

ВЕСЦІ

НАЦЫЯНАЛЬнай

АКАДЭМІі НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. 2018. Т. 63, № 2

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ

АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. 2018. Т. 63, № 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)

Главный редактор

Петр Александрович Витязь –

Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Редакционная коллегия

- А. П. Ласковнёв** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь (*заместитель главного редактора*)
- И. А. Старостина** (*ведущий редактор журнала*)
- А. В. Белый** – Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
- В. Г. Залесский** – Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
- А. Ф. Ильюшенко** – Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии, Минск, Беларусь
- С. М. Костромицкий** – Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

- Л. Г. Красневский** – Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
- А. П. Крень** – Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
- Е. И. Марукович** – Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси, Могилев, Беларусь
- Н. К. Мышкин** – Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь
- О. Г. Пенязьков** – Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
- Ю. М. Плескачевский** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
- В. М. Федосюк** – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь
- М. Л. Хейфец** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
- С. А. Чижик** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Р е д а к ц и о н н ы й с о в е т

- С. Воденичаров** – Институт металловедения, оборудования и технологий «Академик Ангел Балевский» с Центром по гидро- и аэродинамике Болгарской академии наук, София, Болгария
- Ю. Гавлик** – Институт технологии машиностроения и автоматизации производства Краковской политехники (Технологический университет), Краков, Польша
- Г. Жинтялис** – Литовская академия наук, Вильнюс, Литва
- Б. Каталинич** – Дунайско-Адриатическая Ассоциация по автоматизации и производству (DAAAM), Венский технический университет, Вена, Австрия
- В. В. Клубович** – Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси, Витебск, Беларусь
- А. А. Михалевич** – Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
- А. Г. Наумовец** – Национальная академия наук Украины, Киев, Украина
- К. А. Солнцев** – Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова, Москва, Россия
- Л. Танович** – Белградский университет, Белград, Сербия
- Б. М. Хрусталёв** – Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Адрес редакции:

*ул. Академическая, 1, к. 119, 220072, г. Минск, Республика Беларусь.
Тел.: + 375 17 284-19-19; e-mail: ftvesti@mail.ru
vestift.belnauka.by*

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ.

Серия физико-технических наук. 2018. Т. 63, № 2.

Выходит на русском, белорусском и английском языках

Редактор *И. А. Старостина*

Компьютерная вёрстка *Л. И. Кудерко*

Подписано в печать 20.06.2018. Выход в свет 28.06.2018. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная.

Печать цифровая. Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 16,4. Тираж 72 экз. Заказ 123.

Цена номера: индивидуальная подписка – 10,47 руб., ведомственная подписка – 25,45 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, 220141, г. Минск, Республика Беларусь

© РУП «Издательский дом «Беларуская навука».

Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук, 2018

PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

PHYSICAL-TECHNICAL SERIES, 2018, vol. 63, 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

Pyotr A. Vityaz – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

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

Aleksandr P. Laskovnev – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
(Associate Editor-in-Chief)

Irina A. Starostsina (lead editor)

Aleksei V. Byeli – Physical-Engineering Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Vitaliy G. Zalesky – Physical-Engineering Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Aleksandr F. Ilyuschenko – State Scientific and Production Amalgamation of Powder Metallurgy, Minsk, Belarus

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

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

Aleksandr P. Kren – Institute of Applied Physics of National Academy of Science of Belarus, Minsk, Belarus

Evgenii I. Marukovich – Institute of Technology of Metals of the National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus

Nikolai K. Myshkin – V. A. Bielyi Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus

Oleg G. Penyazkov – A. V. Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Yury M. Pleskachevsky – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Valeri M. Fedosyuk – Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Mikhail L. Kheifets – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Sergey A. Chizhik – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

E d i t o r i a l C o u n c i l

Stephan Vodenicharov – Institute of Metal Science, Equipment and Technologies “Acad. A. Balevski” with Hydro- and Aerodynamics Centre of Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria
Jozef Gawlik – Institute for Manufacturing Engineering and Automation of Cracow University of Technology, Poland
Gintautas Žintelis – Lithuanian Academy of Sciences, Vilnius, Lithuania
Branko Katalinic – DAAAM International Vienna, TU Wien, Wien, Austria
Vladimir V. Klubovich – Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus, Vitebsk, Belarus
Aleksandr A. Mikhalevich – Institute of Power of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Anton G. Naumovets – National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine
Konstantsin A. Solntsev – A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Lyubodrag Tanovich – University of Belgrade, Belgrade, Serbia
Boris M. Khrustal'ov – Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Address of the Editorial Office:

*1, Akademicheskaya Str., room 119, 220072, Minsk, Republic of Belarus.
Tel.: + 375 17 284-19-19; e-mail: ftvesti@mail.ru
vestift.belnauka.by*

PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS.

Physical-technical series. 2018, vol. 63, no. 2.

Printed in Russian, Belarusian and English languages

Editor *I. A. Starostina*

Computer imposition *L. I. Kudzerka*

It was sent of the press 20.06.2018. Appearance 28.06.2018. Format 60×84¹/₈. Offset paper.
Digital press. Printed pages 14,88. Publisher's signatures 16,4. Circulation 72 copies. Order 123.
Number price: individual subscription – 10,47 BYN, departmental subscription – 25,45 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, 220141, Republic of Belarus.

© RUE “Publishing House “Belaruskaya Navuka”.
Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Федосюк В. М. Магнитные наноматериалы и наноструктуры. Перспективы развития	135
Ильющенко А. Ф. Исследование характеристик специальных порошков и материалов, полученных методом селективного лазерного сплавления	150
Руденская Н. А., Руденская М. В. Влияние импульсного деления оксидных сфероидов в плазменном потоке на структуру покрытий.....	161
Залесский В. Г., Поболь И. Л., Бакиновский А. А., Губко А. Д. Получение металлических изделий с применением электронно-лучевых аддитивных технологий.....	169

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

Берестов Е. И., Кулабухов А. В. Нагружение грунта траками гусеничных машин: обзор расчетных схем ..	181
Прушак В. Я., Черноус Д. А., Волчек О. М. Влияние динамической нагруженности на долговечность зубчатой передачи трансмиссии тяжелонагруженных проходческих машин	192

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

Кот В. А. Интегральный метод решения задач теплопроводности с граничным условием второго рода. 1. Основные положения	201
Ассад М. С., Пенязьков О. Г., Тарасенко И. Н. Рабочий процесс двигателя внутреннего сгорания на смеси бензина с воздухом, обогащенной водородом.....	214
Маханёк А. А., Левин М. Л. Влияние общей газовой криотерапии на тепловое состояние человека	220
Менжинский А. Б., Малашин А. Н. Методика структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора возвратно-поступательного типа для энергоустановок робототехнических комплексов на базе свободнопоршневого двигателя.....	229

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Оджаев В. Б., Панфиленко А. К., Петлицкий А. Н., Просолович В. С., Шведов С. В., Филипеня В. А., Явид В. Ю., Янковский Ю. Н. Исследование влияния технологических примесей на вольт-амперные характеристики биполярного $n-p-n$ -транзистора.....	244
Янушкевич В. Ф., Иванова К. И., Иванов М. М. Моделирование взаимодействия электромагнитных волн с анизотропными средами над углеводородными залежами в режиме видеоимпульсных сигналов.....	250

CONTENTS

MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY

Fedosyuk V. M. Magnetic nanomaterials and nanostructures. Trends of development	135
Ilyshchanka A. Ph. Investigation of characteristics of special powders and materials produced by means of selective laser melting	150
Rudenskaya N. A., Rudenskaya M. V. Influence of pulsed division of oxide spheroids in a plasma flow upon the structure of coatings	161
Zaleski V. G., Pobol I. L., Bakinouski A. A., Gubko A. D. Metal parts manufacturing by electron beam additive technologies	169

MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS

Berestov E. I., Kulabukhov A. V. Ground loading by tracks of track machines: review of design schemes	181
Prushak V. Ya., Chernous D. A., Volchek O. M. Influence of dynamic load on gear transmission durability of heavy-duty roadheading machines	192

POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

Kot V. A. Integral method of solving heat-conduction problems with the second-kind boundary condition. 1. Basic statements	201
Assad M. S., Penyazkov O. G., Tarasenko I. N. Working process of internal combustion engine running on enriched hydrogen gasoline-air mixture	214
Makhaniok A. A., Levin M. L. The effect of whole body gas cryotherapy on the human thermal state	220
Menzhinski A. B., Malashin A. N. Methods of structural and parametric synthesis of combined generator of reciprocating power plants for robotic systems on the basis of a free piston engine	229

RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKING

Odzhaev V. B., Panfilenko A. K., Pyatlitski A. N., Prosolovich V. S., Shvedau S. V., Filipenya V. A., Yavid V. Yu., Yankovsky Yu. N. Investigation of influence of technological impurities on the I-V characteristics of the bipolar <i>n-p-n</i> -transistor	244
Yanyshkevich V. F., Ivanova K. I., Ivanov M. M. Simulation of interaction of electromagnetic waves with anisotropic media under hydrocarbon deposits in the mode of video-pulse signals	250

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

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ
MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY

УДК 537.622:538.216.2
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-135-149>

Поступила в редакцию 20.10.2017
Received 20.10.2017

В. М. Федосюк

*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,
Минск, Беларусь*

**МАГНИТНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОСТРУКТУРЫ.
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**

Аннотация. Анализируется создание и развитие магнитных наноматериалов и наноструктур, пленок со столбчатым типом кристаллической структуры, многослойных пленочных структур, нанокompозитов, гранулированных сплавов и нанопроволок. Рассматриваются методика получения и структура, магнитные и магнеторезистивные свойства трех типов нанопроволок – многослойных, гранулированных и спин-клапанного типа. Показано, что многослойные пленочные покрытия с очень тонкими (< 1 нм) чередующимися магнитными и немагнитными слоями ведут себя, как пленки гранулированных сплавов. Об этом свидетельствует их типичная треугольная зависимость электросопротивления от магнитного поля. Подчеркивается, что пленки гранулированных сплавов Cu–Co впервые получены в Научно-практическом центре Национальной академии наук Беларуси по материаловедению методом электролитического осаждения без последующего отжига, как это имеет место быть при других методах их получения. Свежеприготовленные пленки гранулированных сплавов Cu–Co являются суперпарамагнетиками. То есть проявляют ферромагнитное поведение ниже температуры блокирования, которая в свою очередь зависит от размера кластеров кобальта в диамагнитной матрице меди. Подобные свойства проявляют и впервые полученные нами гранулированные нанопроволоки. Особое внимание уделяется анализу методики получения и описанию свойств многослойных нанопроволок спин-клапанного типа. Прогнозируются тенденции развития материаловедения, которые позволят создавать новые материалы с высоким уровнем качества и заданными свойствами, что в перспективе позволит расширить область экспорта таких материалов и изделий из них.

Ключевые слова: магнетизм, аморфные и нанокристаллические сплавы, пленки со столбчатым типом кристаллической структуры, многослойные пленки, гранулированные сплавы, нанопроволоки и нанотрубки, магнетомягкие нанокompозиты

Для цитирования. Федосюк, В. М. Магнитные наноматериалы и наноструктуры. Перспективы развития / В. М. Федосюк // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2018. – Т. 63, № 2. – С. 135–149. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-135-149>

V. M. Fedosyuk

Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

MAGNETIC NANOMATERIALS AND NANOSTRUCTURES. TRENDS OF DEVELOPMENT

Abstract. There are analyzed creation and development of magnetic nanomaterials and nanostructures, films with a columnar type of crystal structure, multilayer film structures, nanocomposites, granular alloys and nanowires. The methods of obtaining, structure, magnetic and magnetoresistive properties of three types of nanowires – multilayered and granular ones and the ones of spin-valve type are discussed. It is shown that multilayer film coatings with very thin (< 1 nm) alternating magnetic and nonmagnetic layers behave like films of granular alloys. It is emphasized that the films of granular Cu–Co alloys were first obtained at the Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus by the method of electrolytic deposition without subsequent annealing, as is the case with other methods for their preparation. As prepared Cu–Co films are superparamagnetics. That is, they demonstrate ferromagnetic below blocking temperature, which is dependent on the size of cobalt clusters in diamagnetic matrix of copper. The granulated nanowires, firstly

obtained by us, exhibit similar behavior. Special attention is paid to the analysis of obtaining and properties of multilayered films of the spin-valve type. The trends in the development of materials science are predicted, which will allow creating new materials with a high level of quality and specified properties, what will allow expanding the area of export of such materials and products from them in the future.

Keywords: magnetism, amorphous and nanocrystalline alloys, films with crystal structure of columnar type, multilayer films, granular alloys, nanowires and nanotubes, soft magnetic nanocomposites

For citation. Fedosyuk V. M. Magnetic nanomaterials and nanostructures. Trends of development. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 2, pp. 135–149 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-135-149>

Введение. Разрабатываемые и исследуемые в настоящее время магнитные наноматериалы и наноструктуры можно ориентировочно разделить на шесть больших групп (в порядке их исторического появления и исследования): пленки со столбчатым типом кристаллической структуры, аморфные и нанокристаллические, многослойные структуры, гранулированные или так называемые пленки неоднородных сплавов, квазиоднородные сплавы и спиновые стекла и, наконец, нанопроволоки. Следует отметить, что четкой границы между этими типами наноразмерных материалов нет. Так, многослойные структуры с очень тонкими чередующимися слоями ведут себя подобно гранулированным покрытиям; нанопроволоки могут быть получены как однородные, так и многослойные и гранулированные и т. д. Поэтому исследование каждого отдельного класса наноразмерного материала, а также взаимного перехода между ними позволяет получить дополнительную информацию как об отдельных свойствах данного класса материалов, так и об общих свойствах, присущих одновременно двум или нескольким типам магнитных наноматериалов.

Все приведенные выше типы наноразмерных материалов могут быть получены посредством электролитического осаждения, а некоторые из них, например нанопроволоки, – исключительно электрохимически. Такие преимущества метода электролитического осаждения, как низкая себестоимость, высокая производительность и легкость автоматизации процесса, делают этот метод весьма привлекательным и с практической точки зрения. Все указанные типы пленочных наноструктур получают и исследуются в Лаборатории физики магнитных пленок (ЛФМП) ГНПО «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению» (ранее – Институт физики твердого тела и полупроводников (ИФТТиПП)) НАН Беларуси. Методы химического и электролитического осаждения являются одними из основных в ЛФМП и были заложены ее создателем Л. Ф. Ильюшенко [1]. Ею с коллегами изучены механизм образования и роста одно- и многокомпонентных пленок на основе элементов группы железа, а также их структура и магнитные свойства. Затем исследования сместились к более сложным составам с добавками металлоидов типа фосфора, серы, бора и др., а также тяжелых металлов – вольфрама и рения. Были получены аморфные и нанокристаллические системы с перспективными для практического приложения магнитными свойствами [2].

Пленки со столбчатым типом кристаллической структуры. Одним из путей повышения плотности магнитной записи в устройствах хранения и обработки информации является применение нового вертикального способа ее записи. Емкость запоминающего устройства, использующего такой тип записи, может быть повышена более чем на порядок по сравнению с системами с обычным традиционным продольным способом записи информации. Для этой цели необходимы магнитные носители с высокой перпендикулярной анизотропией. Таким материалом оказались пленки со столбчатым типом кристаллической микроструктуры, в которой наноразмерные (~ 10 нм) иглообразные зерна-столбики простираются по всей толщине пленки. В этом случае сумма кристаллографической магнитной энергии и энергии анизотропии формы столбчатых гранул может превысить энергию размагничивающих полей [3, 4].

Достигнутые нами магнитные параметры, такие как остаточная намагниченность в направлении, перпендикулярном плоскости пленки, $M_{r\perp}$ и коэрцитивная сила в том же направлении $H_{C\perp}$ составляют соответственно 0,1–0,3 $H_{C\parallel}$ ($M_{r\perp} > M_{r\parallel}$ в 2–3 раза) и 1000–2000 Э ($H_{C\perp} > H_{C\parallel}$) [5]. Приведенные характеристики электроосажденных магнито жестких пленок Co, CoW и CoNiW с перпендикулярной анизотропией и столбчатым типом кристаллической структуры открывают возможность практического применения таких пленок в устройствах хранения информации с вертикальным способом записи.

Многослойные пленочные структуры. Работы в ЛФМП по совершенствованию методов получения многослойных магнитных структур с ультратонкими (< 1 нм) чередующимися магнитными и немагнитными слоями и изучению их физических свойств начались относительно недавно [6]. Полученные структуры примечательны не только с чисто фундаментальной, но и с практической точки зрения благодаря своим уникальным магнитным, механическим, электрическим и другим свойствам.

Первоначально планировалось получить в многослойных системах высокие значения перпендикулярной магнитной анизотропии, что было вызвано опытом разработки магнито жестких пленок со столбчатым типом микроструктуры, описанных выше. Идея основывалась на явлении так называемой поверхностной анизотропии [6]. Одним из возможных и технологически простых методов получения многослойных структур является метод импульсного электроосаждения из одного электролита. Такие ферромагнитные металлы, как кобальт, железо и никель или их сплавы, а также металлы из группы благородных элементов – медь, серебро, золото, палладий – могут быть использованы соответственно в качестве магнитных и немагнитных слоев. Получение многослойных структур методом электролитического осаждения из одного и того же электролита основывается на том факте, что равновесный потенциал восстановления ферромагнитных и немагнитных ионов отличается более чем на 400 мВ. Поэтому при малых потенциалах осаждения будут восстанавливаться только такие металлы, как, например, медь, серебро или их сплавы, а при более высоких – и медь, и, например, кобальт, никель, железо или их сплавы. Но если выбрать концентрацию ионов меди в электролите намного меньше, чем переходных металлов, то из-за диффузионных затруднений переноса ионов меди к катоду скорость осаждения меди будет ограничена независимо от величины прикладываемого потенциала. Таким образом, меди в осадке будет намного меньше по сравнению с элементами группы переходных металлов. Так, если потенциал осаждения выбрать $\varphi = -0,3-0,5$ В, плотность тока осаждения меди составит $i_k \sim 0,4-0,5$ мА/см², что намного меньше минимальной плотности тока осаждения кобальта, составляющей примерно 5 мА/см² (для этого необходимо значение потенциала $\varphi \sim 0,8-0,9$ В). Поэтому при потенциалах осаждения, меньших $\sim 0,8-0,9$ В, будет осаждаться только медь, а при более высоких потенциалах – как медь, так и кобальт. Плотность тока, используемая для осаждения магнитного слоя, составляла $i_k \sim 100$ мА/см², следовательно, скорость осаждения ферромагнитного металла примерно на два порядка превосходит соответствующую скорость осаждения меди. Поэтому доля меди в слоях кобальта не превышает нескольких процентов. Таким образом, используя тот же самый раствор, мы можем получать многослойную структуру (например, Co/Cu, рис. 1), и толщина слоев будет определяться только величиной и длительностью прикладываемых импульсов напряжения.

Вклад поверхностной анизотропии границы раздела слоев увеличивается по мере уменьшения толщины магнитных слоев и становится преобладающим при толщине магнитного слоя порядка нескольких нанометров. По мере уменьшения толщины слоев кобальта константа перпендикулярной магнитной анизотропии и коэрцитивная сила в перпендикулярном направлении поверхности пленки увеличиваются. Соответственно параметры многослойного покрытия: отношение остаточной намагниченности в перпендикулярном направлении к остаточной намагниченности в плоскости покрытия, а также сама величина коэрцитивной силы – являются весьма перспективными для использования многослойных Co/Cu пленок в качестве материала для вертикальной магнитной записи.

В процессе исследования ряда многослойных пленок систем Co/Cu, Fe/Cu, CoFeP/Cu, CoNiW/Cu и других [6] была обнаружена аномальная зависимость намагниченности пленок Co/Cu от температуры. Одно из возможных объяснений основывалось на существо-

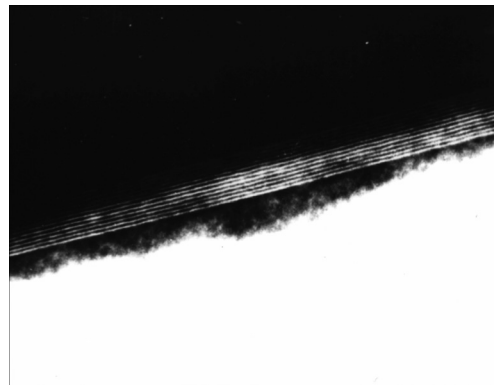


Рис. 1. Многослойные Co/Cu пленки, толщина слоев 5 нм

Fig. 1. Multilayer Co/Cu films, layer thickness 5 nm

вании непрямого обменного РККИ-взаимодействия, наблюдавшегося при определенном соотношении толщин слоев Co и Cu, что приводило к антиферромагнитному упорядочению векторов намагниченности соседних слоев. Это взаимодействие также ответственно и за явление гигантского магнитосопротивления (ГМС) в многослойных пленках. Продолжив исследование магниторезистивных свойств многослойных пленок Co/Cu, мы использовали ситалловые подложки с химически осажденным немагнитным фосфидом никеля, а также алюминиевые, которые перед измерением растворялись в 10%-ном растворе NaOH. Данные измерений практически идентичны для обоих типов подложек вследствие малого шунтирующего эффекта фосфида никеля: его электросопротивление более чем на порядок выше электросопротивления самой многослойной структуры Co/Cu. Магниторезистивные измерения проводились в диапазоне температур от 300 до 4,2 К в полях до 1,3 Тл шагами по 50 Э. Использовалась стандартная четырехточечная схема измерения в трех различных положениях: ΔR_{\parallel} – электрический ток I параллелен прикладываемому внешнему магнитному полю H и плоскости пленки; ΔR_{\perp} – ток перпендикулярен полю и находится в плоскости пленки; $\Delta R_{\parallel\perp}$ – ток в плоскости пленки, а поле перпендикулярно ее плоскости.

Известно, что в отличие от анизотропного магнитосопротивления ферромагнитных металлов и сплавов гигантское магнитосопротивление многослойных пленок характеризуется не только большой величиной (до 110 % при комнатной температуре), но также и изотропностью при различных взаимных направлениях поля и тока.

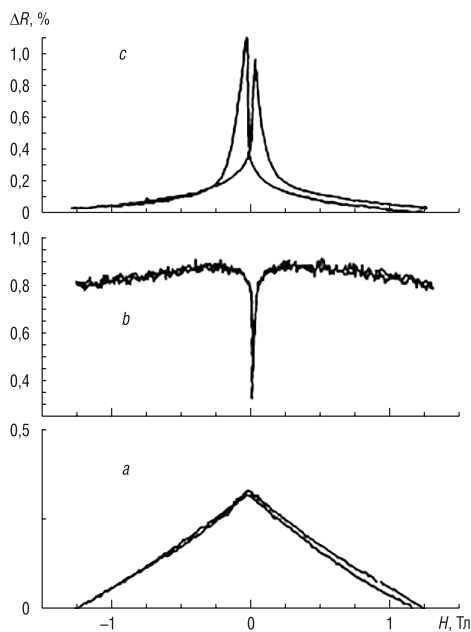


Рис. 2. Полевая зависимость магнитосопротивления в геометрии электрический ток параллелен магнитному полю и плоскости пленки для многослойных Co/Cu структур с различными значениями толщины слоев: $a - d_{\text{Co}} = 0,2$ нм и $d_{\text{Cu}} = 1,5$ нм; $b - d_{\text{Co}} = 2,5$ нм и $d_{\text{Cu}} = 1,5$ нм; $c - d_{\text{Co}} = 14$ нм и $d_{\text{Cu}} = 15$ нм (измерения проводились при комнатной температуре)

Fig. 2. Field dependence of magnetoresistance in geometry electric current is parallel to magnetic field and film plane for multilayer Co/Cu structures with different layer thicknesses: $a - d_{\text{Co}} = 0.2$ nm and $d_{\text{Cu}} = 1.5$ nm; $b - d_{\text{Co}} = 2.5$ nm and $d_{\text{Cu}} = 1.5$ nm; $c - d_{\text{Co}} = 14$ nm and $d_{\text{Cu}} = 15$ nm (measurements were made at room temperature)

На рис. 2 приведено ΔR_{\parallel} как функция толщины слоев кобальта и меди. Отрицательное магнитосопротивление (уменьшение электросопротивления при наложении магнитного поля) наблюдалось для пленок, состоящих из слоев кобальта и меди с толщиной 0,2 и 1,5 нм (рис. 2, a) и 14,0 и 15,0 нм (рис. 2, c) соответственно. Зависимость $\Delta R_{\parallel}(H)$ на рис. 2, b характеризуется положительным магнитосопротивлением, что свидетельствует об обычном анизотропном магнитосопротивлении пленок при указанных толщинах слоев кобальта и меди. Зависимость $\Delta R_{\parallel}(H)$ на рис. 2, a с широким «треугольным» обратимым максимумом без насыщения и гистерезиса (наблюдавшимся как при 300 К, так и при 100 К) возможна для следующих двух случаев. Во-первых, отсутствие гистерезиса может быть объяснено сильным антиферромагнитным взаимодействием магнитных слоев. При исследовании описанных выше многослойных пленок Co/Cu было показано, что ультратонкие слои кобальта (толщиной менее 1 нм) представляют собой изолированные «островки», диаметр которых много больше их толщины. Эти магнитные «островки» кобальта в медной матрице в отсутствие внешнего магнитного поля антиферромагнитно упорядочиваются вследствие магнитостатического взаимодействия через поля рассеяния. Электросопротивление таких пленок до намагничивания выше, чем после намагничивания до насыщения. Рассеяние электронов на таких магнитных неоднородностях изотропно ($\Delta R_{\parallel} \approx \Delta R_{\perp}$), и это является возможной основой механизма гигантского магнитосопротивления в пленках Co/Cu с толщинами слоев кобальта и меди соответственно 0,2 и 1,5 нм. Во-вторых, подобная полевая зависимость $\Delta R_{\parallel}(H)$ (рис. 2, a) характерна для гранулированных (неоднородных) сплавов, также обладающих гигантским магнитосопротивле-

нием. В этих сплавах эффект ГМС обуславливается суперпарамагнитным состоянием магнитных гранул в немагнитной матрице при температурах выше температуры блокирования. (Более подробно мы это рассмотрим далее.)

