алгоритмы навигации БПЛА с использованием систем технического зрения / Б. Али, Р. Н. Садеков, В. В. Цодокова // *Гироскопия и навигация*. – 2022. – Т. 30, № 4. – С. 87–105.
2. Артемьев, В. М. Обработка изображений в пассивных обзорно-поисковых оптико-электронных системах / В. М. Артемьев, А. О. Наумов, Л. Л. Кохан ; Нац. Акад. наук Беларуси, Ин-т приклад. физики. – Минск: Беларус. навука, 2014. – 116 с.
3. Артемьев, В. М. Обнаружение точечных объектов на изображениях в условиях неопределенности / В. М. Артемьев, А. О. Наумов, Л. Л. Кохан // *Информатика*. – 2010. – № 2. – С. 15–24.
4. Артемьев, В. М. Обнаружение объектов конечных размеров на изображениях в условиях неопределенности / В. М. Артемьев, А. О. Наумов, Л. Л. Кохан // *Информатика*. – 2010. – № 4. – С. 5–15.
5. Артемьев, В. М. Нелинейная фильтрация случайных последовательностей расширенным методом наименьших квадратов / В. М. Артемьев, А. О. Наумов, Л. Л. Кохан // *Информатика*. – 2018. – Т. 15, № 1. – С. 60–69.
6. Mueller, K. Combination of Wide Baseline Image Matching and Tracking for Autonomous UAV Approaches to a Window / K. Mueller, J. Atman, G. F. Trommer // *Gyroscopy Navig.* – 2019. – № 10. – P. 206–215. <https://doi.org/10.1134/S2075108719040138>.
7. Баклицкий, В. К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения / В. К. Баклицкий. – Тверь: Книж. клуб, 2009. – 360 с.
8. Автоматическое обнаружение и сопровождение динамических объектов на изображениях, формируемых оптико-электронными приборами в условиях априорной неопределенности. Методы и алгоритмы / О. Б. Гузенко [и др.]. – М.: Радиотехника, 2015. – 280 с.
9. Федосеев, В. И. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов / В. И. Федосеев, М. П. Колосов. – М.: Логос, 2007. – 248 с.
10. Оптико-локационный координатор системы самонаведения беспилотного летательного аппарата / А. С. Солонар [и др.] // *Докл. БГУИР*. – 2018. – № 3. – С. 19–25.
11. Красильщиков, М. Н. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / М. Н. Красильщиков, Г. Г. Серебряков. – М.: Физматлит, 2003. – 280 с.
12. Системы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление / Б. А. Алпатов [и др.]. – М.: Радиотехника, 2008. – 176 с.
13. Bar-Shalom, Y. Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory, Algorithms, and Software / Y. Bar-Shalom, X. R. Li, T. Kirubarajan. – New York: Wiley, 2001. – 558 p. <https://doi.org/10.1002/0471221279>
14. Optical Aircraft Positioning for Monitoring of the Integrated Navigation System during Landing Approach / P. Hecker [et al.] // *Gyroscopy Navig.* – 2019. – Iss. 10. – P. 216–230. <https://doi.org/10.1134/S2075108719040084>
15. Li, X. R. Survey of maneuvering target tracing. Part I: Dynamic models / X. R. Li, V. P. Jilkov // *IEEE Trans. Aerospace Electronic Syst.* – 2003. – Vol. 39, № 4. – P. 1333–1364. <https://doi.org/10.1109/TAES.2003.1261132>
16. Solonar A. S. Main problems of trajectory processing and approaches to their solution within the framework of multitarget tracking / A. S. Solonar, P.A. Khmarski // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2021. – Vol. 1864. – Art. ID 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012004>
17. Цуприк, С. В. Методика исследования статистических свойств яркости пикселей изображений оптико-локационной системы беспилотного летательного аппарата / С. В. Цуприк, А. С. Солонар // *Информационные радиосистемы и радиотехнологии: материалы Респ. науч.-техн. конф., Минск, 29–30 нояб. 2022 г.* – Минск: БГУИР, 2022. – С. 193–197.
18. Полумарковская модель изменения яркости изображения наземного объекта, формируемого оптико-локационной системой / А. С. Солонар [и др.] // *Вест. Воен. акад. Респ. Беларусь*. – 2023. – № 1. – С. 97–107.
19. Features of trajectory measurement coordinates and parameters of movement of ground objects in on-board optical-location systems / A. S. Solonar [et al.] // *25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, 28–30 May 2018. – St. Petersburg, 2018. – P. 1–5. <https://doi.org/10.23919/ICINS.2018.8405853>
20. Методика расчета ошибок разового оценивания местоположения наблюдаемых объектов в бортовых оптико-локационных системах / А. С. Солонар [и др.] // *Докл. БГУИР*. – 2014. – № 7 (85). – С. 71–77.