Таким образом, нами открыт и исследован эффект гигантского магнитосопротивления в многослойных пленках кобальта Co/Cu, полученных методом импульсного электроосаждения из одного электролита. Обнаружен низкополевой эффект гигантского магнитосопротивления, что само по себе представляет интерес для практического применения. Очевидно, что электроосаждение является весьма перспективным методом получения пленок, обладающих эффектом гигантского магнитосопротивления. Представляет интерес формирование и исследование магнитных многослойных структур с низкокоэрцитивными магнитными слоями. В электроосажденных многослойных пленках CoFeP/Cu с низкой коэрцитивной силой и повышенной термической стабильностью также можно ожидать проявления перспективных магниторезистивных свойств, а именно более высокий по сравнению с пленками Co/Cu магниторезистивный эффект и в более низких полях. Более того, метод электролитического осаждения допустимо использовать для получения еще более сложных многослойных систем спин-клапанного типа [6, 7]. По своему строению такие системы могут состоять из четырех, пяти и более чередующихся слоев, например (магнитомягкий/немагнитный/магнитомягкий/магнито жесткий/немагнитный слой)_n. Методом импульсного электролитического осаждения из одного электролита возможно получать такие многослойные покрытия спин-клапанного типа, как (CoFeP_x/Cu/CoFeP_x/CoFeP_y/Cu)_n и (CoW_x/Cu/CoW_x/CoW_y/Cu)_n, где магнитные сплавы с $x > 20$ ат.% обладают низкой коэрцитивной силой, а сплавы с $y < 5$ ат.% – высококоэрцитивные. Изменение состава и, следовательно, магнитных свойств осаждаемых сплавов задается величиной и длительностью прикладываемого импульса тока.

Более подробно исследования многослойных структур приведены и обсуждены в [7].

Гранулированные сплавы. Как уже было показано выше, многослойные пленки, получаемые при приложении очень коротких импульсов тока, в действительности являются многослойными пленками «островкового» типа, и их поведение типично для гранулированных сплавов.

Принимая во внимание полную взаимную нерастворимость кобальта и меди при нормальных условиях, мы попытались получить гранулированные пленки Co/Cu не в импульсном режиме, а при постоянной плотности тока и без последующего отжига.

Использовался следующий состав электролита, в г/л: CuSO₄ × 5H₂O – 30; CoCl₂ × 6H₂O – 3,3; H₃BO₃ – 6,6; MgSO₄ × 7H₂O – 23,3; CoSO₄ × 7H₂O – 10–30 [8]. Состав исследованных образцов задавался изменением концентрации CoSO₄ × 7H₂O в электролите. Осаждение велось при кислотности электролита pH = 6,0, температуре 20 °C и катодной плотности тока $i_k = 5$ mA/cm².

Магнитные измерения проводились на квантовом СКВИД-магнитометре в диапазоне температур от 300 до 5 K. На рис. 3 приведены типичные кривые перемагничивания для гранулированных пленок состава Co₁₁Cu₈₉. Наличие гистерезиса при низких температурах и его отсутствие при высоких, а также отсутствие насыщения намагниченности при высоких полях предполагают, что имеет место смесь ферро- и суперпарамагнитного поведения системы при низких температурах (рис. 3, *a*) и только суперпарамагнитное при высоких температурах (рис. 3, *b*).

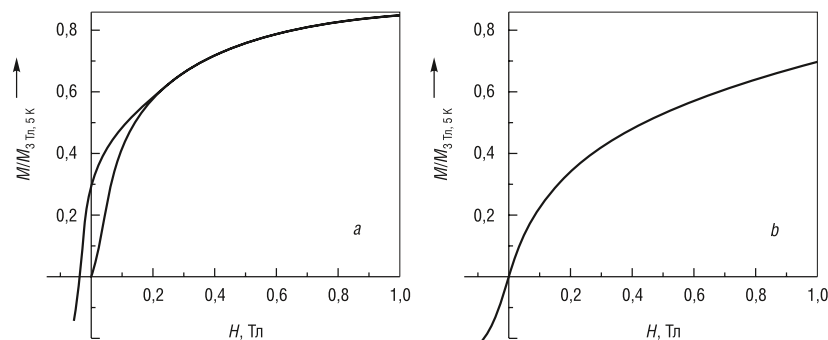


Рис. 3. Кривые перемагничивания гранулированных пленок Co₁₁Cu₈₉: *a* – при 5 K, *b* – при 300 K

Fig. 3. Magnetization curves of granular Co₁₁Cu₈₉ films: *a* – at 5 K, *b* – at 300 K

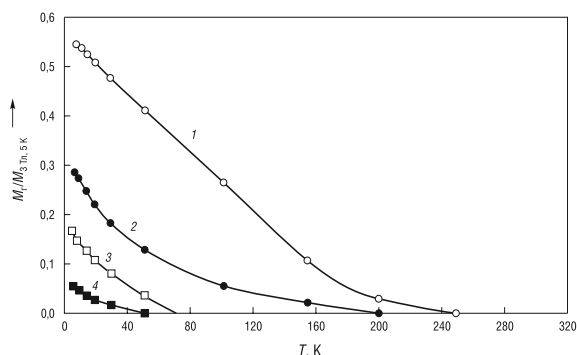


Рис. 4. Температурная зависимость остаточной намагниченности гранулированных CoCu различного состава (величины нормированы к намагниченности при $H = 3$ Тл и $T = 5$ К): 1 – $\text{Co}_{20}\text{Cu}_{80}$, 2 – $\text{Co}_{11}\text{Cu}_{89}$, 3 – $\text{Co}_8\text{Cu}_{92}$, 4 – $\text{Co}_6\text{Cu}_{94}$

Fig. 4. Temperature dependence of magnetization remanence of granular CoCu films of different composition (values are normalized to the magnetization at $H = 3$ T and $T = 5$ K): 1 – $\text{Co}_{20}\text{Cu}_{80}$, 2 – $\text{Co}_{11}\text{Cu}_{89}$, 3 – $\text{Co}_8\text{Cu}_{92}$, 4 – $\text{Co}_6\text{Cu}_{94}$

Зависимость остаточной намагниченности гранулированных пленок разных составов от температуры показана на рис. 4. Все кривые, за исключением зависимости для состава $\text{Co}_{20}\text{Cu}_{80}$, имеют вогнутый характер, что предполагает наличие некоторой области температур блокирования и соответствующего ему диапазона размеров гранул кобальта в матрице меди, который можно варьировать изменением условий и режимов осаждения пленок. Линейное изменение остаточной намагниченности для состава $\text{Co}_{20}\text{Cu}_{80}$ предполагает примерно одинаковые размеры кобальтовых частиц в этой пленке. Экстраполируя значения остаточной намагниченности к нулю, можно оценить максимальную температуру блокирования. Она возрастает с увеличением концентрации кобальта в пленках.

Для оценки среднего размера частиц кобальта использовалось известное соотношение

$$K_A V = 25 k_B T_B,$$

где K_A – константа магнитной анизотропии ферромагнитного включения, V – средний объем частицы, T_B – температура блокирования, k_B – постоянная Больцмана. Для оценки мы брали значения K_A , соответствующие ГЦК-решетке кобальта. Результаты отражены в таблице.

Температура блокирования и средний диаметр кластеров кобальта в матрице меди гранулированных пленок Co/Cu различного состава

Blocking temperature and average clusters diameter of Co clusters in Cu matrix of granular Co/Cu films of different composition

Состав	T_B , К	Диаметр гранул, нм
$\text{Co}_6\text{Cu}_{94}$	55 ± 5	7,6
$\text{Co}_8\text{Cu}_{92}$	80 ± 10	8,7
$\text{Co}_{11}\text{Cu}_{89}$	210 ± 20	12,0
$\text{Co}_{20}\text{Cu}_{80}$	260 ± 25	12,8

Примечание. Значения, приведенные для концентрации кобальта, являются усредненными по данным химического и рентгеновского анализа.

По мере повышения температуры отжига величина изменения магнитосопротивления возрастает (рис. 5, б). Известно, что величина ГМС определяется размером магнитных кластеров, их распределением, а также резкостью изменения состава вблизи границы кластер – матрица. Очевидно, что все эти параметры напрямую зависят от отжига покрытий.

Таким образом, показана возможность получения пленок неоднородных сплавов Cu–Co с помощью метода электролитического осаждения при постоянной плотности тока из одного раствора. Указанные покрытия являются суперпарамагнетиками и обладают изотропным ГМС-эффектом. Очевидно, то же самое возможно и для полностью взаимно нерастворимой системы Cu–Fe. Довольно неожиданно, однако, то, что мы получили гранулированные сплавы также из полностью взаимно растворимой системы Co–Re [7]. В этом и заключаются преимущества метода электролитического осаждения – гранулированные (неоднородные) системы могут быть получены как из полностью нерастворимых, так и из растворимых при нормальных условиях элементов. Более того, мы полагаем, что и из нерастворимых (неперемешиваемых) элементов (тех же самых Cu и Co) можно получить полностью однородные сплавы.

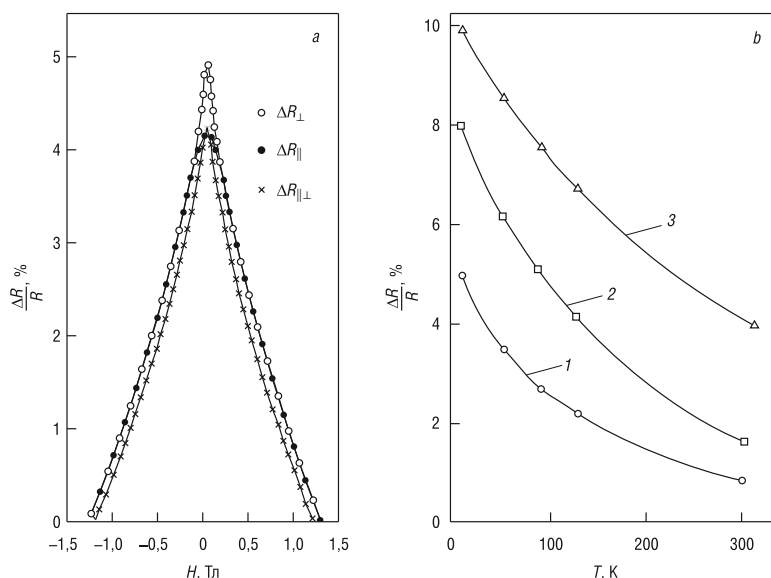


Рис. 5. Магнитосопротивление свежеприготовленных гранулированных пленок $\text{Co}_{20}\text{Cu}_{80}$ при 5 К в различной геометрии измерения (а) и зависимость их магнитосопротивления от температуры после отжига (б): 1 – неотожженных; 2 – после отжига в течение 30 мин при 400 °С, 3 – при 600 °С

Fig. 5. Magnetoresistance of freshly granular $\text{Co}_{20}\text{Cu}_{80}$ films at 5 K at different geometries measurement (a) and temperature dependence of magnetoresistance on annealing (b): 1 – unannealed; 2 – after annealing at 400 °C during 30 min, 3 – at 600 °C

Нанопроволоки. Одной из главных целей исследования нанопроволок, и в первую очередь многослойных, являлась реализация эффекта гигантского магнитосопротивления в так называемой СРР-геометрии (электрический ток перпендикулярен границам раздела слоев в многослойной структуре). В этом случае ожидалось, что эффект ГМС будет намного больше, чем в СІР-геометрии (ток в плоскости слоев). Некоторые исследовательские группы (в основном из Бристоля (Великобритания) и Лозанны (Швейцария)) получили ряд многослойных нанопроволок и подтвердили высказанное предположение [8]. Мы же первыми получили и исследовали нанопроволоки из неоднородных сплавов [9], а также многослойные со сложным периодом [10, 11] спин-клапанного типа. Такие нанопроволоки также обладают ГМС-эффектом, величина которого повышается при отжиге. Нанопроволоки неоднородных сплавов Со–Си длиной в несколько десятков микрометров и диаметром до 20 нм осаждались в поры стандартных промышленных мембран из анодированного алюминия. В отличие от поликарбонатных мембран эти мембраны могут быть использованы для изучения влияния процессов отжига.

На рис. 6 приведен электронно-микроскопический снимок нанопроволок неоднородного сплава Со–Си. Нанопроволоки поликристаллически и имеют величину магнитосопротивления при комнатной температуре $\sim 0,5\%$. Хотя абсолютная величина изменения магнитосопротивления является небольшой (меньше $\sim 1\%$), но она отрицательна во всех взаимных ориентациях поля и электрического тока (рис. 7), что и должно быть для неоднородных сплавов Со–Си. Имеются симметричные «плечи» по обе стороны от центрального пика на обеих кривых МС (рис. 7), которые можно отнести за счет особенностей механизма перемагничивания пленок.

Возрастание величины ГМС при отжиге сплошных пленок неоднородных сплавов Со–Си, полученных различными методами, обусловлено фазовым расслоением, которое при-

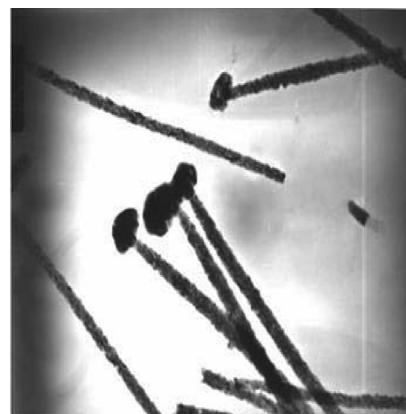


Рис. 6. Электронная микрофотография на просвет нанопроволок неоднородного сплава Со–Си, электроосажденных в поры поликарбонатных мембран с диаметром пор 10 нм и плотностью пор $6 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$

Fig. 6. TEM-image of granular Co–Cu nanowires, electrodeposited in pores of polycarbonate membranes with diameter of pores 10 nm and their density $6 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$

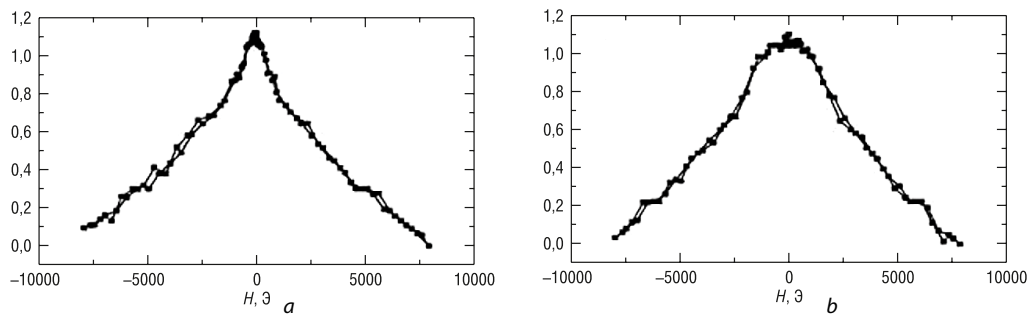


Рис. 7. Изменение магнитосопротивления отожженных при 400 °С в течение 30 мин нанопроволок неоднородного сплава Co–Cu, электроосажденных в поры мембран из анодированного алюминия с диаметром пор 200 нм и плотностью пор 10^9 см^{-2} при комнатной температуре в магнитном поле параллельном (а) и перпендикулярном (б) длинной оси нанопроволок

Fig. 7. Magnetoresistance of annealed at 400 °C during 30 min granular Co–Cu nanowires, electro deposited in anodized Al membranes with pores diameter of 200 nm and density 10^9 cm^{-2} at room temperature in magnetic field parallel (a) and perpendicular (b) to the long axis of nanowires

водит к увеличению числа и размеров частиц, обогащенных кобальтом. По этой причине мы исследовали влияние отжига на величину ГМС наших электроосажденных нанопроволок. Отжиг проводился в течение 30 мин при температуре 200 °С и 400 °С в вакууме 10–15 тор для уменьшения риска окисления. Было обнаружено существенное увеличение величины ГМС при комнатной температуре. Так, после отжига при 400 °С величина эффекта магнитосопротивления в продольной и поперечной конфигурации для одного и того же образца возросла более чем в 2 раза. Отличительная особенность рис. 7 заключается в том, что формы кривых магнитосопротивления в параллельном (а) и перпендикулярном (б) к длинной оси проволоки направлениях существенно различаются, что подтверждает существенное влияние геометрии нанопроволок на их магнитные свойства. Это может быть обусловлено тем, что некоторые обогащенные кобальтом частицы по своему диаметру приближаются к поперечным размерам нанопроволок (20 нм) или что даже если диаметр нанопроволоки намного превышает размеры частиц, то он может оказаться меньше характерного для магнитных взаимодействий расстояния. К тому же во время электроосаждения с последующим отжигом геометрия нанопроволоки могла влиять на формы и распределения магнитных частиц, обогащенных кобальтом, либо могла привести к анизотропии, созданной напряжениями в этих частицах.

Исследование явления ГМС, а также попытки разработчиков различных устройств магнитной микроэлектроники повысить величину изменения электросопротивления на единицу магнитного поля привели к появлению нового, более сложного семейства многослойных пленочных структур спин-клапанного типа. Они представляют собой уже периодическое чередование не двух, а трех и более слоев с различными магнитными параметрами [10, 11]. В этом случае процесс перемагничивания таких слоев анизотропен. При изменении прилагаемого внешнего магнитного поля по направлению вектора намагниченности, предварительно доведенного до насыщения магнито жесткого слоя в диапазоне, меньшем его коэрцитивной силы, магнитомягкий слой будет перемагничиваться в этом направлении в поле ниже его коэрцитивной силы. А в противоположном направлении – в поле, большем его коэрцитивной силы. Эта разница в полях перемагничивания низко- и высококоэрцитивных слоев в многослойной структуре в противоположных направлениях и есть суть «клапанного» эффекта. Состояние многослойной структуры, когда магнитные моменты магнитомягких и магнито жестких слоев антипараллельны, является неустойчивым. И малое поле противоположной направленности приводит к скачкообразному перемагничиванию низкокоэрцитивных слоев. Именно поэтому и может быть достигнута высокая чувствительность магниторезистивного элемента.

Ранее мы уже предложили идею получения многослойных структур спин-клапанного типа методом электролитического осаждения [10, 11]. Основная трудность при этом заключается в том, что при варьировании потенциала осаждения φ (либо катодной плотности тока D_K) необ-

ходимо подобрать такие условия осаждения (прежде всего состав электролита и режимы осаждения), при которых одним изменением φ (или D_K) будет достигаться достаточно большая разница в составе и кристаллической структуре магнитных слоев и, следовательно, существенно различаться их коэрцитивная сила. Указанным условиям могут удовлетворять исследованные нами пленки CoFeP (Федосюк В. М., Ильюшенко Л. Ф., Шелег М. У. Электролит и способ для нанесения покрытий сплавом кобальт-железо-фосфор. А. с. СССР № 722384 от 21.11.1979 г.) и CoW [3], в которых содержание фосфора и вольфрама является функцией плотности тока. И, например, при малой плотности тока ($D_K \sim 10\text{--}20$ мА/см²) содержание фосфора достигает $\sim 20\text{--}25$ ат.%. При этом пленки CoFeP₂₅ являются аморфными и магнитомягкими, а при содержании фосфора $\sim 5\text{--}10$ ат.% ($D_K \sim 70$ мА/см²) они поликристаллические и, соответственно, магнитожесткие. Подобное справедливо и для системы Co–W.

Мы впервые попытались соединить преимущества указанных двух подходов и получить многослойные структуры спин-клапанного типа в виде нанопроволок методом импульсного электролитического осаждения из одного электролита [12].

Осаждались многослойные структуры спин-клапанного типа двух видов: $\{(CoFeP_x)d_1/Cu d_{Cu}/(CoFeP_x)d_2/Cu d_{Cu}\}_n$ и $\{(CoFeP_x)d_1/Cu d_{Cu}/(CoFeP_y)d_3/Cu d_{Cu}\}_n$, где $x = 25$ ат.% P, $y = 5$ ат.% P, $d_1 = 2\text{--}250$ нм, $d_2 = 2\text{--}250$ нм, $d_3 = 5\text{--}500$ нм, $d_{Cu} = 2\text{--}50$ нм. Таким образом, для первой системы структур их период составлял четыре слоя и коэрцитивная сила магнитных слоев изменялась варьированием их толщины. Для второго семейства пленок период состоял из пяти слоев, причем различие в коэрцитивной силе достигалось изменением состава слоев.

Осаждение велось при температуре 18 °С в потенциостатическом режиме по трехэлектродной схеме в поры стандартных промышленных поликарбонатных мембран Poretics Products диаметром 1 см и толщиной 6 мкм. Диаметр пор составлял 30 нм при их толщине 6 мкм. Плотность пор составляла $\sim 10^9$ см⁻². На одну из сторон мембран предварительно напылялся подслоя золота толщиной $\sim 0,01$ мкм. Осаждение осуществлялось посредством аналого-цифрового ADC42 и цифро-аналогового РС24 преобразователей. Работа управляющей программы основана на законе Фарадея и в ней задаются все основные геометрические и физические параметры осаждаемых слоев.

Для проведения электронно-микроскопических исследований использовался электронный микроскоп ЭВМ-100ЛМ с ускоряющим напряжением до 100 кВ. Мембраны растворялись в хлороформе. Выделенные после растворения мембран нанопроволоки вылавливались на сеточки, предварительно покрытые коллодиевой пленкой.

Магнитные измерения проводились на квантовом СКВИД-магнитометре MPMS-5 в области температур 5–300 К и полях до 5,5 Тл. Точность установки температуры составляла $\pm 10^{-2}$ К, поля – $\pm 10^{-2}$ Э. Магнитосопротивление измерялось по двухконтактной схеме в геометрии, когда электрический ток был параллелен оси нанопроволок (т. е. перпендикулярно границам раздела слоев). Магнитное поле прикладывалось как перпендикулярно оси нанопроволок, так и параллельно.

На рис. 8 приведены типичные задаваемые последовательности импульсов тока для осаждения четырехслойных структур. Электронно-микроскопические исследования подтверждают периодичность чередования слоев меди и сплава CoFeP в нанопроволоках (рис. 9).

Как можно видеть из рис. 10, *a–c*, при очень тонких слоях (толщиной менее нескольких нанометров) на кривых перемагничивания не наблюдается никаких ступенек (рис. 10, *a, b*), которые были бы характерны в случае перемагничивания магниторазнородного (по коэрцитивной силе) материала. По нашему мнению, указанному факту есть два объяснения. Во-первых, электроосаждение в нанопоры мембран происходит в условиях сильного перенапряжения (пересыщения). Поэтому состав магнитных слоев может существенно отличаться от состава слоев, если бы они осаждались в виде просто пленочных покрытий. Разница в коэрцитивной силе магнитомягких слоев с H_{c1} и магнитожестких с H_{c2} может быть недостаточно велика. Либо может произойти непрерывный набор коэрцитивных сил от H_{c1} до H_{c2} . В этом случае на петлях гистерезиса нанопроволок не будет заметно никаких резких переходов (ступенек). Второе объяснение может быть связано с сильным взаимодействием магнитных слоев как в самой нанопроволоке,

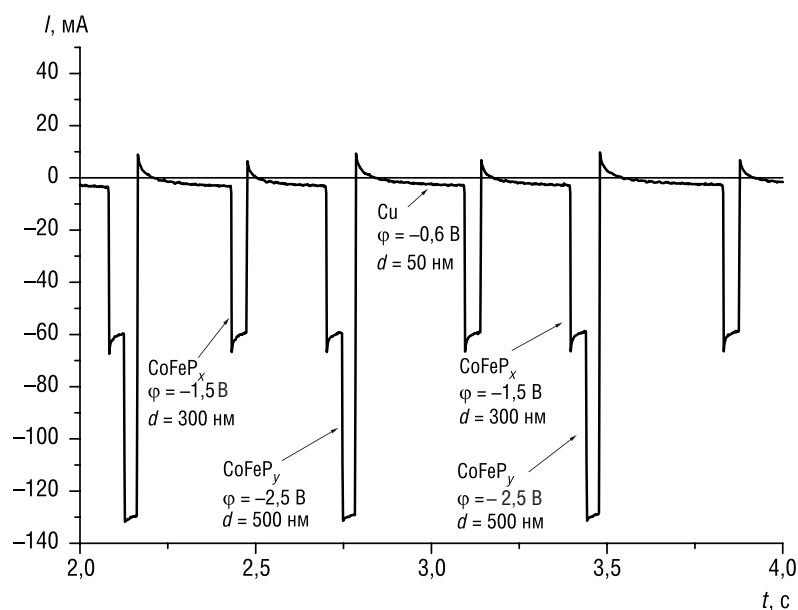


Рис. 8. Последовательность прикладываемых импульсов для получения многослойных нанопроволок спин-клапанного типа с периодом в четыре слоя

Fig. 8. Sequence of applied impulses for obtaining of multilayer nanowires of spin-valve type with four layers period

так и между соседними нанопроволоками. И только при увеличении толщины слоев петли гистерезиса становятся «перетянутыми» (рис. 10, с) – они сужены в середине и растянуты на «хвостах». Указанный факт свидетельствует о том, что магнитные слои нанопроволок имеют явно различную коэрцитивную силу. При очень малых толщинах магнитных слоев их поведение представляет собой смесь магнитного и гранулированного состояний – кривые переманчивания не выходят на насыщение даже в очень больших полях. Как результат магнитного состояния нанопроволок кривые их магнитосопротивления типичны для многослойных структур с эффектом гигантского магнитосопротивления.

Итогом проведенных исследований и создания на их основе новых магнитных материалов, в том числе наноматериалов и наноструктур, стало присуждение в 2005 г. коллективу сотрудников ИФТТиПП Государственной премии в области науки и техники за работу «Магнитные структуры и физические свойства многокомпонентных систем с переходными и редкоземельными элементами, разработка новых магнитных материалов, создание и производство элементов и устройств электронной техники».

При последующем изучении многослойных пленочных структур несколько неожиданным



Рис. 9. Электронно-микроскопическое изображение многослойных нанопроволок с периодом в четыре слоя

Fig. 9. TEM-image of multilayer nanowires with four layers period

оказалось то, что они имеют хорошие экранирующие свойства и могут быть использованы для защиты от электромагнитного и радиационного излучения [13, 14]. Это направление исследований в ЛФМП было развито С. С. Грабчиковым с коллегами и в сотрудничестве с ПО «Интеграл», ГНПО «Планар» и Институтом тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси увенчались в 2017 г. также Государственной премией Республики Беларусь.

Лаборатория физики магнитных пленок – не единственное подразделение Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, которое занимается исследованием магнитных наноматериалов. Следует отметить лабораторию физики магнитных материалов (ЛФММ) (заведующий лаборато-

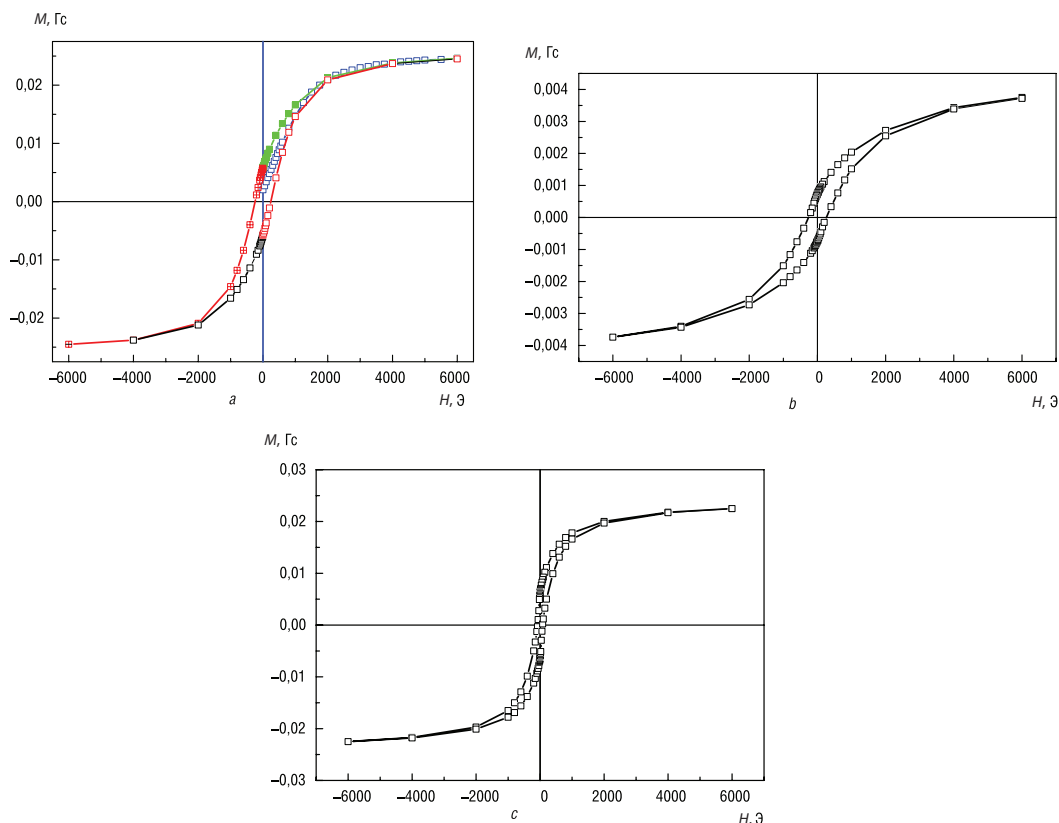


Рис. 10. Кривые перемagnetизации многослойных нанопроволок: *a* – пятислойных $\{(CoFeP_{25})d_1/Cud_{Cu}/(CoFeP_{25})d_1/(CoFeP_{25})d_2/Cud_{Cu}\}_n$ с $d_1 \sim 3,5$ нм, $d_2 \sim 25$ нм, $d_{Cu} = \text{const} \sim 3$ нм; *b* – четырехслойных $\{(CoFeP_{25})d_1/Cud_{Cu}/(CoFeP_{25})d_2/Cud_{Cu}\}_n$ с $d_1 \sim 1,5$ нм, $d_2 \sim 50$ нм и $d_{Cu} \sim 3$ нм; *c* – четырехслойных, полученных указанных в рис. 8 режимах, с $d_1 \sim 5$ нм, $d_2 \sim 15$ нм и $d_{Cu} \sim 3$ нм

Fig. 10. Magnetization curves of multilayer nanowires: *a* – five-layered $\{(CoFeP_{25})d_1/Cud_{Cu}/(CoFeP_{25})d_1/(CoFeP_{25})d_2/Cud_{Cu}\}_n$ with $d_1 \sim 3.5$ nm, $d_2 \sim 25$ nm, $d_{Cu} = \text{const} \sim 3$ nm; *b* – four-layered $\{(CoFeP_{25})d_1/Cud_{Cu}/(CoFeP_{25})d_2/Cud_{Cu}\}_n$ with $d_1 \sim 1.5$ nm, $d_2 \sim 50$ nm and $d_{Cu} \sim 3$ nm; *c* – four-layered, obtained at indicated in fig. 8 regimes, with $d_1 \sim 5$ nm, $d_2 \sim 15$ nm and $d_{Cu} \sim 3$ nm

рией – доктор физико-математических наук, профессор Г. И. Маковецкий, с 2015 г. – доктор физико-математических наук К. И. Янушкевич) и отдел криогенных исследований (ОКИ) (заведующий отделом – доктор физико-математических наук, профессор С. Е. Демьянов).

Так, в ОКИ успешно получают и исследуются подвид нанопроволок – нанотрубки [15, 16], которые также осаждаются электрохимическими методами. Электрохимическое осаждение проводится в потенциостатическом режиме в двухэлектродной ячейке при напряжении 1,5 В. Катод представляет собой золотую пленку на задней поверхности мембраны из окиси алюминия толщиной 10 нм. Толщина катода мала для перекрытия пор, но достаточна для образования кольца вокруг поры, которое задает рост полых нанотрубок. В качестве электролитов используются следующие растворы: для синтеза железных – $FeSO_4 \times 7H_2O$ (180 г/л), $FeCl_3 \times 6H_2O$ (5 г/л), H_3BO_3 (25 г/л), $C_6H_8O_6$ (3 г/л); кобальтовых – $CoSO_4 \times 7H_2O$ (120 г/л), H_3BO_3 (45 г/л), $C_6H_8O_6$ (3 г/л); никелевых нанотрубок – $NiSO_4 \times 6H_2O$ (120 г/л), H_3BO_3 (3 г/л), $C_6H_8O_6$ (1,5 г/л) при температуре 25 °С; рН электролита составляет 3.

Синтезированные в порах алюминиевых мембран Fe, Co и Ni нанотрубки имеют наружный диаметр 110 ± 10 нм и длину $12 \pm 0,2$ мкм. Из изображения сломов наноструктур видно, что они имеют трубчатую форму (рис. 11, *d*).

Магнитомягкие нанокомпозиты. Сотрудниками ЛФММ Г. А. Говором и А. К. Вечером разработан новый вид магнитных наноматериалов, представляющих собой композит из ферромагнитных наночастиц железа в «нанорубашке» из немагнитного и диэлектрического оксида алюминия [17].

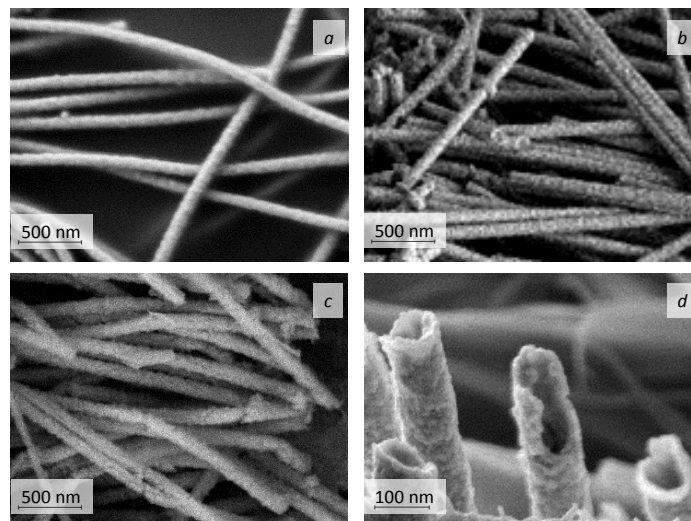


Рис. 11. СЭМ-изображения массива ферромагнитных нанотрубок: *a* – Fe, *b* – Co, *c* – Ni, *d* – сломы отдельных Ni нанотрубок

Fig. 11. SEM-image of ferromagnetic nanotubes: *a* – Fe, *b* – Co, *c* – Ni, *d* – breakage of separate Ni nanotubes

Технология производства композиционных магнитных материалов включает в себя ряд следующих процессов: 1) очистка исходного железного порошка и покрытие нанометровым изоляционным слоем магнитного оксида; 2) нанесение на поверхность изолированного железного порошка слоя смазочного материала; 3) технологический процесс прессования подготовленного изолированного порошка в изделия заданной формы; 4) отжиг готовых изделий, при необходимости – окраска.

В результате обработки порошка и последующего прессования образуется изделие, в котором частицы железа разделены нанометровыми слоями изолирующего покрытия и слоем смазки (рис. 12). Такой материал является перспективной заменой электротехнической стали и может применяться при производстве сердечников трансформаторов, дросселей, катушек индуктивности, статоров электродвигателей. Он позволяет существенно уменьшить потери, особенно при работе на высоких частотах.

Перспективы развития и применения новых материалов. В Республике Беларусь в настоящее время фундаментальные исследования в области физики твердого тела и физического материаловедения, разработка новых материалов и технологий проводятся, в основном, в рамках Государственной программы научных исследований «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» на 2016–2020 годы. В ближайшей и среднесрочной перспективе результаты данных исследований будут нацелены на их приложение

в различных областях современной техники и технологий.

Достижения последних лет в материаловедении предоставили возможность моделировать и контролировать процессы, происходящие на наноуровне, получать материалы и изделия с принципиально новыми свойствами, которые могут применяться во всех сферах жизнедеятельности человека. Наибольший эффект от использования нанотехнологий и наноматериалов в ближайшие годы ожидается в сфере нанoeлектроники, фотоники, биотехнологий, медицинских препаратов, наноразмерных опто- и электромеханических систем. Применение полупроводниковых наноструктур позволит значительно уменьшить габариты устройств, снизить их энергопотребление, улучшить стоимостные характеристики и использовать преимущества массового производства микро- и нанoeлектронных компонентов и систем.

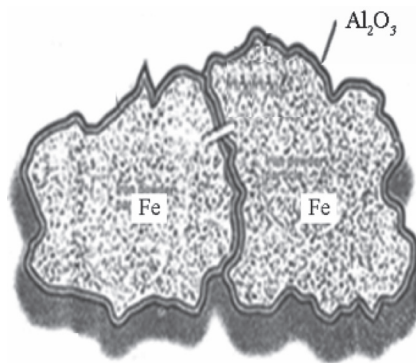


Рис. 12. Схематичное представление нанокompозита Fe/Al₂O₃

Fig. 12. Schematic image of Fe/Al₂O₃ nanocomposite

Создаются новые типы легких композиционных материалов, не уступающие в прочности и экономичности существующим. Они находят свое применение в авиации и космических аппаратах, в спортивной индустрии и медицине. Функциональные покрытия и слоистые материалы станут использоваться в машиностроении (детали, испытывающие трение, воздействие высоких температур, электромагнитного излучения и радиации и т. д.). Адаптивные материалы и покрытия, материалы с эффектом памяти формы, полимерные композиционные материалы, высокотемпературные керамические, теплозащитные и керамоподобные материалы и другие придут на смену металлам и пластикам. Повысятся требования к техническим свойствам продуктов: устойчивости к коррозии, износу и старению материалов.

Особое значение в развитии материаловедения приобретают технологии компьютерного моделирования материалов и процессов, позволяющие смоделировать требуемые процессы, структуры и их характеристики без проведения большого числа дорогостоящих экспериментов.

Для *электроники* будут создаваться: многослойные пленочные структуры на основе переходных металлов, обладающие гигантским магниторезистивным эффектом (для применения в магнитоэлектронике) [18]; несобственные мультиферроики (для применений в спинтронике) [8], обладающие высоким магнитоэлектрическим эффектом; графен с дефектами и особыми электрическими свойствами (для применения в наноэлектронике и спинтронике, электромеханике и эмиссионной электронике); новые радиационные технологии при создании и испытании электронных приборов с использованием ускорителя электронов.

В *солнечной энергетике* будут востребованы разрабатываемые многослойные периодические наноструктуры взаимодействующих квантовых точек германия в кремнии и высокоэффективные светодиоды для инфракрасной области спектра на их основе; тонкопленочные солнечные элементы на основе многокомпонентных полупроводников со структурой халькопирита и кестерита.

Для *прецизионных фотонных устройств* разрабатываются метаматериалы – магнитоплазмонные кристаллы, представляющие собой металло-диэлектрические гетероструктуры, которые содержат слои магнитных диэлектриков с нанесенными на них перфорированными нанослоями золота.

Машиностроение получит: обрабатывающий инструмент с применением композиционного материала на основе нанопорошков кубического нитрида бора для замены (вытеснения с отечественного рынка) быстроизнашивающегося обрабатывающего инструмента из твердосплавных материалов; особый сверхтвердый материал – алмаз, армированный нанотрубками/нановолокнами, для изготовления уникального режущего и шлифовального инструмента (такой технологией потенциально могут обладать не более пяти стран в мире); технологии нанесения наноконпозиционных сверхтвердых износостойких покрытий на инструмент, детали машин и механизмов.

Создаваемые суперконденсаторы (накопители энергии) на основе графеноподобного углерода (наноматериала на основе графита) найдут широкое применение в *электроавтотранспорте*.

С помощью 3D-технологий на основе новых магнитомягких наномодифицированных композиционных материалов будет развито производство ряда *электротехнических изделий* – трансформаторов, дросселей, статоров и роторов вентильно-реактивных двигателей и генераторов – с целью замены в их производстве дорогостоящей ламинированной электротехнической стали.

Для *ракетно-космической и специальной техники* развиваются технологии формирования покрытий большой площади на основе магнитомягких слоев, обладающих высокой эффективностью защиты радиоэлектронных изделий от электромагнитного излучения и проникающей радиации.

В *навигации* найдут применение магнитоуправляемые наноструктурные сенсоры на основе мультислойных структур с чередующимися слоями из ферромагнитных и диэлектрических пленок.

Будут получены локализованные плазмонные наноструктуры для усиления рамановского рассеяния света и повышения чувствительности рамановских спектрометров, применяемых для анализа веществ в *биологии, медицине, экологии, пищевой промышленности*.

Продолжают совершенствоваться технологии роста монокристаллов высокотемпературных сверхпроводников, полупроводников, мультиферроиков, алмаза, нелинейно-оптических кристаллов для использования последних в *научных исследованиях и технического применения*.

Для *квантавой інфарматыкі* будуць разрабывацца метады управлення когерентнай і дысіпатыўнай дынамікай твёрдотэльных спіновых і свёрхпроводніковых кубітаў, NV-цэнтраў в алмазе, возбуждаемых электрмагнітнымі полямі в условиях многофотонных резонансов.

Развитие *компьютерного материаловедения* позволит создать программные комплексы оптимизации технологических процессов в производстве интегральных схем.

Заклучение. Развитие материаловедческих и технологических основ создания новых материалов дает возможность получать изделия с высоким уровнем качества и заданными свойствами. Разработка и внедрение новых материалов и технологий, которыми занимается современное материаловедение, являются основополагающими факторами модернизации и развития производства и в перспективе позволят расширить область экспорта материалов и изделий с принципиально новыми электрическим, магнитными, оптическими, механическими, тепловыми и иными свойствами.

Список использованных источников

1. Ильющенко, Л. Ф. Электролитически осажденные магнитные пленки / Л. Ф. Ильющенко, М. У. Шелег, А. В. Болтушкин. – Минск: Наука и техника, 1979. – 280 с.
2. Грабчиков, С. С. Аморфные электролитически осажденные металлические сплавы / С. С. Грабчиков. – Минск: Изд. центр. БГУ, 2006. – 186 с.
3. Федосюк, В. М. Магнитомягкие пленки Co–W для вертикальной записи / В. М. Федосюк, Л. Ф. Ильющенко, М. У. Шелег // Докл. Акад. наук БССР. – 1986. – Т. 30, № 6. – С. 508–509.
4. Шадров, В. Г. Межкристаллитное магнитное взаимодействие и процессы перемагничивания в тонкопленочных магнитных структурах / В. Г. Шадров. – Минск: Изд. центр. БГУ, 2006. – 237 с.
5. Федосюк, В. М. Электрохимические магнитные покрытия для дисков с вертикальной записью информации / В. М. Федосюк, М. У. Шелег, В. Г. Шадров // Зарубежная радиоэлектроника. – 1989. – № 7. – С. 82–91.
6. Федосюк, В. М. Многослойные магнитные структуры / В. М. Федосюк. – Минск: Изд. центр БГУ, 2000. – 197 с.
7. Федосюк, В. М. Электролитически осажденные наноструктуры / В. М. Федосюк, Т. А. Точицкий. – Минск: Изд. центр БГУ, 2002. – 353 с.
8. Spin Wave Optics in Patterned Garnet / R. Gieniusz [et al.] // Spin Wave Confinement: Propagating Waves / ed. by S. Demokritov. – Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., 2017. – P. 139–170.
9. Fedosyuk, V. M. Nanoclustered films and nanowires / V. M. Fedosyuk // Synthesis, functional properties and applications of nanostructures / eds. by T. Tsakolacos, I. A. Ovid'ko. – Kluwer Academic Publ., 2003. – P. 557–578.
10. Федосюк, В. М. Многослойные нанопроволоки спин-клапанного типа / В. М. Федосюк, Т. А. Точицкий, С. А. Шарко // Перспективные материалы. – 2002. – № 4. – С. 74–78.
11. Федосюк, В. М. Структура, магнитные и магниторезистивные свойства нанопроволок спин-клапанного типа / В. М. Федосюк, С. А. Шарко // Металлофизика и новейшие технологии. – 2003. – № 6. – С. 713–723.
12. Федосюк, В. М. Наноструктурные пленки и нанопроволоки / В. М. Федосюк. – Минск: Изд. центр БГУ, 2006. – 310 с.
13. Эффективность магнитоэкранирования цилиндрическими оболочками / С. С. Грабчиков [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2015. – № 4. – С. 107–114.
14. Effectiveness of the magnetostatic shielding by the cylindrical shells / S. S. Grabchikov [et al.] // J. Magn. Magn. Mater. – 2016. – Vol. 398. – P. 49–53. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.08.122>
15. Медные нанотрубки, осажденные электрохимическим способом / Е. Ю. Канюков [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2017. – № 2. – С. 99–105. <https://doi.org/10.7868/S0207352817020081>
16. Влияние параметров электроосаждения на структурные и морфологические особенности Ni нанотрубок / А. Л. Козловский [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 2017. – Т. 118, № 2. – С. 174–179. <https://doi.org/10.7868/S0015323017020061>
17. Говор, Г. А. Особенности магнитных характеристик новых композиционных материалов на основе порошков железа / Г. А. Говор, А. К. Вечер, К. И. Янушкевич // Перспективные материалы и технологии : в 2 т. / под ред. В. В. Клубовича. – Витебск: УО ВГТУ, 2017. – Т. 2. – С. 278–299.
18. Magnetotransport properties and calculation of the stability of GMR coefficients in CoNi/Cu multilayer quasi-one-dimension structures / A. V. Trukhanov [et al.] // Mater. Res. Express. – 2016. – Vol. 3, № 6. – P. 2317–2323. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/3/6/065010>

References

1. Il'yushenko L. F., Sheleg M. U., Boltushkin A. V. *Electrolytically deposited magnetic films*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1979. 280 p. (in Russian).
2. Grabchikov S. S. *Electrolytically deposited amorphous metallic alloys*. Minsk, Publishing Center BSU, 2006. 186 p. (in Russian).
3. Fedosyuk V. M., Il'yushenko L. F., Sheleg M. U. Hard magnetic Co–W films for vertical magnetic recording. *Doklady Akademii nauk BSSR* [Doklady of the Academy of Sciences of BSSR], 1986, vol. 30, no. 6, pp. 508–509 (in Russian).