21. Solonar, A. S. General construction principles and performance features of trajectory processing by data from one radar data source / A. S. Solonar, P.A. Khmarski // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2021. – Vol. 1864. – Art. ID 012138. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012138>

References

1. Ali B., Sadekov R. N., Tsodokova, V. V. A Review of Navigation Algorithms for Unmanned Aerial Vehicles Based on Computer Vision Systems. *Gyroscopy and Navigation*, 2022, vol. 30, no. 4, pp. 241–252. <https://doi.org/10.1134/S2075108722040022>
2. Artemiev V. M., Naumov A. O., Kohan L. L. *Image Processing in Passive Survey and Search Optoelectronic Systems*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2014. 116 p. (in Russian).
3. Artemiev V. M., Naumov A. O., Kohan L. L. Point objects detection in the case of uncertainty. *Informatika = Informatics*, 2010, no. 2, pp. 15–24 (in Russian).
4. Artemiev V. M., Naumov A. O., Kohan L. L. Limited-size object detection on images under condition of uncertainty. *Informatika = Informatics*, 2010, no. 4, pp. 5–15 (in Russian).
5. Artemiev V. M., Naumov A. O., Kohan L. L. nonlinear Filtering of a Random Sequences with Extended Least-Square Method. *Informatika = Informatics*, 2018, vol. 15, no. 1, pp. 60–69 (in Russian).
6. Mueller K., Atman, J., Trommer, G. F. Combination of Wide Baseline Image Matching and Tracking for Autonomous UAV Approaches to a Window. *Gyroscopy and Navigation*, 2019, no. 10, pp. 206–215. <https://doi.org/10.1134/S2075108719040138>
7. Baklickij V. K. *Correlation-Extreme Methods of Navigation and Guidance*. Tver', Knizhnyi klub Publ., 2009. 360 p. (in Russian).
8. Guzenko O. B., Katulev A. N., Khramichev A. A., Yagol'nikov S. V. *Automatic Detection and Tracking of Dynamic Objects in Images Generated by Optoelectronic Devices under Conditions of a Priori Uncertainty. Methods and Algorithms*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2015. 280 p. (in Russian).
9. Fedoseev V. I., Kolosov M. P. *Optoelectronic Devices for Orientation and Navigation of Spacecraft*. Moscow, Logos Publ., 2007. 248 p. (in Russian).
10. Solonar A. S., Khmarski P. A., Mihalkovki A. A., Tsuprik S. V., Ivanuk V. S. Optical-location coordinator of the unmanned aerial vehicle homing system. *Doklady BGUIR*, 2018, no. 3, pp. 19–25 (in Russian).
11. Krasil'shchikov M. N., Serebryakov G. G. *Control and Guidance of Unmanned Maneuverable Aircraft Based on Modern Information Technologies*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 280 p. (in Russian).
12. Alpatov B. A., Babayan P., Balashov O. E., Stepashkin A. I. *Automatic Object Detection and Tracking Systems. Image Processing and Management*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2008. 176 p. (in Russian).
13. Bar-Shalom Y., Li X. R., Kirubarajan T. *Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory, Algorithms, and Software*. New York, Wiley, 2001. 558 p. <https://doi.org/10.1002/0471221279>
14. Hecker P., Angermann M., Bestmann U., Dekiert A., Wolkow S. Optical Aircraft Positioning for Monitoring of the Integrated Navigation System during Landing Approach. *Gyroscopy and Navigation*, 2019, iss. 10, pp. 216–230. <https://doi.org/10.1134/S2075108719040084>
15. Li X. R., Jilkov V. P. Survey of maneuvering target tracing. Part I: Dynamic models. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, vol. 39, no. 4, pp. 1333–1364. <https://doi.org/10.1109/TAES.2003.1261132>
16. Solonar A. S., Khmarski P. A. Main problems of trajectory processing and approaches to their solution within the framework of multitarget tracking. *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*, 2021, vol. 1864, art. ID 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012004>
17. Cuprik S. V., Solonar A. S. Methodology for the study of statistical properties of pixel brightness of images of the optical-location system of an unmanned aerial vehicle. *Informatsionnye radiosistemy i radiotekhnologii: Materialy Respublikanskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Minsk, 29–30 noyabrya 2022 g.* [Information Radio Systems and Radio Technologies: Materials of the Republican Scientific and Technical Conference, Minsk, November 29–30, 2022]. Minsk, BSUIR, 2022, pp. 193–197 (in Russian).
18. Solonar A. S., Khmarski P. A., Mihalkovkii A. A., Tsuprik S. V. Semi-Markov model of changing the brightness of the image of a ground object formed by an optical-location system. *Vestnik Voennoi akademii Respubliki Belarus'* [Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus], 2023, no. 1, pp. 97–107 (in Russian).
19. Solonar A. S., Khmarskiy P. A., Mihalkovskiy A. A., Tsuprik S. V. Features of trajector measurement coordinates and parameters of movement of ground objects in on-board optical-location systems. *25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), 28–30 May 2018*. St. Petersburg, 2018, pp. 1–5. <https://doi.org/10.23919/ICINS.2018.8405853>
20. Solonar A. S., Khmarski P. A., Mihalkovkii A. A., Tsuprik S. V. Methodology for calculating of the different estimation errors of observed objects location in the airborne optical-location systems. *Doklady BGUIR*, 2014, no. 7 (85), pp. 71–77 (in Russian).
21. Solonar A. S., Khmarski P. A. General construction principles and performance features of trajectory processing by data from one radar data source. *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*, 2021, vol. 1864, art. ID 012138, 10 p. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012138>