4. Shadrov V. G. *Intercrystalline magnetic interaction and magnetization reversal in thin-film magnetic structures*. Minsk, Publishing Center BSU, 2006. 237 p. (in Russian).
5. Fedosyuk V. M., Sheleg M. U., Shadrov V. G. Electrochemically magnetic films for vertical recording disks. *Zarubezhnaya radioelektronika* [Foreign Radio Electronics], 1989, no. 7, pp. 82–91 (in Russian).
6. Fedosyuk V. M. *Multilayered magnetic structures*. Minsk, Publishing Center BSU, 2000. 197 p. (in Russian).
7. Fedosyuk V. M., Tochitskii T. A. *Electrolytically deposited nanostructures*. Minsk, Publishing Center BSU, 2002. 353 p. (in Russian).
8. Gieniusz R., Maziewski A., Guzowska U., Gruszecki P., Kłos J., Krawczyk M., Stognij A. Spin Wave Optics in Patterned Garnet. Demokritov S. (ed.) *Spin Wave Confinement: Propagating Waves*. Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., 2017, pp. 139–170.
9. Fedosyuk V. M. Nanoclustered films and nanowires. Tsakolacos T., Ovid'ko I. A. (eds.). *Synthesis, functional properties and applications of nanostructures*. Kluwer Academic Publishers, 2003, pp. 557–578.
10. Fedosyuk V. M., Tochitskii T. A., Sharko S. A. Multilayered nanowires of spin-valve type. *Perspektivnye Materialy* [Promising Materials], 2002, no. 4, pp. 74–78 (in Russian).
11. Fedosyuk V. M., Sharko S. A. Structure, magnetic and magnetoresistive properties of spin-valve type nanowires. *Metallofizika i noveishie tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technologies], 2003, no. 6, pp. 713–723 (in Russian).
12. Fedosyuk V. M. *Nanostructured films and nanowires*. Minsk, Publishing Center BSU, 2006. 310 p. (in Russian).
13. Grabchikov S. S., Erofeenko V. T., Vasilenkov N. A., Trukhanov A. V., Solobai A. A. Effectiveness of magnetostatic shielding by the cylindrical shells. *Vestsi Natsyyanal'най akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2015, no. 4, pp. 107–114 (in Russian).
14. Grabchikov S. S., Trukhanov A. V., Trukhanov S. V., Kazakevich I. S., Solobay A. A., Erofeenko V. T., Vasilenkov N. A., Volkova O. S., Shakin A. Effectiveness of the magnetostatic shielding by the cylindrical shells. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, vol. 398, pp. 49–53. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.08.122>
15. Kanyukov E. Yu., Kozlovskiy A. L., Shlimas D. I., Zdorovets M. V., Yakimchuk D. V., Shumskaya E. E., Kadyrzhanov K. K. Electrochemically deposited copper nanotubes. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2017, vol. 11, iss. 1, pp. 270–275. <https://doi.org/10.1134/S1027451017010281>
16. Kozlovskiy A. L., Shlimas D. I., Shumskaya A. E., Kaniukov E. Yu., Zdorovets M. V., Kadyrzhanov K. K. Influence of Electrodeposition Parameters on Structural and Morphological Features of Ni Nanotubes. *Physics of Metals and Metallography*, 2017, vol. 118, iss. 2, pp. 164–169. <https://doi.org/10.1134/S0031918X17020065>
17. Govor G. A., Vecher A. K., Yanushkevich K. I. The peculiarities of magnetic characteristics of new composite materials based on iron powders. Klubovich V. V. (ed.) *Promising materials and technologies. Vol. 2*. Vitebsk, Vitebsk State Technological University, 2017, pp. 278–299 (in Russian).
18. Trukhanov A. V., Grabchikov S. S., Sharko S. A., Trukhanov S. V., Trukhanova K. L., Volkova O. S., Shakin A. Magnetotransport properties and calculation of the stability of GMR coefficients in CoNi/Cu multilayer quasi-one-dimension structures. *Materials Research Express*, 2016, vol. 3, no. 6, pp. 2317–2323. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/3/6/065010>

Информация об авторе

Федосюк Валерий Михайлович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор физико-математических наук, генеральный директор, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: fedosyuk@physics.by

Information about the author

Valeri M. Fedosyuk – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Physics and Mathematics), General Director, Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: fedosyuk@physics.by

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
УДК 621.671/673
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-150-160>

Поступила в редакцию 20.10.2017
Received 20.10.2017

А. Ф. Ильющенко

Институт порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕЦИАЛЬНЫХ ПОРОШКОВ И МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

Аннотация. Приводятся результаты исследования характеристик специальных порошков металлических сплавов и материалов, полученных из этих порошков методом селективного лазерного сплавления (SLM), в том числе данные сравнительного анализа характеристик порошков, изготовленных по технологии VIGA с использованием установки вакуумной индукционной плавки. Отмечается важность проведения комплекса исследований, включающего не только статистическую оценку распределения частиц порошков по размерам (предпочтительно методом дифракции лазерного излучения), но и анализ изображений, который позволяет получать информацию о форме частиц, определяющей текучесть порошков. Показано, что распределение по размерам и фактор формы порошков никелевых жаропрочных сплавов и нержавеющей стали, полученных в Институте порошковой металлургии НАН Беларуси, находятся на уровне лучших зарубежных аналогов. Рассмотрено влияние химического состава порошков на механические свойства образцов, изготовленных методом SLM. Наличие кислорода и нежелательных примесей, как правило, приводит к снижению прочности и относительного удлинения формируемых образцов. Отмечается, что данный метод предоставляет исключительно широкие возможности для формирования сложных геометрических структур с близкой к теоретической плотностью. Последующая термическая или термомеханическая обработка позволяет снимать напряжения, возникающие в процессе SLM, доуплотнять изделия (при необходимости) и регулировать их структуру и свойства. Показана перспективность применения метода дифракции обратно-рассеянных электронов (ДОЭ) для анализа эволюции структуры материалов в процессе SLM и последующей обработки. Отмечается, что изделия, полученные методом SLM из порошков специальных сплавов, демонстрируют механические свойства на уровне, а в ряде случаев превышающие свойства этих сплавов, полученных традиционными и другими аддитивными технологиями.

Ключевые слова: специальные порошки, аддитивные технологии, текучесть порошков, селективное лазерное сплавление

Для цитирования. Ильющенко, А. Ф. Исследование характеристик специальных порошков и материалов, полученных методом селективного лазерного сплавления / А. Ф. Ильющенко // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – Т. 63, № 2. – С. 150–160. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-150-160>

A. Ph. Ilyshchanka

Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS OF SPECIAL POWDERS AND MATERIALS PRODUCED BY MEANS OF SELECTIVE LASER MELTING

Abstract. The article presents the results of characterization of special powders of metal alloys and materials produced from these powders by selective laser melting (SLM), including comparative analysis of powders produced using VIGA technology. It is noted the importance of a complex study that includes not only a statistical evaluation of particle size distribution of the powders (preferably, by the method of laser diffraction), but also image analysis providing information on the particles' shape influencing the powders' flowability. It is shown that the size distribution and shape metrics for nickel refractory alloys and stainless steel powders obtained at the Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus are at the level of the best foreign analogues. The influence of powder chemical composition on the mechanical properties of SLM samples is considered. The presence of oxygen and undesirable impurities, as a rule, decreases the strength and tensile strain. It is noted that SLM provides extremely wide opportunities for the formation of complex geometric structures with close to full density. Subsequent thermal or thermal and mechanical processing allows reduction of stresses arising during the SLM, densification of products (if necessary) and regulation of their structure and properties. The prospects of applying the back-

scattered electron diffraction (EBSD) for analysis of the material structure evolution during SLM and subsequent processing are shown. It is noted that products obtained by the SLM from the powders of special alloys exhibit mechanical properties at a level, and in some cases even exceeding the properties of these alloys produced by traditional and other additive technologies.

Keywords: special powders, additive technologies, flow rate of powder, selective laser melting

For citation. Ilyshchanka A. Ph. Investigation of characteristics of special powders and materials produced by means of selective laser melting. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 2, pp. 150–160 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-150-160>

Введение. Селективное лазерное сплавление (Selective Laser Melting – SLM) является одной из наиболее распространенных технологий послойного выращивания изделий, предоставляющей исключительно широкие возможности для изготовления сложных геометрических структур [1–5]. Сущность процесса заключается в послойном селективном сканировании лазером поверхности платформы, заполненной свободно насыпанным порошком, вследствие чего происходит сплавление частиц между собой и с нижележащим материалом. Технологические особенности процесса определяют очень жесткие требования к размерам частиц, морфологии и химическому составу используемых порошков, а высокие скорости нагрева и охлаждения, однонаправленный тепловой поток, повторяющиеся циклы нагрева и охлаждения обуславливают формирование текстуры и высокие напряжения в формируемых изделиях, приводя к необходимости проведения последующей термической обработки [1–8].

Целью настоящей работы является исследование характеристик специальных порошков металлических сплавов и материалов, полученных из порошков методом SLM.

Анализ характеристик порошков для SLM. Принято считать, что основными характеристиками, обеспечивающими возможность достижения близкой к теоретической плотности порошковых изделий, получаемых платформенными аддитивными методами, являются сферическая форма частиц и оптимизация распределения частиц по размерам под конкретную технологию [9]. Большая часть металлических порошков, используемых для SLM, находится в диапазоне размеров от 20 до 60 мкм, что и должно обеспечивать возможность формирования равномерно гладкого слоя требуемой толщины. Такие тонкие порошки характеризуются невысокой текучестью, поэтому для улучшения этого параметра, как правило, используются порошки формы, близкой к сферической.

Традиционный ситовый анализ затруднен и не обеспечивает достаточной воспроизводимости результатов для порошков размером менее 45 мкм. Кроме того, размер частиц, определяемый по размеру ячейки сита, не коррелирует с формой частиц, например, при просеивании частиц вытянутой формы, что может служить источником ошибок. Благодаря высокой скорости и производительности метод дифракции лазерного излучения является в настоящее время основным для анализа распределения частиц порошков по размерам. Однако результаты расчетов аппроксимируются эквивалентным диаметром сферических частиц и не учитывают реальной формы частиц. Поэтому ведущие фирмы – производители порошков для SLM наряду с применением лазерных анализаторов размеров частиц используют анализ изображений, позволяющий получать информацию о форме порошковых частиц.

В [10] представлены результаты сравнительного анализа двух промышленных порошков сплава AlSi10Mg, полученных двумя различными методами распыления расплава газовой струей. По данным лазерной дифракции, оба порошка имеют приблизительно одинаковое распределение по размерам (рис. 1), однако порошок первой партии (партия 1) демонстрирует текучесть порядка 80 с, в то время как порошок второй партии (партия 2) не течет через воронку стандартного размера (табл. 1). Это различие объясняется сравнительным анализом формы частиц, представленным в табл. 2.

Таким образом, основными контролируемыми характеристиками порошков для SLM являются распределение частиц по размерам, форма и текучесть порошков с обязательным анализом изображений частиц.

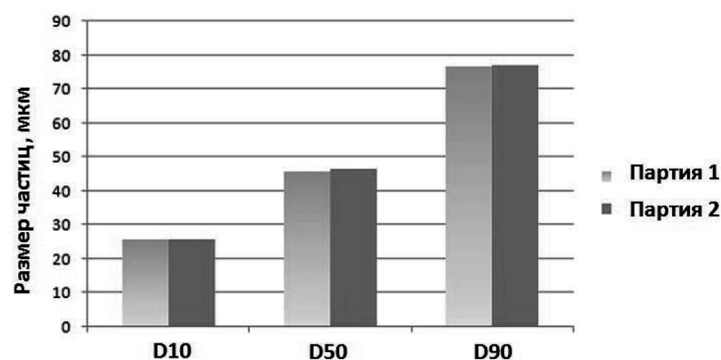


Рис. 1. Результаты определения размера частиц промышленных порошков сплава AlSi10Mg методом лазерной дифракции (D10 – 10 % частиц имеют размер менее указанного; D50 – 50 % частиц имеют размер менее указанного; D90 – 90 % частиц имеют размер менее указанного)

Fig. 1. Results of particle size determination of industrial powders of AlSi10Mg alloy by laser diffraction (D10 – 10 % of the particles have a size smaller than that indicated, D50 – 50 % of the particles have a size smaller than that indicated, D90 – 90 % of the particles have a size less than specified)

Таблица 1. Результаты определения текучести промышленных порошков сплава AlSi10Mg

Table 1. Results of flow rate determination of industrial powders of AlSi10Mg alloy

Тест №	Текучесть, с	
	партия 1	партия 2
Тест 1	80,8	Не течет
Тест 2	79,3	Не течет
Тест 3	79,9	Не течет
Среднее значение	80,0	Не течет

Таблица 2. Результаты анализа формы частиц промышленных порошков сплава AlSi10Mg

Table 2. Analysis results of the particle shape of industrial powders of AlSi10Mg alloy

Значение	Расчет по параметру «удлинение» (Elongation)		Расчет по параметру «сферичность» (HS Circularity)		Расчет по параметру «выпуклость» (Convexity)	
	партия 1	партия 2	партия 1	партия 2	партия 1	партия 2
Минимальное	0	0	0,189	0,162	0,755	0,694
Максимальное	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0
Среднее	0,122	0,154	0,943	0,933	0,996	0,996
D10	0	0,014	0,84	0,818	0,964	0,973
D50	0,09	0,113	0,962	0,962	0,992	0,994
D90	0,288	0,361	0,992	0,992	0,997	0,998

Для разработки и исследования процессов получения порошков для SLM в Институте порошковой металлургии НАН Беларуси смонтирована и запущена в эксплуатацию установка вакуумной индукционной плавки и распыления расплава инертным газом (технология VIGA) JT-QWH-25KG (рис. 2). Основные технические характеристики установки представлены в табл. 3.

На рис. 3 показана морфология порошков никелевого жаропрочного сплава Inconel 718 и нержавеющей стали 316 L, полученных в Институте порошковой металлургии НАН Беларуси на указанной установке по технологии VIGA. На рис. 4 представлена гистограмма распределения частиц распыленного порошка Inconel 718 фракции +5–40 мкм по размерам, а в табл. 4 суммированы результаты определения размера и формы частиц распыленного порошка сплава Inconel 718 в зависимости от фракции.



Рис. 2. Установка вакуумной индукционной плавки и распыления расплава инертным газом марки JT-QWH-25KG

Fig. 2. Equipment for vacuum induction melting and inert gas atomization JT-QWH-25KG

Таблица 3. Основные технические характеристики установки JT-QWH-25KG
Table 3. The main technical specifications of JT-QWH-25KG

Параметр	Значение
Объем загрузки	25 кг (для стали)
Мощность и частота индукционного нагревателя	100 кВт, 4 кГц
Температура в раздаточном тигле	1200–1700 °С
Рабочее давление вакуума, не более	0,66 Па
Максимальное давление в распылительной камере	6 МПа
Температура в плавильном тигле	≤ 2200 °С
Газы, используемые для распыления	Ar, N ₂

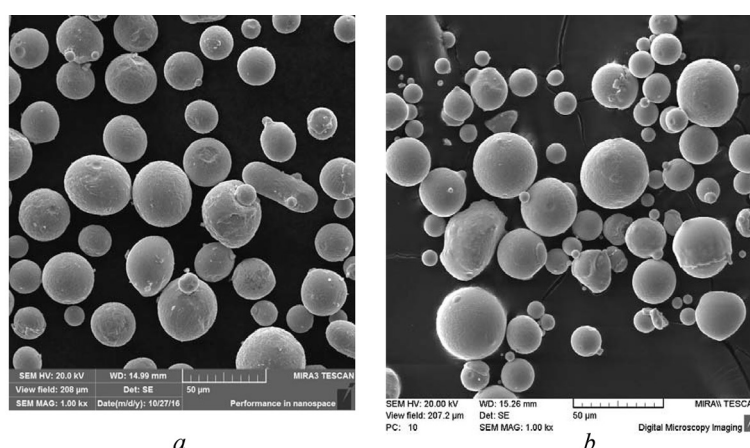


Рис. 3. Морфология распыленных порошков никелевого жаропрочного сплава и нержавеющей стали, полученных по технологии VIGA в Институте порошковой металлургии НАН Беларуси: *a* – Inconel 718, фракция +5–40 мкм; *b* – 316 L, фракция –40 мкм

Fig. 3. Morphology of atomized powders of nickel refractory alloy and stainless steel produced by VIGA technology at the Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus: *a* – Inconel 718, fraction + 5–40 μm; *b* – 316 L, fraction – 40 μm

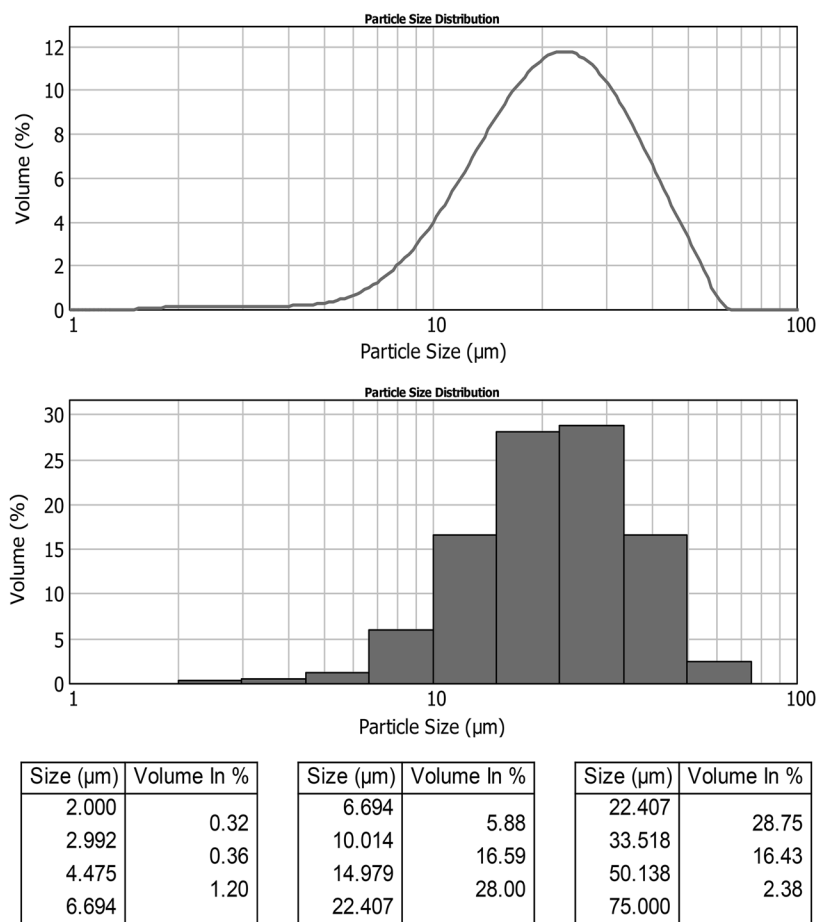


Рис. 4. Распределения частиц распыленного порошка Inconel 718 фракции +5–40 мкм по размерам
 Fig. 4. The particle distributions of the atomized Inconel 718 powder of fraction +5–40 μm in size

Таблица 4. Результаты определения формы и размеров частиц распыленных порошков никелевого жаропрочного сплава Inconel 718, полученных по технологии VIGA в Институте порошковой металлургии НАН Беларуси

Table 4. Results of shape and particle size determination of atomized powders of the nickel refractory Inconel 718 alloy produced by VIGA technology at the Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus

Параметры формы и размеров частиц порошков	Фракция, мкм		
	+5–40	+40–63	+63–100
D10, мкм	12,9–20,8	37,8–41,0	61,7–69,4
D50, мкм	25,7–30,5	50,8–55,8	84,6–95,2
D90, мкм	42,8–49,5	67,7–76,6	116,6–130,8
Фактор формы	0,91–0,92	0,86–0,88	0,82–0,83

Анализ полученных результатов показывает, что распределение по размерам и фактор формы полученных порошков находятся на уровне лучших зарубежных аналогов.

Еще одной важной характеристикой порошков для SLM является их химический состав. В [11] представлены сравнительные результаты селективного лазерного сплавления порошков нержавеющей стали 316 L, полученных распылением инертным газом (рис. 5, а) и водой (рис. 5, б). Кроме несферической формы, обуславливающей более низкую текучесть и насыпную плотность, в распыленных водой порошках содержится больше кислорода и нежелательных примесей (табл. 5). Это сказывается на механических свойствах формируемых изделий, в первую очередь

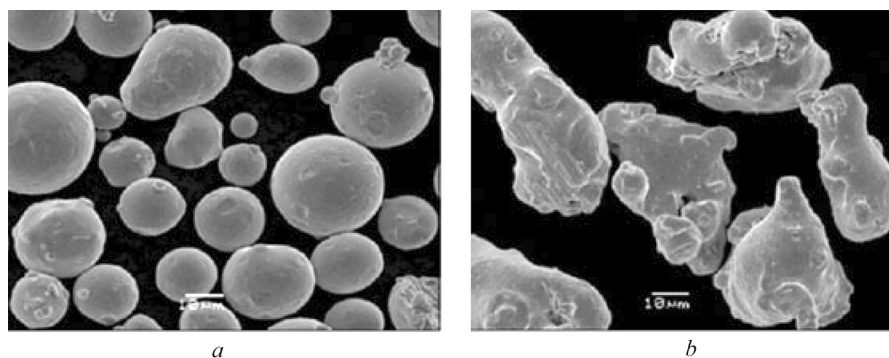


Рис. 5. Морфология поверхности порошков нержавеющей стали 316 L, полученных распылением инертным газом (а), водой (b) [11]

Fig. 5. Surface powder morphology of 316 L stainless steel produced by atomizing with inert gas (a), water (b) [11]

временном сопротивлении и относительном удлинении. Даже после модифицирования параметров SLM основные механические свойства образцов, полученных из порошков более низкого качества, остаются чуть ниже (табл. 6).

Для разработки технологий изготовления и организации производства методом SLM образцов и изделий для аэрокосмической и специальной техники в Институте порошковой металлургии НАН Беларуси смонтирован и запущен в эксплуатацию металлургический 3D-принтер для селективного лазерного сплавления металлических порошков (рис. 6).

Таблица 5. Химический состав порошков нержавеющей стали 316 L [11]

Table 5. Chemical composition of 316 L stainless steel powders [11]

Способ получения	Содержание, мас.%											
	C	S	O	N	P	Mo	Si	Cr	Ni	Cu	Mn	Fe
Распыление газом	0,026	0.006	0.042	0,094	0.02	2,30	0,50	17,10	12,87	0,14	1,31	65,60
Распыление водой	0,012	0,011	0,360	0,025	0,02	2,33	0,89	17,25	12,86	0,03	0,07	66,15

Таблица 6. Механические свойства образцов, полученных селективным лазерным сплавлением порошков нержавеющей стали 316 L [11]

Table 6. Mechanical properties of samples produced by Selective Laser Melting of 316 L stainless steel powders [11]

Способ распыления	Механические свойства				
	E , ГПа	$\sigma_{0,2}$, ГПа	σ_B , ГПа	δ , %	HRB
Газом	147±14	483±26	624±10	34±1	94
Водой	150±9	475±16	611±7	32±3	89



Рис. 6. Внешний вид 3D-принтера ProX DMP 300 (а), рабочая платформа принтера с образцами построенных деталей (b)

Fig. 6. 3D printer ProX DMP 300 (a), working platform of the printer with samples of the built parts (b)

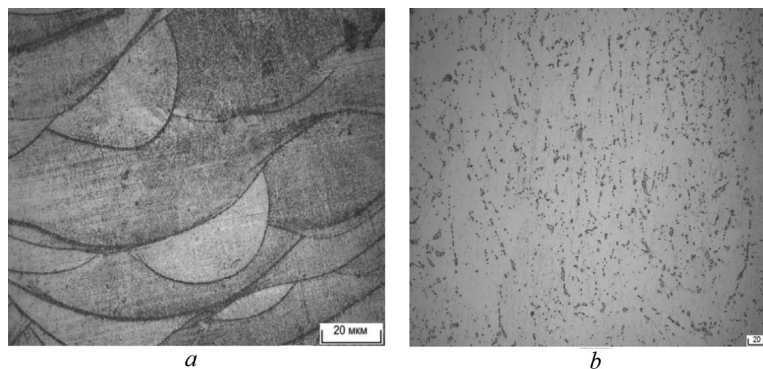


Рис. 7. Оптические микрофотографии поперечного сечения SLM-образца из порошка жаропрочного никелевого сплава Inconel 718 до (a) и после (b) ГИП
 Fig. 7. Optical micrographs of the cross-section of the SLM sample made of powder of Inconel 718 refractory nickel alloy before HIP (a) and after HIP (b)

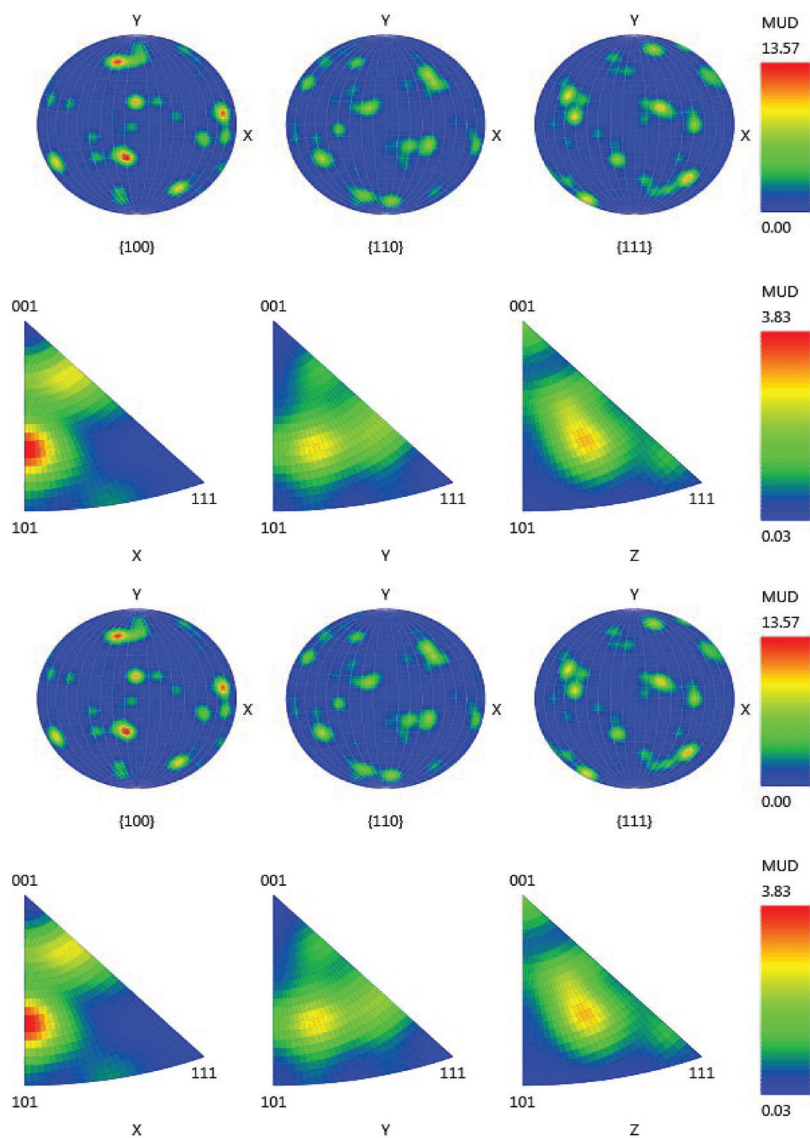


Рис. 8. Прямая и обратная полюсные фигуры для γ -твердого раствора на основе Ni с г.к.к. решеткой в SLM-образце из никелевого жаропрочного сплава Inconel 718
 Fig. 8. Direct and reverse pole figures for the γ -solid solution based on Ni with fcc lattice in SLM sample made of Inconel 718 nickel refractory alloy

Следует отметить, что при селективном лазерном сплавлении большинства металлических сплавов, включая высоколегированные жаропрочные сплавы, возможно достижение плотности порядка 95–99 % (в некоторых случаях – до 100 %) от теоретической. Однако для снятия напряжений, возникающих в процессе обработки, доуплотнения (при необходимости) и обеспечения высоких механических свойств, как правило, требуется последующая термическая либо термо-механическая обработка изделий после SLM. Для титановых сплавов применяют термическую обработку в вакуумной печи или в среде инертного газа [12] либо используют горячее изостатическое прессование (ГИП). Для никелевых жаропрочных сплавов, как правило, применяют ГИП с последующим старением [13].

На рис. 7 представлена микроструктура SLM-образца из распыленного порошка жаропрочного никелевого сплава Inconel 718 до и после ГИП. Последующая обработка образцов методом ГИП позволила не только обеспечить рекристаллизацию и формирование однородной структуры, характерной для порошковых материалов, получаемых методом ГИП, но и повысить плотность SLM-образцов до теоретической.

Более детальную информацию о фазовых и структурных превращениях в SLM-образцах до и после обработки можно получить с помощью метода дифракции обратно-рассеянных электронов (ДОЭ). В частности, анализ прямых и обратных полюсных фигур (рис. 8) позволяет определить направление преимущественной ориентации зерен относительно направления построения, которое в данном случае соответствует (100). Сравнительный анализ карт ДОЭ (рис. 9) является

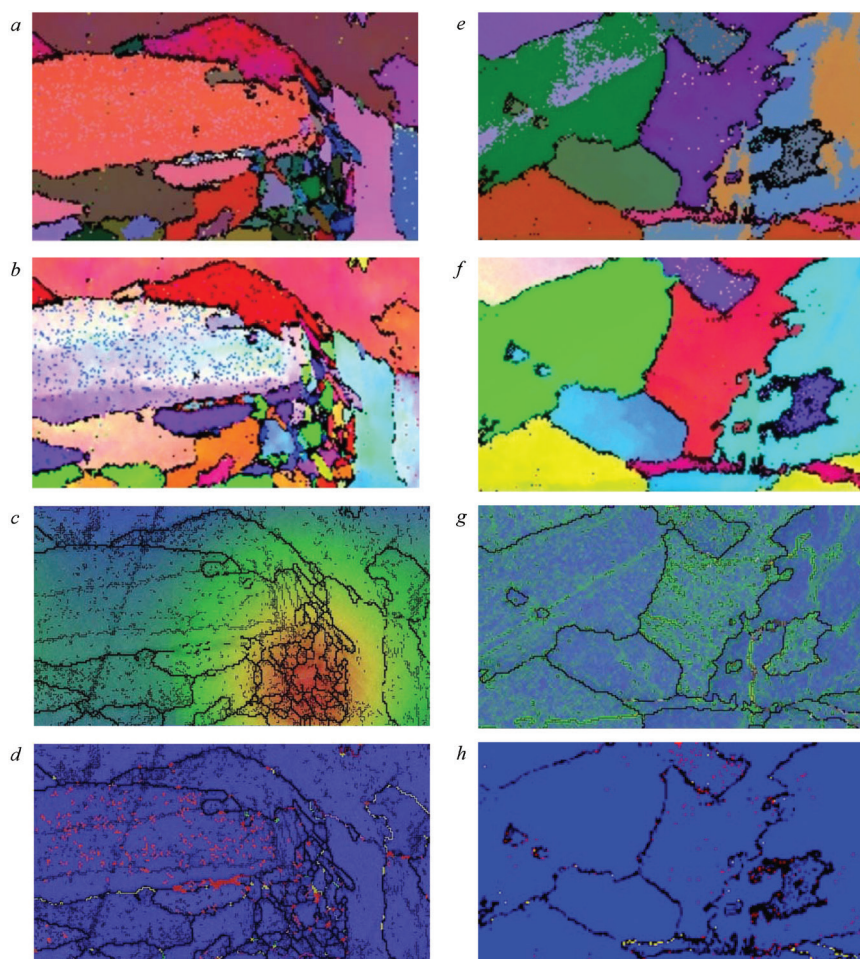


Рис. 9. Карты ДОЭ SLM-образца из никелевого жаропрочного сплава Inconel 718 до (*a–d*) и после ГИП (*e–h*): *a, e* – цвета Эйлера; *b, f* – разориентация кристаллов относительно плоскости Z; *c* – внутренние напряжения + границы зерен; *g* – локальные деформации + границы зерен; *d, h* – распределение фаз + границы зерен

Fig. 9. DOE maps of the SLM sample made of Inconel 718 nickel refractory alloy before HIP (*a–d*) and after HIP (*e–h*): Euler colors (*a, e*), misorientation of the crystals with respect to Z plane (*b, f*), internal stresses + grain boundaries (*c*), local deformations + grain boundaries (*g*), phase distribution + grain boundaries (*d, h*)

полезным для контроля процессов рекристаллизации, выявления областей с повышенной локальной деформацией и др.

В табл. 7 представлены сравнительные механические свойства изделий из наиболее широко применяемых в настоящее время в аддитивных технологиях металлических сплавов [14].

Таблица 7. Механические свойства изделий из наиболее широко применяемых в настоящее время в аддитивных технологиях металлических сплавов [14]

Table 7. Mechanical properties of products made of the most widely used metal alloys at present time in additive technologies [14]

Материал	Процесс	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
Ti6Al4V	Горячее деформирование	951	883	14
	LMD*	1160	1160	6
	EBM**	1020	950	14
	SLM	1100	1000	8
	LENS***	1077	973	11
Inconel 718	Горячее деформирование	1407	1172	21
	LENS	1393	1117	15,8
	EBM	1238	1154	7
Inconel 625	LENS	938	548	38
17-4SS	SLM	1050	540	25
Сплав Co–Cr	EBM	960	560	20
Сплав Co–Cr–Mo	SLM	1350–1450	910–1010	9–13
316SS	Горячее деформирование	579	290	50
	LENS	655	278	66,5
	LMD	579	296	41

* LMD – объемная лазерная наплавка.

** EBM – электронно-лучевое сплавление.

*** LENS – объемная лазерная наплавка на оборудовании с торговой маркой LENSTM – Laser Engineered Net Shaping.

Как видно из таблицы, метод селективного лазерного сплавления обеспечивает возможность достижения механических свойств изделий из специальных сплавов на уровне, а в ряде случаев превышающих свойства этих сплавов, полученных традиционными и другими аддитивными технологиями.

Заключение. Метод селективного лазерного сплавления является перспективной технологией лазерной консолидации порошков металлических сплавов и обеспечивает широкие возможности создания сложных геометрических структур при близких к теоретической плотностях и высоких механических свойствах формируемых изделий. Технологические особенности метода требуют тщательного контроля характеристик исходных порошков, включающих форму и распределение частиц по размерам, текучесть и химический состав. Дополнительная термическая либо термомеханическая обработка консолидированных образцов позволяет снизить уровень термических напряжений, обусловленных особенностями процесса, повысить плотность и контролировать структуру, а следовательно, и свойства формируемых материалов.

Список использованных источников

1. Ильющенко, А. Ф. Современное состояние порошковой металлургии в Западной Европе: тенденции и перспективы / А. Ф. Ильющенко, В. В. Савич // Порошковая металлургия: сб. науч. тр. – Минск, 2015. – Вып. 38. – С. 7–18.
2. Ильющенко, А. Ф. Эффективный инструмент современного машиностроения / А. Ф. Ильющенко // Наука и инновации. – 2016. – № 2. – С. 16–21.

3. Ильющенко, А. Ф. Порошковая металлургия – одна из первых аддитивных технологий / А. Ф. Ильющенко, В. В. Савич // Аддитивные технологии, материал и конструкции: материалы науч.-техн. конф., Гродно, 6–10 окт. 2016 г. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: А. И. Свириденко (гл. ред.) [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2016. – С. 20–30.
4. Ильющенко, А. Ф. Аддитивные технологии и перспективы их развития в ГНУ «Институт порошковой металлургии» / А. Ф. Ильющенко // Сборник докладов Международного научно-практического симпозиума, Минск, 24 мая 2017 г. / Нац. акад. наук Беларуси; редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2017. – С. 51–65.
5. Dawes, J. Introduction to the additive manufacturing powder metallurgy supply chain / J. Dawes, R. Bowerman, R. Trepleton // *Johnson Matthey Technol. Rev.* – 2015. – Vol. 59, № 3. – P. 243–256. <https://doi.org/10.1595/205651315x688686>
6. Kippax, P. Size and shape optimisation of metal powders for additive manufacturing / P. Kippax, R. Deffley // *Metal Additive Manufacturing.* – 2015. – Vol. 1, № 3. – P. 75–78.
7. Hoeges, S. Additive manufacturing using water atomised steel powders / S. Hoeges, A. Zwiren, C. Schade // *Metal Power Report.* – 2017. – Vol. 72, iss. 2. – P. 111–117. <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2017.01.004>
8. Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties / B. Vrancken [et al.] // *J. of Alloys and Compounds.* – 2012. – Vol. 541. – P. 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.07.022>
9. Hot isostatic pressing of IN718 components manufactured by selective laser melting / W. Tillmann [et al.] // *Additive Manufacturing.* – 2017. – Vol. 13. – P. 93–102. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.11.006>
10. Hegab, H. A. Design for additive manufacturing of composite materials and potential alloys / H. A. Hegab // *Manufacturing Rev.* – 2016. – Vol. 3. – P. 1–17. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2016010>
11. Singh, S. Material issues in additive manufacturing: A review / S. Singh, S. Ramakrishna, R. Singh // *J. of Manufacturing Processes.* – 2017. – Vol. 25. – P. 185–200. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.11.006>
12. Heynick, M. Additive manufacturing of metals: a review [Electronic resource] / M. Heynick // *Materials Science and Technology (MS&T) 2011, October 16–20, 2011, Columbus, Ohio.* – Mode of access: <https://www.asminternational.org/documents/10192/23826899/cp2011mstp1413.pdf/04f142d0-f1ca-44d4-8a10-891992e5529a> – Date of access: 19.10.2017.
13. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms / D. Gu [et al.] // *Inter. Mater. Rev.* – 2012. – Vol. 57, № 3. – P. 137–164. <https://doi.org/10.1179/1743280411y.0000000014>
14. Frazier, W. E. Metal Additive Manufacturing: A Review / W. E. Frazier // *J. Mater. Eng. Performance.* – 2014. – Vol. 23, № 6. – P. 1917–1928. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>

References

1. Il'yushchenko A. F., Savich V. V. Current state of powder metallurgy in Western Europe: trends and prospects. *Poroshkovaya metallurgiya: sbornik statei* [Powder metallurgy: collection of scientific papers]. Minsk, 2015, iss. 38, pp. 7–18 (in Russian).
2. Il'yushchenko A. F. Effective tool of modern engineering. *Nauka i innovatsii = Science and Innovations*, 2016, no. 2, pp. 16–21 (in Russian).
3. Il'yushchenko A. F., Savich V. V. Powder metallurgy is one of the first additive technologies. *Additivnye tekhnologii, material i konstruksii: materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Grodno, 5–6 oktyabrya 2016 g.* [Additive technologies, materials and constructions: materials of the scientific and technical conference, Grodno, October 6–10, 2016]. Grodno, Grodno State University Publ., 2016, pp. 20–30 (in Russian).
4. Il'yushchenko A. F. Additive technologies and prospects for their development in the State Scientific Institution “Powder Metallurgy Institute”. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo simpoziuma, Minsk, 24 maya 2017 g.* [Collection of reports of the International Scientific and Practical Symposium, Minsk, May 24, 2017]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017, pp. 51–65 (in Russian).
5. Dawes J., Bowerman R., Trepleton R. Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain. *Johnson Matthey Technology Review*, 2015, vol. 59, no. 3, pp. 243–256. <https://doi.org/10.1595/205651315x688686>
6. Kippax P., Deffley R. Size and shape optimisation of metal powders for additive manufacturing. *Metal Additive Manufacturing*, 2015, vol. 1, no. 3, pp. 75–78.
7. Hoeges S., Zwiren A., Schade C. Additive manufacturing using water atomised steel powders. *Metal Power Report*, 2017, vol. 72, iss. 2, pp. 111–117. <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2017.01.004>
8. Vrancken B., Thijs L., Kruth J.-P., Humbeeck J. V. Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, vol. 541, pp. 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.07.022>
9. Tillmann W., Schaak C., Nellesen J., Schaper M., Aydinöz M.E., Hoyer K.-P. Hot isostatic pressing of IN718 components manufactured by selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 2017, vol. 13, pp. 93–102. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.11.006>
10. Hegab H. A. Design for additive manufacturing of composite materials and potential alloys. *Manufacturing Review*, 2016, vol. 3, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2016010>
11. Singh S., Ramakrishna S., Singh R. Material issues in additive manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, vol. 25, pp. 185–200. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.11.006>

12. Heynick, M. Additive manufacturing of metals: a review. *Materials Science and Technology (MS&T) 2011 October 16–20, 2011, Columbus, Ohio*. Available at: <https://www.asminternational.org/documents/10192/23826899/cp2011mstp1413.pdf/04f142d0-f1ca-44d4-8a10-891992e5529a> (Accessed 19 October 2017).

13. Gu D. D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*, 2012, vol. 57, no. 3, pp. 137–164. <https://doi.org/10.1179/1743280411y.0000000014>

14. Frazier W. E. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, vol. 23, no. 6, pp. 1917–1928. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>

Інфармацыя аб аўторе

Ільющенко Александр Федорович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, директор, Институт порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Alexil@mail.belpak.by

Information about an author

Alyaksandr Ph. Ilyuschanka – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Director, Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Alexil@mail.belpak.by

ISSN 1561-8358 (Print)
 ISSN 2524-244X (Online)
 УДК 621.691
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-161-168>

Поступила в редакцию 07.12.2017
 Received 07.12.2017

Н. А. Руденская¹, М. В. Руденская²

¹Филиал Белорусского национального технического университета «ИПК и ПК», Минск, Беларусь
²Санкт-Петербургское открытое акционерное общество «Красный Октябрь»,
 Санкт-Петербург, Россия

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ДЕЛЕНИЯ ОКСИДНЫХ СФЕРОИДОВ В ПЛАЗМЕННОМ ПОТОКЕ НА СТРУКТУРУ ПОКРЫТИЙ

Аннотация. Цель данной части исследований состояла в изучении структурных превращений при переходе частиц-микрокомпозитов из плазменного потока в напыленный слой с учетом измельчения сфероидов. Представлены результаты исследований импульсного деления оксидных сфероидов в плазменном потоке, гранулометрического состава микрокомпозитов двух составов: $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$, $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ с исходным размером частиц 40–50 мкм, 50–63, 63–71 мкм и структуры плазменных покрытий из них. Процесс импульсного деления сфероидов в плазменном потоке обнаружен во всех исследуемых композициях и наиболее интенсивен в системах: $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ (с исходным размером частиц 40–50 мкм и 50–63 мкм), $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (с исходным размером частиц 40–50 мкм). Изучены особенности формирования структурных фрагментов покрытий различной формы (сфероидизированных и оплавленных) и состава (полностью аморфизированных; с многослойными оболочками, в том числе аморфными). Показано, что предлагаемая технология позволяет получать керамические покрытия с аморфно-кристаллической структурой. Особенности этой структуры определяются размером и составом исходных микрокомпозитов, измельчение которых непосредственно в процессе напыления позволяет формировать в покрытиях более тонкие структуры и, соответственно, существенно изменять их эксплуатационные характеристики и качество (высокая адгезионная прочность; износостойкость в 3 раза выше, чем у покрытий из корунда; пористость – менее 1 %).

Ключевые слова: плазма, структура, покрытие, сфероиды, импульсное деление, сфероидизация, аморфизация

Для цитирования. Руденская, Н. А. Влияние импульсного деления оксидных сфероидов в плазменном потоке на структуру покрытий / Н. А. Руденская, М. В. Руденская // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2018. – Т. 63, № 2. – С. 161–168. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-161-168>

N. A. Rudenskaya¹, M. V. Rudenskaya²

¹Branch of the Belarusian National Technical University “IPK and PC”, Minsk, Belarus
²“Krasny Octiabr” St.-Petersburg Open Joint-Stock Company, Saint Petersburg, Russia

INFLUENCE OF PULSED DIVISION OF OXIDE SPHEROIDS IN A PLASMA FLOW UPON THE STRUCTURE OF COATINGS

Abstract. The purpose of this part of the research was to study the structural transformations at the transition of particle-microcomposites from plasma flow into sprayed layer, taking into account grinding of spheroids. The results of investigations of the impulse fission of oxide spheroids in a plasma flow, the granulometric composition of microcomposites of two compositions: $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$, $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ with an initial particle size of 40–50 μm , 50–63, 63–71 μm and the structure of plasma coatings from them are presented. The process of pulsed fission of spheroids in a plasma stream is found in all the compositions under study and is most intensive in systems of: $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ (with initial particle size of 40–50 μm and 50–63 μm), $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (with initial particle size 40–50 μm). The features of the formation of structural fragments of coatings of various shapes (spheroidized and melted) and composition (completely amorphous, with multilayer shells, including amorphous ones) are studied. It is shown that the proposed technology makes it possible to obtain ceramic coatings with amorphous-crystalline structure, which features are determined by size and composition of initial microcomposites grinding of them directly in the sputtering process allows formation of finer structures in the coatings and, accordingly, significantly changing their performance characteristics and quality (adhesion strength, wear resistance is 3 times higher than that of corundum coatings, porosity is less than 1 %).

Keywords: plasma, structure, coating, spheroids, pulse division, spheroidization, amorphization

For citation. Rudenskaya N. A., Rudenskaya M. V. Influence of pulsed division of oxide spheroids in a plasma flow upon the structure of coatings. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 3, pp. 161–168 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-161-168>

Введение. Керамические материалы, содержащие оксиды титана, кремния, алюминия, циркония, находят широкое применение в практике газотермического напыления [1–5].

Процесс формирования структуры плазменных покрытий определяется многими параметрами, одним из которых является размер частиц напыляемых порошков. Попадая в поток плазмы, частицы оплавляются или расплавляются, сфероидизируются, измельчаются. И эти особенности, как правило, скрыты от исследователей. Ранее одним из авторов данной статьи с сотрудниками уже описывалось явление импульсного деления сфероидов в плазменном потоке, позволяющее совместить диспергирование частиц с их напылением [6]. Целью данной части исследований состояла в изучении изменения фракционного состава оксидных порошков $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2$, $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ дисперсностью 40–50 мкм, 50–63, 63–71 мкм при обработке их в плазменном потоке и влиянии этого процесса на структуру плазменных покрытий из данных композиций.

Экспериментальная часть. Материалами для исследований послужили конгломерированные в потоке ионизированного газа порошки различной дисперсности из оксидов $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2$, $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ и плазменные покрытия из этих микрокомпозитов. Плазменную обработку микрокомпозитов при естественном их охлаждении и с ускоренным охлаждением (при распылении в воду) проводили на установке УПС-1 конструкции Института металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН с секционированным генератором. Покрытия наносили на стальные образцы (Ст. 3) на установке ВБ-15, оснащенной плазмотроном, работающим на смеси воздух – природный газ. Перед нанесением покрытий поверхность образцов тщательно обезжиривали и подвергали дробеструйной обработке. Затем наносили подслои из Ni–Al или Ni–Cr толщиной 40–50 мкм, а затем – основной слой толщиной 1 мм. Микроструктуру покрытий изучали металлографическим (Neophot-21) и микрорентгеноспектральным (LEO 1455 VP) методами.

При обработке в плазменном потоке частицы приобретают сферическую форму. Вслед за сфероидизацией реализуется процесс импульсного деления сфероидов. Сущность этого процесса заключается в периодическом выделении из базовой частицы, прошедшей стадию сфероидизации в высокотемпературной зоне плазменного потока, за счет конвективного движения расплавленной массы, более дисперсных сфероидов [6]. При этом на одном полюсе базовой частицы образуется воронка, а на противоположном полюсе появляется дочерний сфероид

(рис. 1). Гранулометрический состав порошков, обработанных в плазме, существенно изменяется: появляется значительная доля ультрадисперсной составляющей. Если реализовать процесс транспортировки исходных ультрадисперсных частиц в плазменный поток на практике с гарантированием высокого качества покрытий чрезвычайно сложно, то в предлагаемом технологическом варианте диспергированный материал с большим коэффициентом использования осаждается на поверхность детали.

Ранее показано (Патент РФ № 2191217 «Износостойкое покрытие»), что существует возможность диспергирования частиц керамики и металлокерамики размером менее 500 мкм. Степень диспергирования составляет 37 % для частиц фракции 250–500 мкм и до 90 % в случае использования исходных порошков фракции 40–100 мкм. Выход ультрамелких частиц для средних фракций составляет до 68 %.

Для исследований изменения фракционного состава порошков в данной работе были выбраны микрокомпозиты дисперсностью 40–50 мкм, 50–63, 63–71 мкм двух составов $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2$ и $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$.

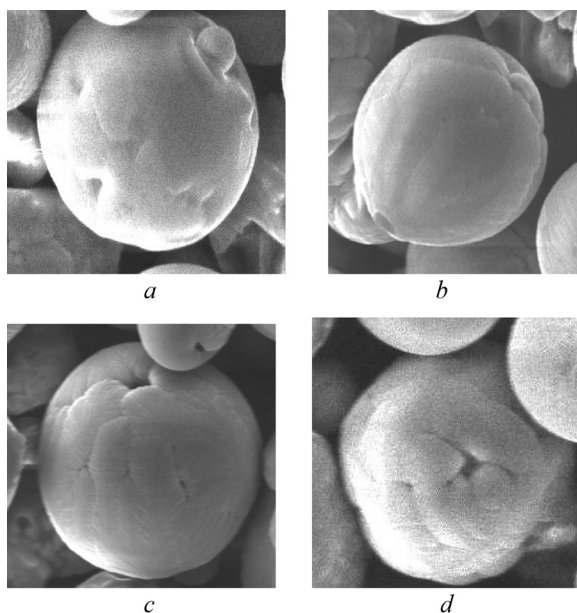


Рис. 1. Импульсное деление сфероидов с образованием на одном полюсе керамической частицы дочернего сфероида (a, b), а на другом полюсе – воронки (c, d)

Fig. 1. Pulsed fission of spheroids with formation of a ceramic particle of a daughter spheroid (a, b) at one pole, and funnels at the other pole (c, d)

Исходные порошки тщательно рассеивали для получения узких фракций 40–50 мкм, 50–63 и 63–71 мкм. Такие фракции выбраны в соответствии с предыдущими исследованиями, так как из микрокомпозитов именно этих фракций формируются в плазменном потоке качественные покрытия.

Обработанные в плазменном потоке порошки, распыленные в воду, подвергали просушиванию в печи при температуре 150–200 °С в течение 5 ч. Далее с помощью оптического микроскопа изучали гранулометрический состав порошков в 15–20 полях каждого образца. При этом оценивали количество частиц размером менее 5 мкм, 5–20, 20–30, 30–40, 50–60, 60–70 мкм. Результаты исследований гранулометрического состава порошков представлены на рис. 2. Сравнительный анализ гистограмм распределения частиц по размерам свидетельствует о том, что с введением в состав композиции корунда количество частиц ультрадисперсных и фракции 1–5 мкм уменьшается на 21, 16 и 13 % соответственно для шести видов гистограмм. Для случая исходной фракции 40–50 мкм характер гистограммы изменяется незначительно: наблюдается ее сдвиг в сторону более крупных фракций на один интервал. И в конечном продукте появляются частицы дисперсностью 30–40 мкм. Аналогичное изменение фракционного состава наблюдается в случае использования исходной фракции 50–60 мкм: гистограмма сдвинута на интервал 40–55 мкм.

Совершенно иной характер распределения частиц по размерам получен после плазменной обработки исходной фракции 63–71 мкм с введением в композицию корунда: отмечается не только сдвиг гистограммы в сторону более крупных размеров частиц, но и увеличение их количества с 11% (для интервала 20–40 мкм) до 14 и 21 % (для интервалов соответственно 30–50 и 50–65 мкм).

Из приведенных на рис. 2 результатов следует, что процесс импульсного деления сфероидов в плазменном потоке наблюдается во всех исследуемых композициях и наиболее интенсивно для систем $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2$ (1, 2), $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ (1).

Металлографические и микрорентгеноспектральные исследования показали, что по структуре покрытия всех составов представляют собой слоистые композиты: в материале матрицы равномерно распределены включения различной формы. Пористость полученных покрытий составляет менее 1 %. Между включениями и матричным материалом обнаружены оболочки

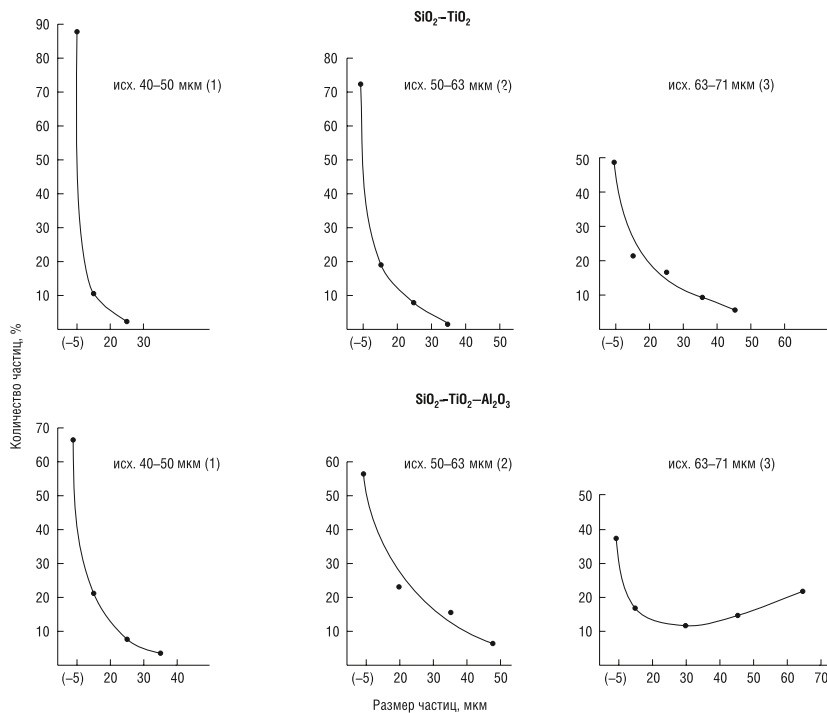


Рис. 2. Гистограммы распределения частиц по размерам

Fig. 2. Histograms of the particle size distribution

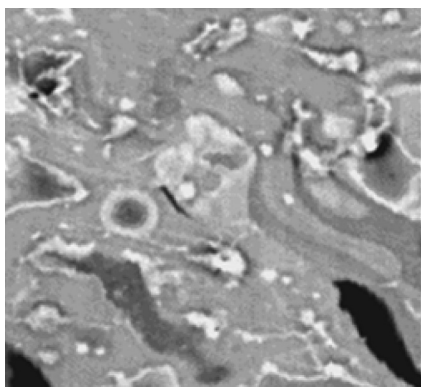


Рис. 3. Микроструктура плазменного покрытия $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (размеры включений показаны в таблице)

Fig. 3. Microstructure of the $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ plasma coating (the dimensions of the inclusions are shown in the table)

толщиной до 5,4 мкм (рис. 3), отличающиеся по цвету от материалов матрицы покрытия и ядер включений. Толщина оболочек на частицах включений определяется их размером и составом. Такие необычные структурные особенности покрытий явились основой для проведения сравнительных исследований различных составов материалов.

Комплексное изучение напыленных слоев с помощью оптической микроскопии и рентгенофазового анализа позволили выявить наличие аморфных фаз в рассматриваемых образцах, однако разделить визуально кристаллические и аморфные фазы на данном уровне исследований достаточно проблематично. Чтобы провести предварительную оценку состояния фаз в напыленных слоях, их формировали в виде монослоев, затем исследовали их микроструктуру в сравнении с микроструктурой исходных микрокомпозитов и микрокомпозитов, обработанных в плазменном потоке. Идентифицировали фазы по цвету, поскольку ранее при изучении плазменных микрокомпозитов было установлено [3–5], что

кристаллической структурой характеризуются темные фазы, аморфизированные же имеют светлые оттенки. Следует отметить еще одну особенность микроструктуры монослоев: фазы, в состав которых входит Al_2O_3 , имеют светлые оттенки и в то же время они склонны к аморфизации. Этот факт еще более осложняет изучение таких составов напыленных слоев. Поэтому дальнейшие исследования проводили сначала на композициях $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$, а затем в эту систему вводили Al_2O_3 . На рис. 3 представлена микроструктура керамического покрытия $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$. Анализ 20–30 полей микроструктуры таких слоев с одновременной идентификацией фаз по цветовой гамме для каждого вида включений позволил выделить включения по составу двух типов (таблица): композиционные (1, 2, 4, 5) и однородные (3); по форме следующих типов: сфероидизированные (с ровной и рельефной поверхностями, 1, 2), овальные (3, 4) и деформированные (5). Однородные включения неправильной формы – это фазы белого цвета размером преимущественно менее 5 мкм (3).

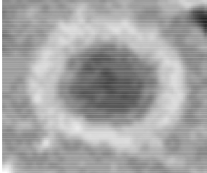

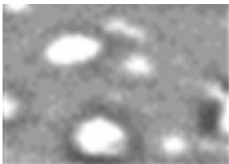
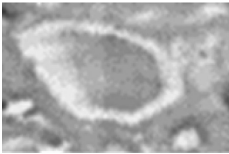

Композиционные включения характеризуются сложной структурой. Для более полного анализа необходимо разделить микроструктуру композиционных включений на две зоны: ядро и оболочку белого цвета. Оболочки имеют равномерную толщину на сфероидизированных включениях с ровной поверхностью. На сфероидизированных включениях с рельефной поверхностью такие оболочки характеризуются эпизодической несплошностью при равномерной толщине на основной протяженности. Включения овальные и неправильной формы отличаются существенной неравномерностью толщины оболочки белого цвета.

Исследования микроструктуры ядер (фаз темного цвета) композиционных включений свидетельствуют о том, что они состоят из центральной и многослойной зон (с чередованием фаз различных оттенков), последняя расположена в сторону периферии включений (между центральной зоной и внешней оболочкой белого цвета).

Размер включений в основном не соответствует размеру исходных микрокомпозитов, что вполне объяснимо механизмом формирования монослоя, кроме того, как показали исследования, микрокомпозиты выбранных фракций наиболее подвержены импульсному делению в плазме.

Несмотря на различную форму включений, которая отражает степень их проплавления, все неоднородные включения имеют в своей структуре белые оболочки. Локальный микрорентгеноспектральный анализ не позволяет определить состав этих оболочек из-за их малых толщин. Тем не менее результаты идентификации фазового состава включений в покрытиях и микрокомпозитов, обработанных в плазменном потоке с последующим охлаждением в воде, позволяют утверждать, что оболочки на включениях характеризуются аморфной структурой. Подтверждением этому служат результаты исследований микроструктуры слоевых композитов из микрокомпозитов крупных фракций: в этих случаях на включениях в покрытиях аналогичных оболочек обнаружено незначительное количество.

Результаты статистического анализа вида включений в покрытиях SiO₂-TiO₂
Results of statistical analysis of the type of inclusions in SiO₂-TiO₂ coatings

Форма включения	Характеристика включения			
	количество включений при исходной фракции порошка 50–63 мкм		количество включений при исходной фракции порошка 63–71 мкм	
	шт.	%	шт.	%
1. Включение сфероидизированное с ровной поверхностью (20 мкм) 	349	26	310	18
2. Включение сфероидизированное с рельефной поверхностью (55 мкм) 	228	17	362	21
3. Включения однородные (2–18 мкм) 	417	31	345	20
4. Включение овальное композиционное (23×58 мкм) 	256	19	483	28
5. Включение неправильной формы деформированное композиционное (37×76 мкм) 	94	7	224	13
Итого	1344	100	1724	100

Статистическую оценку включений, отличающихся по форме, проводили на пяти видах, указанных выше. В целом идентифицировали 5723 включения, сведения о 3068 из них приведены в таблице. Сравнительный анализ полученных результатов свидетельствует о том, что при одинаковых режимах напыления микрокомпозитов двух фракций общее количество несфероидизированных включений составляет 26 и 41 % соответственно для фракций 50–63 и 63–71 мкм. То есть с увеличением размера исходных частиц эффективность сфероидизации уменьшилась на 15 %. Общее количество сфероидизированных включений (с ровной и рельефной поверхно-

стями) изменилось незначительно (уменьшилось на 4 %) и составило 43 и 39 % соответственно для этих фракций. Однако количество ультрадисперсных включений сократилось на 11 %. Как уже отмечалось, ультрадисперсные включения формируются в процессе импульсного деления сфероидов, и такое деление микрокомпозитов фракции 50–63 мкм происходит более интенсивно, чем микрокомпозитов фракции 63–71 мкм.

Здесь уместно провести сравнительный анализ всех видов включений. Если учесть, что однородные включения представляют собой ультрадисперсные фазы, то независимо от формы их следует отнести к группе сфероидизированных включений (как продукты процесса импульсного деления). Тогда для фракции 50–63 мкм общее количество сфероидизированных включений составляет 74 %, что в 2,8 раза превышает количество несфероидизированных включений в слоевом композите. Для фракции 63–71 мкм эти показатели составляют 59 % и 1,4 раза соответственно.

Из приведенных результатов следует, что измельчение исходных микрокомпозитов происходит именно в процессе напыления. Сравнительные исследования дисперсных материалов и микроструктуры плазменных покрытий из них свидетельствуют о том, что измельчение исходных частиц в плазменном потоке происходит по механизму импульсного деления сфероидов в плазменном потоке.

Измельчение исходных частиц порошка непосредственно в процессе напыления позволяет формировать в покрытиях более тонкие структуры и, соответственно, существенно изменять их эксплуатационные характеристики и качество (высокая адгезионная прочность; износостойкость в 3 раза выше, чем у покрытий из корунда; пористость – менее 1 %).

Представленные результаты и литературные данные [7] позволяют объяснить особенности формирования плотной структуры покрытия из оксидной керамики и высокое качество границы раздела покрытие–сталь [3, 4]. Присутствие в керамике различных оксидов и аморфных включений значительно облегчает процесс образования прочных связей на границе керамика–металл в сравнении с чистой керамикой. И чем больше степень аморфизации керамики, тем большей скоростью ползучести она характеризуется. Немаловажную роль играет и состав аморфной фазы. Так, материалы, содержащие кремнезем и оксид алюминия, легко соединяются со многими металлами [7]. Если учесть, что в составе исследуемых покрытий оксиды SiO_2 и Al_2O_3 присутствуют и в матричном материале, и в двух группах алюмосиликатных включений [3], то следует ожидать доминирующего влияния SiO_2 и Al_2O_3 на состав и структуру покрытий. Кроме того известно [2], что растворение оксида алюминия в аморфной фазе приводит к возрастанию степени аморфизации керамики. Так влияет состав исходных микрокомпозитов на аморфизацию покрытий.

Следующий определяющий фактор – это размер микрокомпозитов и, соответственно, степень их сфероидизации в плазменном потоке, а следовательно, и аморфизации.

Ранее показано (Патент РФ № 2191217 «Износостойкое покрытие»), что частицы – оксидные микрокомпозиты дисперсностью менее 50 мкм можно полностью перевести в аморфное состояние, если обеспечить условия быстрого их охлаждения, поскольку такие частицы характеризуются степенью сфероидизации 95–97 %. При формировании покрытий условия охлаждения монослоев несколько иные. Металлографический анализ покрытий свидетельствует об образовании оболочек белого цвета на включениях в составе покрытий. Толщина этих оболочек растет с уменьшением размера включений. Оболочки максимальной толщины зафиксированы именно на включениях сферической формы. По аналогии с дисперсными сфероидизированными частицами (менее 50 мкм), которые при определенных условиях переходят в аморфное состояние, можно утверждать, что обнаруженные в напыленных слоях оболочковые фазы также находятся в аморфном состоянии. То есть появление оболочек на включениях в покрытиях свидетельствует о процессе аморфизации исходных микрокомпозитов. Учитывая эти результаты и данные таблицы, необходимо отметить, что размер исходных микрокомпозитов существенно влияет на структуру напыленных слоев.

Таким образом, разработанная технология позволяет получать керамические покрытия с аморфно-кристаллической структурой, особенности которой определяются размером и составом исходных микрокомпозитов.

Выводы. Изучен процесс импульсного деления сфероидов в плазменном потоке на оксидных микрокомпозитах $\text{TiO}_2\text{--SiO}_2$, $\text{TiO}_2\text{--SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ с исходным размером 40–50, 50–63, 63–71 мкм, установлены зависимости гранулометрического состава этих материалов. Показано влияние Al_2O_3 на выход частиц размером менее 5 мкм.

Сравнительный анализ структуры и размера исходных измельченных в плазменном потоке порошков и структуры покрытий из исходных порошков позволяет утверждать, что измельчение частиц происходит в процессе их напыления и именно по механизму импульсного деления сфероидов.

Установлено существенное влияние процесса импульсного деления сфероидов на размер включений в монослоях: измельчение структуры за счет образования более дисперсных сфероидов, которые подвержены полной аморфизации; формирование многослойных оболочек, в том числе и аморфных, на сфероидизированных и оплавленных частицах.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования Республики Беларусь по заданию 5.1.08 (программа «Высокоэнергетические, ядерные и радиационные технологии»).

Acknowledgements

This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Belarus on assignment 5.01.08 (Program “High energy, nuclear and radiation technologies”).

Список использованных источников

1. Демиденко, Л. М. Высоко-огнеупорные композиционные покрытия / Л. М. Демиденко. – М.: Metallurgija, 1979. – 216 с.
2. Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю. С. Борисов [и др.]. – Киев: Наук. думка, 1987. – 544 с.
3. Износостойкие покрытия с аморфно-кристаллической структурой / Н. А. Руденская [и др.] // Пленки и покрытия-2001: тр. 6-й Междунар. конф., 3–5 апр. 2001, Санкт-Петербург. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – С. 371–373.
4. Новые плазменные керамические покрытия / Н. А. Руденская [и др.] // Докл. Акад. наук. – 2013. – Т. 448, № 2. – С. 180–184. <https://doi.org/10.7868/S0869565213080148>
5. Руденская, Н. А. Полидисперсные микрокомпозиты на основе тугоплавких соединений – новые материалы для газотермических покрытий / Н. А. Руденская, Г. П. Швейкин // Докл. Акад. наук. – 2007. – Т. 416, № 2. – С. 222–225.
6. Импульсное деление плазменных сфероидов / Н. А. Руденская [и др.] // Докл. Акад. наук. – 2009. – Т. 429, № 1. – С. 76–78.
7. О механизме образования соединения при сварке в твердом состоянии керамики из окиси алюминия с ниобием / Э. С. Каракозов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1968. – № 3. – С. 123–129.

References

1. Demidenko L. M. *Highly-fire-resistant composite coatings*. Moscow, Metallurgija Publ., 1979. 216 p. (in Russian).
2. Borisov Yu. S., Harlamov Yu. A., Sidorenko S. L., Ardatovskaya E. N. *Thermal spray coatings of powder materials*. Kiev, Naukova dumka Publ., 1987. 544 p. (in Russian).
3. Rudenskaja N. A., Shveikin G. P., Kopysov V. A., Grigorov I. G. Wear-resistant coating with amorphous-crystalline structure. *Plenki i pokrytiya-2001: Trudy 6-i Mezhdunarodnoi konf., 3–5 aprelya, 2001, Sankt-Peterburg* [Films and coatings-2001: Proceedings of the 6th International Conference, April 3–5, 2001, St. Petersburg]. Saint-Petersburg, 2001, pp. 371–373 (in Russian).
4. Rudenskaya N. A., Shveikin G. P., Sokolova N. V., Rudenskaya M. V., Novoselov A. V. New plasma ceramic coating. *Doklady Chemistry*, 2013, vol. 449, no. 1, pp. 107–110. <https://doi.org/10.1134/s0012500813030063>
5. Rudenskaya N. A., Shveikin G. P. Polydisperse microcomposites on the basis of refractory compounds – new materials for thermal spray coatings. *Doklady Chemistry*, 2007, vol. 416, no. 1, pp. 230–233. <https://doi.org/10.1134/s001250080709008x>
6. Rudenskaya N. A., Shveikin G. P., Sokolova N. V., Rudenskaya M. V. Pulse the division of plasma spheroids. *Doklady Chemistry*, 2009, vol. 429, no. 1, pp. 294–296. <https://doi.org/10.1134/s001250080911010x>
7. Karakozov Ye. S., Kotelkin A. S., Matveev G. M., Merkulov V. A., Shorshorov M. H. About the mechanism of formation of the weld in the solid state ceramic of aluminum oxide with niobium. *Fizika i himiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 1968, no. 3, pp. 123–129 (in Russian).

Информация об авторах

Руденская Наталья Александровна – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Филиал Белорусского национального технического университета «ИПКиПК» (Партизанский пр., 77, 220107, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rugraf2000@mail.ru

Руденская Мария Владимировна – инженер, Санкт-Петербургское открытое акционерное общество «Красный Октябрь» (ул. Политехническая, 13–15, 194100, Санкт-Петербург, Российская Федерация). E-mail: rudenskaya 90@mail.ru

Information about the authors

Natalia A. Rudenskaya – D. Sc. (Engineer), Chief Scientific Officer, Branch of the Belarusian National Technical University “IPK and PC” (77, Partizansky Ave., 220107, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rugraf2000@mail.ru

Maria V. Rudenskaya – Engineer, “Krasny Octiabr” St.-Petersburg Open Joint-Stock Company (13–15, Polytechnicheskaya Str., Saint-Petersburg, 194100, Russian Federation). E-mail: rudenskaya 90@mail.ru

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
УДК 621.791
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-169-180>

Поступила в редакцию 16.10.2017
Received 16.10.2017

В. Г. Залесский, И. Л. Поболь, А. А. Бакиновский, А. Д. Губко

Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Аннотация. Представлена общая информация о развитии аддитивных технологий, а также обзор основных принципиальных схем процессов послойного выращивания металлических изделий. Описаны технологии и оборудование электронно-лучевого послойного получения металлических изделий как из проволоки, так и из порошка. Приведены экспериментальные данные, полученные авторами в результате электронно-лучевого аддитивного изготовления образцов из низкоуглеродистой стали, нержавеющей аустенитной стали и технического титана. Получены зависимости геометрических параметров наплавляемого слоя от основных параметров электронного луча, а также схема изменения профиля одиночного слоя наплавки от тока луча. Проведен анализ микроструктур. Описаны основные характерные зоны, образующиеся в образцах, полученных данным методом. Показано, что при работе с нержавеющей сталью типичная микроструктура образцов – крупные дендриты с главными осями длиной до нескольких миллиметров в направлении теплоотвода. Однако было замечено, что в участках, претерпевших повторный многократный переплав во время наплавки последующих слоев металла, происходит рекристаллизация и образуются равноосные зерна. В технически чистом титане помимо характерной крупнозернистой (до нескольких миллиметров в диаметре) структуры существуют зоны, где наблюдается пластинчатая структура с колониями около 1 мм, а также зона в виде полосы шириной около 1 мм вдоль стенок, представляющая собой игольчатую структуру. Это, очевидно, связано с режимом охлаждения, так как характер теплоотвода по краям заготовки отличается от центральных зон. Проведен анализ перспектив развития электронно-лучевых аддитивных технологий. Продемонстрированы примеры использования электронно-лучевой аддитивной технологии в современном производстве ускорительной техники, авиа- и машиностроении.

Ключевые слова: аддитивные технологии, электронно-лучевые технологии, микроструктура, титан, нержавеющая сталь

Для цитирования. Получение металлических изделий с применением электронно-лучевых аддитивных технологий / В. Г. Залесский [и др.] // Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2018. – Т. 63, № 2. – С. 169–180. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-169-180>

V. G. Zaleski, I. L. Pobol, A. A. Bakinouski, A. D. Gubko

Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

METAL PARTS MANUFACTURING BY ELECTRON BEAM ADDITIVE TECHNOLOGIES

Abstract. General information about development of additive technologies, as well as an overview of the main schematics of layer by layer manufacturing of metal products is presented. The technologies and equipment for electron beam layer-by-layer production of metal products using wire and powder as a raw material is described. Experimental data obtained by the authors as a result of electron beam additive manufacturing of low-carbon steel, stainless austenitic steel and technical titanium samples are described. Relations between the product geometry and the electron beam main parameters are obtained. The analysis of microstructures is carried out. The main zones formed in the samples fabricated by this method are described. It is shown that typical microstructure of stainless steel samples consists of the large dendrites with main axes up to a few millimeters in the direction of heat sink. In a pure titanium, in addition to the characteristic coarse-grained (up to several millimeters in diameter) structure, there are zones where a lamellar structure with colonies of about 1 mm is observed, as well as a zone in the form of a strip about 1 mm wide along the walls, which is an acicular structure. This is obviously related to the cooling mode, since the character of the heat sink along the edges of the sample differs from the central zones. The analysis of electron beam additive technologies prospects is carried out. Examples of electron beam additive technology using in modern fabrication of accelerator technics, aircraft and machine building are demonstrated.

Keywords: additive technologies, electron beam technologies, microstructure, titan, stainless steel

For citation. Zaleski V. G., Pobol I. L., Bakinouski A. A., Gubko A. D. Metal parts manufacturing by electron beam additive technologies. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 2, pp. 169–180 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-169-180>

Введение. Традиционные методы получения деталей сложной формы (например, механическая обработка точением и фрезерованием), хотя и остаются массовыми, но являются материало- и энергозатратными, что обуславливает стремление развивать новые технологии формирования изделий. Широкое распространение методов, позволяющих изменять свойства изделия за счет добавления дополнительных слоев материала (наплавка, нанесение покрытий различного функционального назначения с применением концентрированных потоков энергии), обеспечило расширение функциональных возможностей деталей и инструмента.

Развитие металлургии, электроники, робототехники, информационных технологий, а также достижения в области лазерных и электронно-лучевых технологий в последние десятилетия позволили перейти от модифицирования и восстановления поверхности изделия к его «прямому» изготовлению – так называемым аддитивным технологиям. Указанные технологии представляют собой послойное построение заготовок или готовых изделий путем последовательного соединения между собой слоев одного и того же или разных материалов наплавкой, спеканием или синтезом с использованием компьютерной модели [1].

Специфика аддитивного метода позволяет создавать изделия сложнейшей формы, в том числе и те, которые невозможно получить другими методами, из полимеров, металлов, различных композиционных и керамических материалов. Исследование особенностей аддитивных технологий для изготовления металлических деталей на данный момент является актуальной научно-технической задачей, так как для большинства деталей и инструмента необходим определенный уровень механических свойств, который пока не может быть обеспечен у изделий, полученных послойно [2]. Аддитивные технологии находятся еще в самом начале своего развития, а поэтому представляют собой обширную сферу неисследованных материалов и технологических приемов. В данной работе представлен взгляд на перспективы электронно-лучевых аддитивных технологий, а также некоторые результаты экспериментальных исследований в этой области, полученные авторами.

Разновидности аддитивных технологий. Существует два принципиально различных способа получения изделий с применением аддитивных технологий [3]. Первый (послойное осаждение – Bed Deposition) заключается в спекании или сплавлении последовательно по одному слою материала (обычно порошка), который находится в специальной ванне. Инструмент, обеспечивающий подвод энергии (лазер, электрическая дуга или электронный луч), разделенный в пространстве с рабочим материалом, выполняет перемещения по заданной траектории в плоскости, тем самым обеспечивая формирование изделия требуемой формы с высокой точностью. Примерами таких технологий служат лазерное сплавление (Selective Laser Melting – SLM) и электронно-лучевое сплавление (Electron Beam Melting – EBM). Второй способ отличается совмещением источника энергии и устройства, подающего рабочий материал (порошок или проволока) в единый исполнительный механизм (прямое осаждение – Direct Deposition). На данном принципе основан ряд технологий: построение произвольных форм с применением электронного луча (Electron Beam Free Form Fabrication – EBFFF), выращивание изделий осаждением металла (Shape Metal Deposition – SMD), аддитивная электродуговая технология с подачей проволоки (Wire and Arc Additive Manufacturing – WAAM) и др.

Многие аддитивные технологии имеют небольшую рабочую область построения (табл. 1), что в значительной степени ограничивает их применение. В то же время электронно-лучевая технология EBFFF лидирует по этому параметру и позволяет изготавливать изделия размерами до нескольких метров [4].

Таблица 1. Сравнение некоторых характеристик оборудования для различных аддитивных технологий [4]

Table 1. Comparison of some characteristics of equipment for various additive technologies [4]

Наименование оборудования	Технология	Тип материала	Рабочее пространство (длина/ширина/высота), мм
EBAM 300 Series (Sciaky)	Electron Beam Additive Manufacturing	Металл	6096 × 1397 × 1371
VX4000 (Voxeljet)	Sand Casting	Разнородный	3987 × 1981 × 990
Objet 1000 (Stratasys)	Polyjet	Пластик	990 × 787 × 482

Окончание табл. 1

Наименование оборудования	Технология	Тип материала	Рабочее пространство (длина/ширина/высота), мм
Lens 850-R (Optomec)	Laser	Металл	889 × 1498 × 889
Projet 5000 (3D Systems)	Multijet Printing Process	Пластик	533 × 381 × 279
M400 (EOS)	Selective Laser Melting	Металл	381 × 381 × 381
Arcam Q20 (Arcam)	Electron Beam Melting	Металл	330 × 381

Технология ЕВМ. Технология, использующая металлический порошок как строительный материал и электронный луч в качестве источника энергии, имеет обозначение ЕВМ и запатентована компанией ARCAM (Швеция). На рис. 1 представлена схема расположения элементов в камере для электронно-лучевого сплавления [5]. Порошковая ванна создается путем разравнивания порошка, находящегося в бункерах, специальной рейкой в рабочей зоне, которая располагается на платформе. Источник энергии (электронный луч) оплавляет участки поверхности каждого слоя согласно заданной геометрии. После сплавления слоя оставшийся порошок убирают с рабочей области, платформа с изделием опускается на высоту одного слоя порошка и процесс повторяется снова до создания прочного трехмерного компонента.

Представители компании ARCAM заявляют, что разработанная ими технология позволяет изготавливать металлические детали, обладающие более высокой плотностью, чем изделия, полученные лазерными машинами [6]. Скорость печати при использовании электронного луча в качестве источника энергии больше в 3–4 раза, чем при других аналогичных технологиях. Практически полная геометрическая свобода, характерная для «порошковых» аддитивных технологий, позволяет инженерам разрабатывать новые формы для будущих деталей без производственных ограничений. Это дает возможность изготавливать экстремально легкие конструкции, уменьшать количество деталей в узлах или путем искусственного повышения шероховатости поверхности обеспечивать ортопедическому имплантату максимальную скорость сращения с тканями. В процессе работы установки производства Arcam используется электронный луч, который управляется электромагнитными катушками, обеспечивающими чрезвычайно быстрое и точное его перемещение, что позволяет поддерживать несколько отдельных ванн расплава одновременно. Механические свойства получаемых изделий выше, чем у отливки, и сопоставимы с деформированным материалом (табл. 2) [7].

Вакуумная система обеспечивает остаточное давление в рабочей камере $1 \cdot 10^{-5}$ бар или ниже на протяжении всего цикла. Во время фактического процесса плавления в камеру вводится гелий и давление повышается до $2 \cdot 10^{-3}$ бар. Контролируемая таким образом среда важна для обеспечения неизменности химического состава «строительного» материала.

Перед сплавлением каждый слой порошка подвергается электронно-лучевому нагреву до оптимальной температуры, специально подобранной для конкретного материала, в целях предотвращения удаления мелких фракций порошка при сплавлении. В результате детали, полученные с помощью процесса ЕВМ, свободны от остаточных напряжений и позволяют получать микроструктуру без мартенситных включений [8].

Минусом данной технологии является необходимость наличия вспомогательного оборудования для безопасной работы с использованным мелкодисперсным металличе-

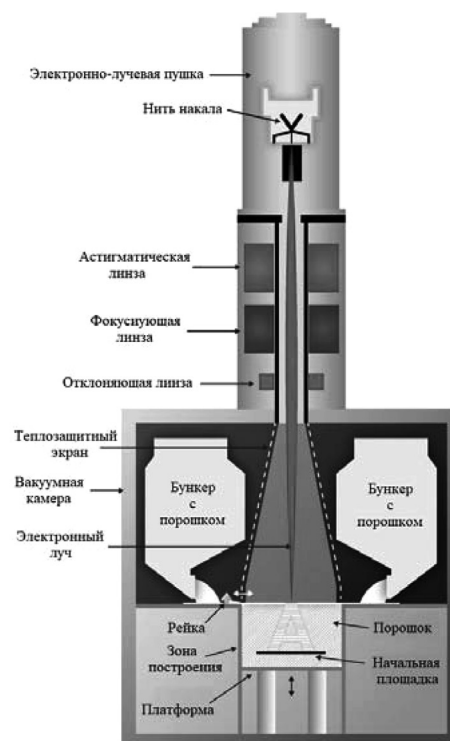


Рис. 1. Схема расположения элементов установки для электронно-лучевого сплавления [5]

Fig. 1. The layout of the elements of the EBM equipment [5]

ским порошком: взрывозащищенных пылесосов, тележек для обработки порошка и системы восстановления порошка. Системы для извлечения порошка включают интегрированное просеивание и повторное наполнение контейнеров, что позволяет перерабатывать весь несплавленный порошок с минимальным ручным вмешательством [9].

Таблица 2. Сравнение механических свойств образцов из сплава Ti6Al4V, изготовленных разными технологиями [7]

Table 2. Comparison of mechanical properties of Ti6Al4V alloy samples manufactured by different technologies [7]

Механический параметр образца	Ti6Al4V, изготовленный по технологии EBM	Ti6Al4V литой (согласно ASTM F1108)	Ti6Al4V деформированный (согласно ASTM F1472)
Предел текучести, $\sigma_{0,2}$	950 МПа	758 МПа	860 МПа
Пределная прочность на разрыв, σ_B	1020 МПа	860 МПа	930 МПа
Относительное удлинение	14 %	>8%	>10%
Предел выносливости при 600 МПа	> 10 000 000 циклов	–	–
Твердость	33 HRC	–	–
Модуль упругости	120 ГПа	–	–

Порошковая аддитивная электронно-лучевая технология получила особенно широкое применение в медицине. Технология EBM позволяет изготавливать так называемые кастомизированные медицинские имплантаты (рис. 2, *a, b*) для конкретного пациента, существенно сокращая время проектирования и производства, а использование вакуума выгодно выделяет данную технологию из числа других при работе с титаном и его сплавами. Однако этот метод получения изделий находит применение и в других сферах, где важно уменьшить массу уникальной детали. Примером является изготовление корпуса коробки передач гоночного автомобиля (рис. 2, *c*) [7].

Технология EBFFF. Использование проволоки как «строительного» материала не только ускоряет и удешевляет процесс, но и позволяет получать изделия крупных размеров. Однако каче-

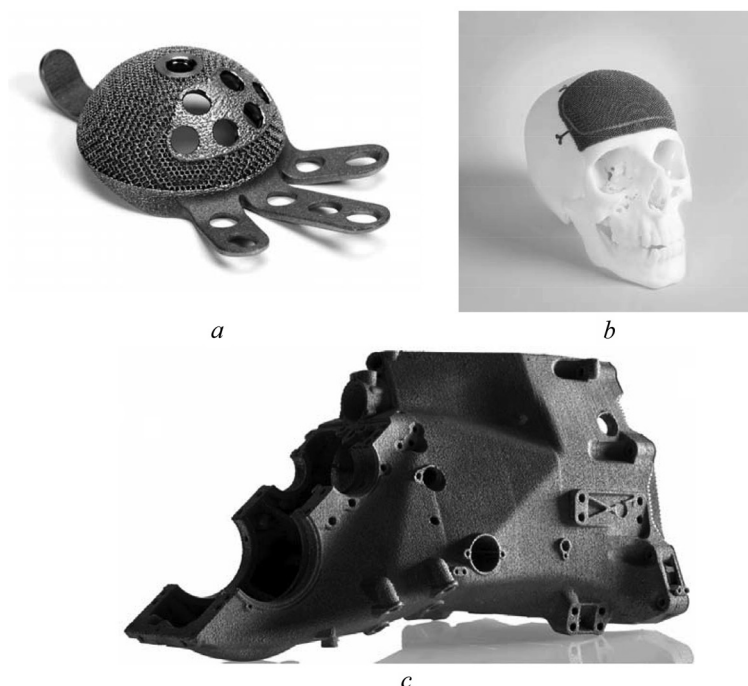


Рис. 2. Примеры применения технологии EBM: медицинские имплантаты (*a, b*), корпус коробки передач гоночного болида (*c*) [7]

Fig. 2. Examples of the use of EBM technology: medical implants (*a, b*), transmission case of a racing car (*c*) [7]

ство поверхности при этом заметно ниже, чем при использовании порошка, поэтому необходима последующая механическая обработка выращенной заготовки.

На рис. 3 представлена схема реализации технологии EBFFF выращивания изделий с применением электронного луча, который обеспечивает расплавление материала проволоки и его сплавление с подложкой и с предыдущим слоем. Подача проволоки осуществляется с помощью специального механизма. На основе компьютерной модели изделия путем согласованной работы электронной пушки, систем перемещения пушки, рабочего стола и подачи проволоки послойно формируется изделие заданной формы.

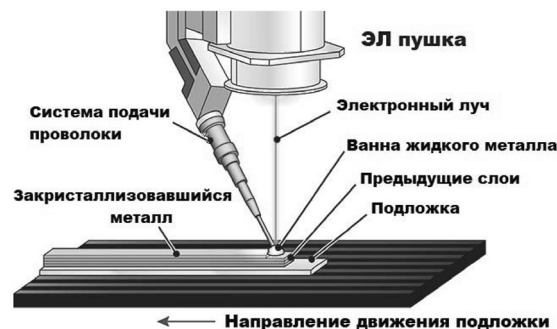


Рис. 3. Схема процесса типа Direct Deposition на примере технологии Electron Beam Free Form Fabrication [10]

Fig. 3. Scheme of the Direct Deposition process using Electron Beam Free Form Fabrication as example [10]

Пример оборудования для послойной электронно-лучевой наплавки представлен на рис. 4. Известный производитель оборудования для электронно-лучевой сварки компания Sciaky (США) в последнее десятилетие активно развивает направление аддитивного производства. Такой способ обеспечивает высокую скорость выращивания изделий при низкой стоимости и доступности материала по сравнению с порошком, позволяет получать изделия больших размеров, ограниченных только размерами вакуумной камеры. Данная технология находит применение в авиации, судостроении и военной промышленности (рис. 5). Подтверждением перспективности технологии электронно-лучевой послойной наплавки является то, что компания Sciaky поставляет свое оборудование для Lockheed Martin Corporation – крупнейшего в мире производителя в сфере ВПК.

Развитие электронно-лучевых аддитивных технологий в Физико-техническом институте НАН Беларуси. Активное освоение современного электронно-лучевого оборудования (рис. 6), позволяющего проводить не только сварку, но и процессы наплавки и обработки материалов, осуществлялось поэтапно в Физико-техническом институте НАН Беларуси.

Исследование влияния тока электронного луча на геометрию наплавки. На первом этапе после модернизации электронно-лучевой установки путем установки в камеру системы подачи проволоки проводились эксперименты, целью которых было получение данных о зависимости геометрии наплавки от основных параметров электронного луча. Для этого использовалась сварочная низкоуглеродистая проволока СВ-08Г2С (Ø1,2 мм), которую послойно наплавляли на подложку из стали 45.

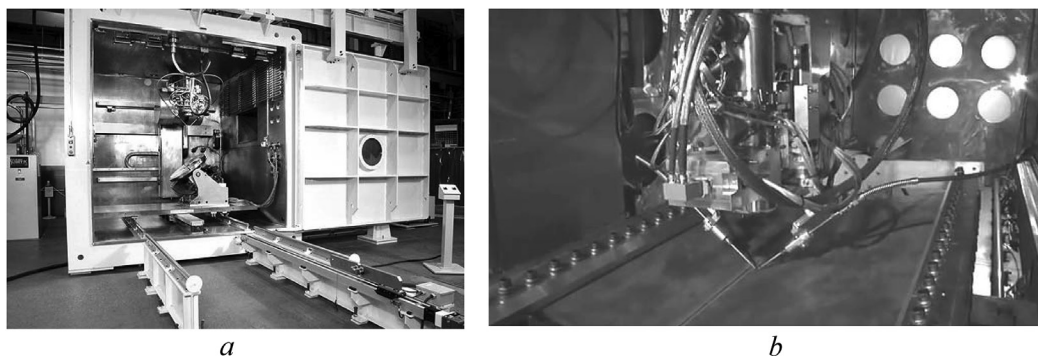


Рис. 4. Установка EBAM 300 Series компании Sciaky для изготовления заготовок методом EBFFF: внешний вид камеры (a) и электронно-лучевая пушка с системами подачи проволоки (b) [11]

Fig. 4. Sciaky's EBAM 300 Series for EBFFF process: camera (a) and electron beam gun with wire feed systems (b) [11]



Рис. 5. Примеры применения технологии EBFFF: топливный бак субмарины из титанового сплава Ti6Al4V в процессе изготовления (a) и в готовом виде (b) [12]; лонжерон Airbus, напечатанный из титанового сплава с помощью процесса EBAM Sciaky в виде заготовки (c) и после обработки (d) [13]; винт из нержавеющей стали (e) [14]; заготовка детали ускорительной техники из сверхчистого ниобия (f) [15]

Fig. 5. Examples of EBFFF technology application: a fuel tank of the submarine made of Ti6Al4V alloy in the manufacturing process (a) and ready-made (b) [12]; an Airbus spar printed using the EBAM Sciaky process in the form without (c) and after processing (d) [13]; a screw made of stainless steel (e) [14]; a detail of accelerator from ultrapure niobium (f) [15]



Рис. 6. Электронно-лучевое оборудование с габаритами камеры $3000 \times 3000 \times 4500$ мм и мощностью электронного луча до 30 кВт (a); пушка, размещенная в портале (b)

Fig. 6. Electron beam equipment with a camera size of $3000 \times 3000 \times 4500$ mm and electron beam power of up to 30 kW (a); electron beam gun on the gantry (b)

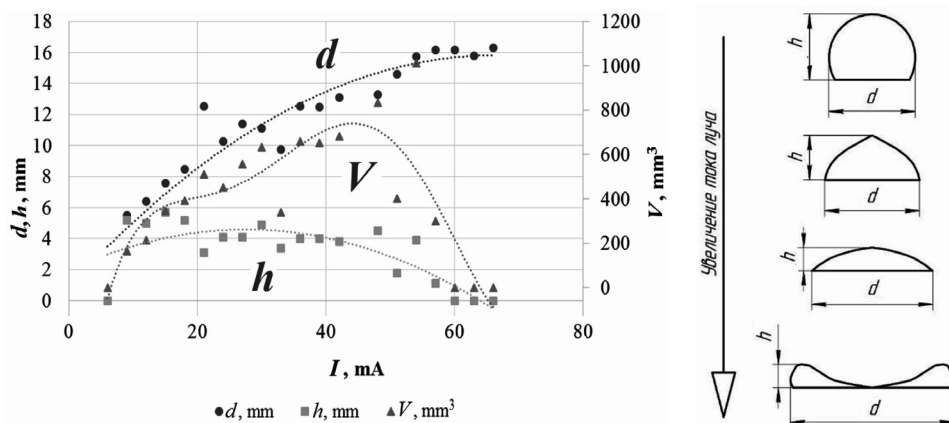


Рис. 7. Зависимость высоты h , ширины d и объема V валика наплавленного слоя от тока луча I и схема изменения профиля одиночного валика в слое при различной силе тока луча [5]

Fig. 7. Dependence of the bead height h , width d , volume V on the beam current I and the scheme of a single bead profile changing with different beam currents [16]

На рис. 7 показаны экспериментальные зависимости геометрических параметров сечения валика расплава в слое от тока электронного луча, из которых видно, что существует возможность управления отношением ширины и высоты наплавленного слоя, применяя варьирование тока (то есть мощность) при постоянном значении остальных параметров. Кроме того, можно сделать вывод, что при постоянных значениях всех параметров процесса существует довольно большой интервал изменения тока электронного луча (40–50 мА), которым можно оперировать без опасности образования макродефектов. Очевидно, что выбор оптимальных параметров электронного луча для получения валика заданной формы необходим для увеличения точности изготовления и, следовательно, снижения потери металла при последующей механической обработке.

При выборе параметров электронного луча необходимо также учитывать, что в процессе послойной наплавки тепловые условия расплавления и последующей кристаллизации металла изменяются вследствие накопления тепла в заготовке. Этот фактор имеет наиболее существенное значение при создании тонкостенных участков изделия.

При работе с отличающимися по составу материала проволокой и подложкой подтверждено, что представленный способ позволяет получать заготовки с градиентом химического состава и свойств материала в направлении, перпендикулярном подложке, путем подбора материалов проволоки и подложки. Получение таким образом градиентных материалов возможно благодаря физическому перемешиванию металлов проволоки и подложки, которое происходит в ванне, образованной электронно-лучевым воздействием при выращивании первого слоя. При наплавке следующего слоя металл проволоки перемешивается уже с металлом первого наплавленного слоя и т. д. В результате в каждом последующем слое содержание легирующих элементов, входящих в материал подложки, уменьшается.

Анализ микроструктуры образцов, изготовленных методом послойной электронно-лучевой наплавки. Следующим этапом стала работа с нержавеющей сталью аустенитного класса, широко применяемой в промышленности и вместе с тем имеющей довольно высокую стоимость, что делает этот материал перспективным для аддитивных технологий. Был изготовлен опытный образец из проволоки LNM 304LSI (США) на подложке из стали 12X18H10T в форме восьмигранной трубы. Толщина стенки – 10 мм, высота – 50 мм, количество слоев – 40, время выращивания – 1 ч (рис. 8, а). На рис. 8, б показан участок после механической обработки двух граней заготовки.

Типичная микроструктура материала образцов, полученных таким методом, – крупные дендриты с главными осями длиной до нескольких миллиметров в направлении теплоотвода (рис. 9, а). Неравномерное распределение легирующих элементов, характерное для дендритного строения, не позволяет получать свойства, сравнимые с показателями деталей, изготовленных из деформированных материалов. Послойное выращивание изделий из нержавеющей стали может сопровождаться межкристаллитной коррозией вследствие обеднения хромом приграничных зон.



Рис. 8. Участок восьмигранной трубы, выращенный с применением электронного луча из проволоки LNM 304LSI на подложке из стали 12X18H10T до (а) и после (b) механической обработки
 Fig. 8. Octagonal-pipe section made using an electron beam from a LNM 304LSI wire on a 12Cr18Ni10Ti steel substrate before (a) and after (b) machining

В ходе эксперимента замечено, что в участках, претерпевших повторный многократный переплав во время наплавки последующих слоев металла, происходит рекристаллизация и образуются равноосные зерна (рис. 9, b).

Кроме того, проводились работы и с технически чистыми металлами, например титаном марки ВТ1-0 (использовалась проволока $\varnothing 1,2$ мм). Изготовлены тонкостенные образцы со следующими геометрическими параметрами: высота стенки – 110 мм, длина – 100 мм, толщина стенки – 8 мм. Образец выращен за 30 проходов (рис. 10, a, b).

Эксперименты показали, что при послойной наплавке возможно смещать каждый последующий слой металла на $1/3$ своей толщины в горизонтальной плоскости. Это позволяет получать изделия сложной геометрической формы (рис. 10, c, d).

Особый интерес представляет собой анализ структуры образцов, полученных послойно, так как металл проходит множество сложных термических циклов.

На рис. 11 на экспериментальном образце, выращенном аддитивным электронно-лучевым методом из титана марки ВТ1-0, выделены зоны, которые отличаются своей структурой от остального металла образца. В зоне 1 наблюдается пластинчатая структура с колониями около 1 мм, состоящая из α -титана и тонких прослоек второй фазы (рис. 12, a), которая в техническом титане представляет собой концентрационную неоднородность, или β -фазу (присутствие β -фазы в сплаве ВТ1-0 допустимо вследствие наличия примесей).

Такой характер структуры обычно наблюдается при низких скоростях охлаждения сплава, что при электронно-лучевом нагреве может произойти в случае замедления теплоотвода в металл заготовки из-за ее высокой температуры. Температура выращиваемой заготовки увеличи-

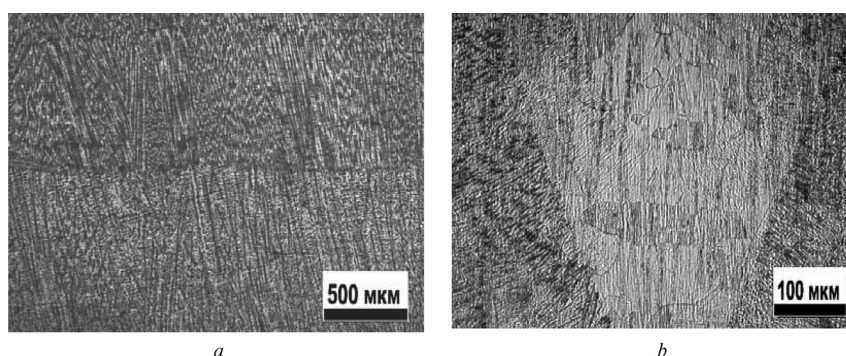


Рис. 9. Микроструктура образца, выращенного из аустенитной нержавеющей стали: зона без переплава (a) и переплавленный электронным лучом участок (b)

Fig. 9. Microstructure of a sample fabricated from austenitic stainless steel: a zone without re-melting (a) and an electron beam-melted section (b)

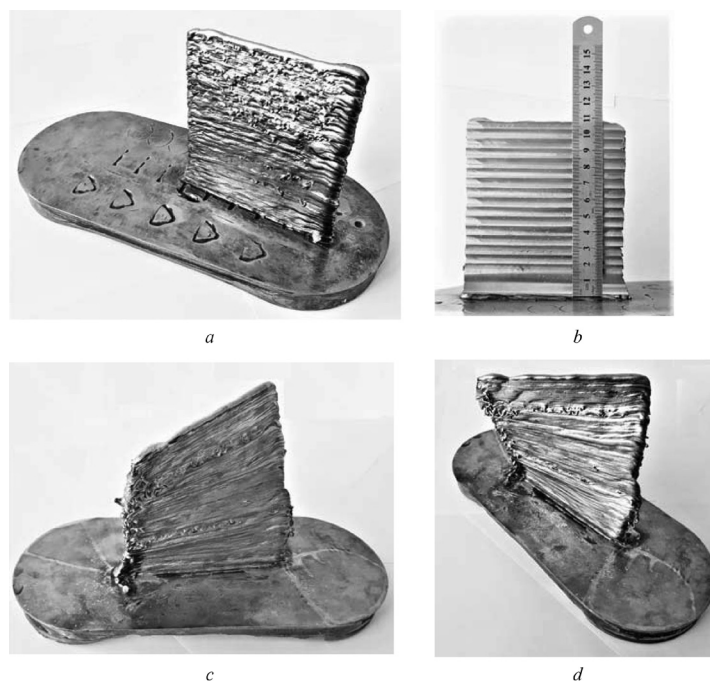


Рис. 10. Экспериментальные образцы, выращенные аддитивным электронно-лучевым методом из титана марки ВТ1-0: до (а) и после (b) механической обработки; заготовка сложной формы со смещением слоев в горизонтальной плоскости (с, d)

Fig. 10. Samples manufactured by additive electron beam method from titanium: before (a) and after (b) machining; complex shape part with layers displacement in the horizontal plane (c, d)

вается по мере наплавки слоев металла, поэтому зона с пластинчатой структурой начинается только в середине сечения заготовки. Зона 2 располагается в виде полосы шириной около 1 мм вдоль стенок и представляет собой игольчатую структуру (рис. 12, b), что, очевидно, связано с режимом охлаждения, так как характер теплоотвода по краям заготовки отличается от других зон.

Проведенный анализ показывает, что характер роста и форма зерен, полученных при выращивании образцов из разных металлов и сплавов, могут отличаться кардинальным образом.

Перспективы применения электронно-лучевых аддитивных технологий. С каждым годом продается все больше оборудования и материалов для аддитивного производства, качество получаемых изделий растет. Все это ведет к удешевлению выращенных изделий и, как следствие, к более широкому применению самой технологии в машино- и приборостроении. Представляет интерес применение проволоочных аддитивных технологий для создания массивных пресс-форм для обработки металлов давлением, литевых форм для отливки крупногабаритных пластмассовых изделий, а также катодов-мишеней со сложным химическим составом.

Как показал анализ опыта зарубежных пользователей электронно-лучевых аддитивных технологий, основными областями использования являются авиакосмическая, судостроительная, машиностроительная и энергетическая сферы, а также изготовление медицинских имплантатов. Прежде всего речь идет об изготовлении из дорогостоящих материалов мелкосерийных изделий сложной геометрической формы, получение которых с применением традиционных вычитающих технологий связано с низким коэффициентом использования материала и большими финансовыми потерями. Кроме того, реализация «прямого» производства по 3D-модели

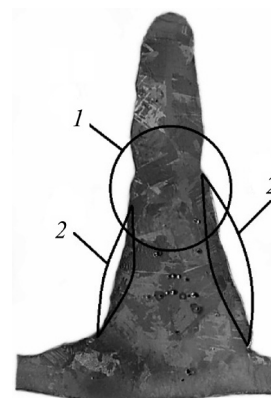


Рис. 11. Макрошлиф образца, выращенного электронно-лучевым методом из титана марки ВТ1-0 с зонами 1 (пластинчатая структура) и 2 (игольчатая структура)

Fig. 11. The large section of sample manufactured by additive electron beam method from grade 2 titanium: macrostructure with zones 1 (tabular structure) and 2 (needle structure)

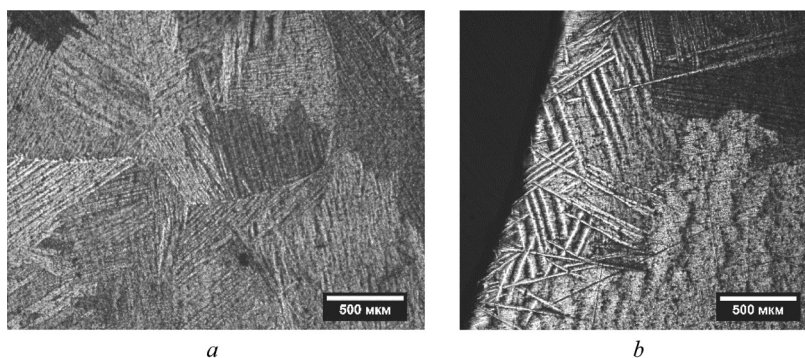


Рис. 12. Микроструктура краевой (а) и центральной зон (b) образца

Fig. 12. The microstructure of the edge zone (a) and the central zone (b) of the sample

позволяет в несколько раз сократить временные и экономические затраты на изготовление новых изделий, а также применять такие конструкторские решения, которые невозможны при традиционных методах. Причем накопление технологического опыта способствует снижению себестоимости изделий и обеспечивает расширение области применения указанных технологий в другие сферы, в том числе и для массового производства.

Использование проволоки как исходного материала позволяет достигать высоких скоростей выращивания изделий сложной формы, получать образцы больших габаритных размеров, применять широкий спектр металлов и сплавов. Указанные преимущества обеспечивают высокую конкурентоспособность технологий послойного выращивания с использованием проволочных материалов в сравнении с порошковыми аддитивными технологиями.

Заключение. В результате проведенных авторами экспериментов получены зависимости геометрических размеров валика наплавленного слоя выращиваемого образца от мощности электронного луча, а также других параметров процесса электронно-лучевой послойной наплавки. Отработаны режимы изготовления образцов из малоуглеродистой, нержавеющей сталей и титанового сплава ВТ1-0.

Проведенный металлографический анализ образцов из указанных металлов и сплавов подтверждает возможность управления микроструктурой во время процесса выращивания заготовок. Показано, что установленные режимы послойного выращивания с применением проволочных материалов позволяют получать заготовки с отсутствием макродефектов (пор, трещин, непроплавов и других) и могут быть использованы при разработке программного обеспечения электронно-лучевого оборудования для 3D-печати.

Полученные результаты можно также рассматривать как основу для разработки технологии электронно-лучевого аддитивного производства металлических изделий.

Список использованных источников

1. Frazier, W. E. Digital Manufacturing of Metallic Components [Electronic resource] / W. E. Frazier. – Mode of access: <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2010/2010-60-Frazier.pdf> – Date of access: 13 October 2017.
2. Guo, N. Additive manufacturing: technology, applications and research needs / N. Guo, M. C. Leu // *Frontiers of Mechanical Engineering*. – 2013. – Vol. 8, № 3. – P. 215–243. <https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8>
3. Pham, D. T. Rapid prototyping and rapid tooling – the key enablers for rapid manufacturing / D. T. Pham, S. S. Dimov // *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: J. Mech. Eng. Sci.* – Vol. 217, № 1. – P. 1–23. <https://doi.org/10.1243/095440603762554578>
4. Ek, K. Additive Manufactured Material: Master of Science Thesis MMK 2014:19 MKN 109 KTH Industrial Engineering and Management Machine Design / K. Ek. – Stockholm, Sweden, 2014. – 102 p.
5. Hardware of ARCAM electron beam melting equipment [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/hardware/> – Date of access: 13.10.2017.
6. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров / М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.
7. Electron Beam Melting (EBM) [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.camplax.com.au/ebm-electron-beam-melting/> – Date of access: 13.10.2017.

8. EBM[®] Electron Beam Melting in the forefront of Additive Manufacturing [Electronic resource] // Arcam EBM. – Mode of access: <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/> – Date of access: 13.10.2017.
9. Powder Handling [Electronic resource] // Arcam EBM. – Mode of access: <http://www.arcam.com/technology/products/powder-handling/> – Date of access: 13.10.2017.
10. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing / W. J. Sames [et al.] // *Int. Mat. Rev.* – 2016. – Vol. 61, Iss. 5. – P. 315–360. <https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649>
11. Make Metal Parts Faster & Cheaper Than Ever with Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM[®]) Systems or Services [Electronic resource] // Sciaky Inc. – Mode of access: <http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology> – Date of access: 13.10.2017.
12. Arctic Submarine to Include 3D Printed Parts [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.rapidreadytech.com/2017/02/arctic-submarine-to-include-3d-printed-parts/> – Date of access: 13.10.2017.
13. Airbus to Install Sciaky Metal 3D Printer [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.additivemanufacturing.media/news/-airbus-to-install-sciaky-metal-3d-printer> – Date of access: 13.10.2017.
14. Sciaky's new lineup of EBAM systems at 3D Print UAE [Electronic resource]. – Mode of access: <https://3dfabprint.com/sciakys-new-lineup-of-ebam-systems-at-3d-print-uae/> – Date of access: 13.10.2017.
15. Benson Tolle, T. H. Accelerating Materials Insertion by Evolving the DoD Materials Qualification-Transition Paradigm / T. H. Benson Tolle, G. A. Shoepner // *Advanced Materials, Manufacturing and Testing Information Analysis Center.* – 2002. – Vol. 6, № 1. – P. 3–6.
16. Бакиновский, А. А. Исследования возможностей применения установки электронно-лучевой сварки для изготовления послойной наплавкой заготовок из металлической проволоки / А. А. Бакиновский, А. А. Бурин // *Сборник научных трудов Международной конференции «Современные методы и технологии создания и обработки материалов»*, г. Минск, 14–16 сент. 2016 г. – Минск, 2016. – Кн. 2. – С. 15–20.

References

1. Frazier W. E. *Digital Manufacturing of Metallic Components*. Available at: <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2010/2010-60-Frazier.pdf> (Accessed 13 October 2017).
2. Guo N., Leu M. C. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2013, vol. 8, no. 3, pp. 215–243. <https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8>
3. Pham D. T., Dimov S. S. Rapid prototyping and rapid tooling – the key enablers for rapid manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 217, no. 1, pp. 1–23. <https://doi.org/10.1243/095440603762554578>
4. Ek K. *Additive Manufactured Material*: Master of Science Thesis MMK 2014:19 MKN 109 KTH Industrial Engineering and Management Machine Design. Stockholm, Sweden, 2014. 102 p.
5. *Hardware of ARCAM electron beam melting equipment*. Available at: <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/hardware/> (Accessed 13 October 2017).
6. Zlenko M. A., Nagaitsev M. V., Dovbysh V. M. *Additive technologies in mechanical engineering: a manual for engineers*. Moscow, Research Automobile and Automotive Institute Publ., 2015. 220 p. (in Russian).
7. *Electron Beam Melting (EBM)*. Available at: <http://www.camplex.com.au/ebm-electron-beam-melting/> (Accessed 13 October 2017).
8. EBM[®] Electron Beam Melting in the forefront of Additive Manufacturing. *Arcam EBM*. Available at: <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/> (Accessed 13 October 2017).
9. Powder Handling. *Arcam EBM*. Available at: <http://www.arcam.com/technology/products/powder-handling/> (Accessed 13 October 2017).
10. Sames, W. J., List F. A., Pannala S., Dehoff R. R., Babu S. S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Reviews*, 2016, vol. 61, iss. 5, pp. 315–360. <https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649>
11. Make Metal Parts Faster & Cheaper Than Ever with Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM[®]) Systems or Services. *Sciaky Inc.* Available at: <http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology> (Accessed 13 October 2017).
12. *Arctic Submarine to Include 3D Printed Parts*. Available at: <http://www.rapidreadytech.com/2017/02/arctic-submarine-to-include-3d-printed-parts/> (Accessed 13 October 2017).
13. *Airbus to Install Sciaky Metal 3D Printer*. Available at: <https://www.additivemanufacturing.media/news/-airbus-to-install-sciaky-metal-3d-printer> (Accessed 13 October 2017).
14. *Sciaky's new lineup of EBAM systems at 3D Print UAE*. Available at: <https://3dfabprint.com/sciakys-new-lineup-of-ebam-systems-at-3d-print-uae/> (Accessed 13 October 2017).
15. Benson Tolle T. H., Shoepner G. A. Accelerating Materials Insertion by Evolving the DoD Materials Qualification-Transition Paradigm. *Advanced Materials, Manufacturing and Testing Information Analysis Center*, 2002, vol. 6, no. 1, pp. 3–6.
16. Bakinovskiy A. A., Burin A. A. Investigation of possibility of using electron beam welding equipment for layer by layer fabrication of samples from wire. *Sb. nauch. tr. Mezhdunar. konf. «Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov»*, g. Minsk, 14–16 sent. 2016 g. Kn. 2 [Book of conference “Modern methods and technologies of materials fabrication and treatment”, Minsk, 14–16 September. Book 2]. Minsk, 2016, pp. 15–20 (in Russian).

Информация об авторах

Залесский Виталий Геннадьевич – доктор физико-математических наук, директор, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: v.zallesski@phti.by

Поболь Игорь Леонидович – доктор технических наук, заведующий отделом электронно-лучевых технологий и физики плазмы, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pobol@phti.by

Бакиновский Андрей Александрович – научный сотрудник лаборатории электрофизики, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: backinoffskin@mail.ru

Губко Артем Дмитриевич – научный сотрудник лаборатории электрофизики, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: phti_leph@mail.ru

Information about the authors

Vitali G. Zaleski – D. Sc. (Physics and Mathematics), Director, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.zallesski@phti.by

Igor L. Pobol – D. Sc. (Engineering), Head of the Department of Plasma Physics and Electron Beam Technologies, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pobol@phti.by

Andrey A. Bakinowski – Researcher of the Laboratory of Electrophysics, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: backinoffskin@mail.ru

Artem D. Gubko – Researcher of the Laboratory of Electrophysics Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: phti_leph@mail.ru

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

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА
MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS

УДК 629.114.2:621.828.6
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-181-191>

Поступила в редакцию 18.01.2018
Received 18.01.2018

Е. И. Берестов, А. В. Кулабухов

Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь

**НАГРУЖЕНИЕ ГРУНТА ТРАКАМИ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН:
ОБЗОР РАСЧЕТНЫХ СХЕМ**

Аннотация. Приведены результаты исследований в области существующих схем нагружения грунта траками гусеничных машин и их влияния на реализуемую гусеничным движителем силу тяги по сцеплению. Проведенный обзор показывает, что большинство исследователей подчеркивают немаловажную роль грунтозацепов в создании тягового усилия. Однако большая часть существующих методов расчета силы тяги по сцеплению базируется на определенной расчетной схеме, не зависящей от нагрузок, действующих на траки, от сочетания параметров грунтозацепов и от физико-механических свойств грунта. Использование этих методов не позволяет рассмотреть последовательность и альтернативные варианты разрушения грунта, а также установить взаимосвязь величины касательной силы, действующей на трак, с широким спектром сочетаний геометрических параметров грунтозацепов и связать ее с физическими процессами, протекающими в грунте. Следовательно, эти методы не в полной мере описывают взаимодействие грунтозацепов гусеничного движителя с грунтом, что затрудняет их использование для оптимизации геометрических параметров грунтозацепов. Авторами предложен аналитический метод анализа взаимодействия грунта с траком гусеничного движителя, основанный на закономерностях теории предельного состояния грунтовых масс и основных положений, используемых в теории резания грунта, учитывающий выявленные особенности этого взаимодействия. Данный метод позволяет проводить исследование взаимодействия траков гусеничного движителя с грунтом с учетом многофазности и альтернативных вариантов разрушения грунта, находящегося между грунтозацепами, а также выбирать параметры грунтозацепов, которые обеспечивают улучшение тягово-цепных качеств гусеничных тягачей.

Ключевые слова: гусеничный движитель, трак, геометрические параметры грунтозацепов, грунт, сила тяги по сцеплению, схема нагружения грунта

Для цитирования. Берестов, Е. И. Нагружение грунта траками гусеничных машин: обзор расчетных схем / Е. И. Берестов, А. В. Кулабухов // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – Т. 63, № 2. – С. 181–191. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-181-191>

E. I. Berestov, A. V. Kulabukhov

Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus

GROUND LOADING BY TRACKS OF TRACK MACHINES: REVIEW OF DESIGN SCHEMES

Abstract. The results of investigations in the field of existing soil loading schemes by tracks of tracked vehicles and their effect on the traction force realized by a caterpillar propulsion device are presented. The review shows that most researchers emphasize the important role of lugs in the creation of tractive effort. However, most of the existing methods of calculating the traction force on the clutch are based on one or another specific design scheme that does not depend on the loads acting on the tracks, on the combination of the parameters of the grousers and on the physical and mechanical properties of the soil. The use of these methods does not allow us to consider the sequence and alternative variants of soil disruption, and also to establish a relationship between the magnitude of the tangential force acting on the tract with a wide range of combinations of geometric parameters of the grousers, and to link it to the physical processes taking place in the soil. Consequently, these methods do not fully describe the interaction of the crawler tracks with the ground, which makes it difficult to use them to optimize the geometric parameters of the lugs. The authors proposed an analytical method for analyzing the interaction of soil with a track of a caterpillar engine based on the regularities of the theory of the limiting state of ground masses and the main provi-

sions used in the theory of cutting soil, taking into account the revealed features of this interaction, which makes it possible to investigate the interaction of tracks of a caterpillar propulsion with soil, taking into account the multiphase and alternative options for the destruction of soil between the grousers. This method allows you to choose the parameters of the lugs, providing an improvement in traction and coupling properties of crawler tractors.

Keywords: caterpillar propulsion, traction, geometric parameters of soil lugs, ground, traction force on the clutch, ground loading scheme

For citation. Berestov E. I., Kulabukhov A. V. Ground loading by tracks of track machines: review of design schemes. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 2, pp. 181–191 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-181-191>

Введение. Многие известные методы расчета силы тяги гусеничных машин, хотя и учитывают большинство параметров, характеризующих взаимодействие движителя с грунтом, однако основываются, как правило, на одной расчетной схеме – срезе «кирпича» грунта, находящегося между грунтозацепами. Такие методы не рассматривают альтернативных вариантов разрушения грунта под траком, а также не позволяют установить взаимосвязь между величиной силы, действующей на трак, геометрическими параметрами грунтозацепов и физическими процессами, протекающими в грунте.

Исследования процесса сдвига грунта гусеничным траком. Как известно, сопротивление грунта разрушению движителем определяется процессами, происходящими в грунте. Поэтому некоторые исследователи [1–5] уделяли этому вопросу особое внимание.

Большой вклад в развитие гусеничных движителей внес Ф. А. Опейко [3, 4], который создал научную школу этого направления. Представители этой школы В. А. Скотников, А. В. Пономарев, А. В. Климанов отмечают, что под гусеницами, траки которых имеют грунтозацепы, происходит резание грунта в специфических условиях [5]. Эта специфика обусловлена четырьмя причинами: наличием нормальной пригрузки грунта силой Q_{TP} со стороны трака; замкнутым объемом грунта ($V = htb$, где h , t , b – соответственно высота, длина и ширина объема грунта, находящегося под траком), сдвигаемого силой $T_{TP} = P/z$ (P – касательная сила тяги, z – количество грунтозацепов в пятне контакта) в сторону так называемой открытой стенки; предварительным разрушением части грунтового объема при внедрении грунтозацепа; непостоянством нормального давления на грунт.

Нормальная нагрузка со стороны трака не позволяет грунту выпирать вверх при сдвиге-резании его грунтозацепом, как это происходит при резании грунта плоскими профилями. Существование замкнутого объема с «открытой стенкой», в сторону которой происходит сдвиг, ограничивает сопротивление грунта. Внедрение грунтозацепа в замкнутый объем грунта разрушает часть этого объема и делает распределение нормальных давлений между вершиной грунтозацепа и опорной частью трака неопределенным.

В этой же работе отмечается, что при наличии грунтозацепов сила тяги связана с сопротив-

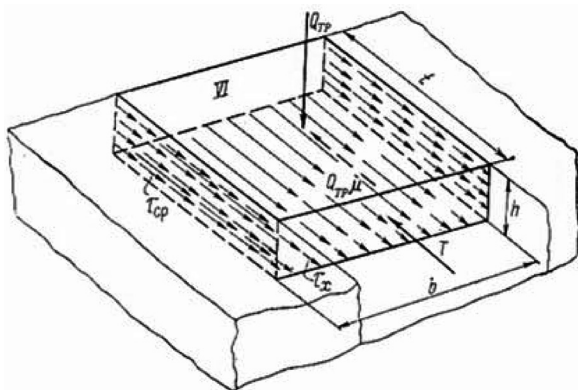


Рис. 1. Схема нагружения грунтового «кирпича»

Fig. 1. Diagram of loading of a soil “brick”

лением грунта срезом по трем поверхностям шестигранного «кирпича»: по нижней поверхности на глубине, равной высоте погружения грунтозацепа, где действуют напряжения τ_x , и по двум боковым поверхностям грунтозацепа, где действуют напряжения τ_{cp} . Верхняя (четвертая) поверхность, как и в случае, когда нет грунтозацепа, нагружена силами $(1-n)Q_{TP}$ и $(1-n)\mu Q_{TP}$, где μ – коэффициент трения сцепления материала движителя с грунтом; n – часть нагрузки $Q_{TP} = btp_{cp}$, передаваемая на вершины грунтозацепа; p_{cp} – среднее давление. На торцевую (пятую) поверхность действует сила T со стороны грунтозацепа. Шестая же поверхность (напротив пятой) ничем не нагружена (рис. 1).

Исходя из равновесия сил, действующих на грунт, расположенный между соседними грунтозацепами, уравнение, определяющее силу, которая действует на грунтовый «кирпич» со стороны передней грани грунтозацепа, имеет вид

$$T = bt \left[c + p_{cp} (\operatorname{tg} \rho - \mu) + 2 \left(c + \varepsilon p_{cp} \operatorname{tg} \rho \frac{h}{b} \right) \right],$$

где ρ – угол внутреннего трения грунта, ε – коэффициент, численное значение которого зависит от закона распределения продольных реакций грунта по грунтозацепам гусеничной цепи.

В [5] также рассматривается механизм образования касательной силы тяги одного гусеничного трака следующим образом. Грунт между соседними грунтозацепами и ниже находится в сложном напряженном состоянии под действием сил T_{TP} и Q_{TP} . От силы Q_{TP} весь грунт между грунтозацепами 1 и 2 (рис. 2) нагружается нормальным давлением p , которое вызывает во всех его слоях от точки O до точки $П$ напряжения сжатия σ . На силу T_{TP} грунт реагирует касательными реакциями $\tau_x = c + \sigma \operatorname{tg} \rho$, распределенными по глубине сжимаемого слоя от точки O до точки $П$ по закону треугольника. Примерно по такому же закону грунт деформируется в горизонтальном направлении. Кроме этих двух полей напряжений (σ и τ_x) при скольжении ΔS грунтозацепа, возникают локальные напряженные зоны, где действуют и другие напряжения.

В. А. Скотников, А. В. Пономарев, А. В. Климанов предполагают существование трех локальных зон между двумя грунтозацепами при буксовании $\delta \ll 100\%$, которые показаны на рис. 2.

Первая зона – это зона (за зацепом 1) сжатия-уплотнения грунта грунтозацепом в горизонтальном направлении. В [6–8] принимается, что до начала сдвига-среза грунтового «кирпича» происходит его компрессионное сжатие в горизонтальном направлении силой $T = \sigma hb$, где σ – напряжение сжатия грунта.

Вторая зона – это основная зона между грунтозацепами. Здесь действуют не только напряжение σ , вызванное нормальным давлением p , но и касательное напряжение τ_x , обусловленное трением о грунт материала движителя между грунтозацепами. Влияние напряжения σ в этой зоне невелико, если $S < S_0$.

Третья зона – это зона A и ΔA у заднего грунтозацепа 2. При любом скольжении ΔS этот грунтозацеп отодвигается от объема A грунта, сжатого давлением p и нагруженного трением $\tau_x = \mu p$. Под действием p и τ_x в грунте у грунтозацепа 2 образуется поверхность обрушения в объеме, равном A .

Таким образом, при скольжении грунтозацепов (см. рис. 2) в передней части происходит уплотнение грунта, а в задней части (у грунтозацепа 2) – разрушение, сопровождающееся увеличением его пористости. Авторы также предполагают, что это явно должно вызвать дополнительное погружение обоих грунтозацепов в грунт.

При скольжении $S = S_0$ реакция T достигает значения, при котором по плоскости сдвига грунтового «кирпича» образуется касательное напряжение, равное пределу прочности грунта $\tau_x = c + (p + \Delta p) \operatorname{tg} \rho + 2\tau_c$, где Δp – давление от веса грунта на глубине h . При $S = S_0$ начинается сдвиг всего «кирпича» по поверхности c и по боковым поверхностям из-за нарушения сцепления-связности. При дальнейшем скольжении грунтозацепа все связи сцепления грунтовых частиц (молекулярные, капиллярные, адсорбционные и др.) по поверхности c от грунтозацепа 1 до грунтозацепа 2 разруша-

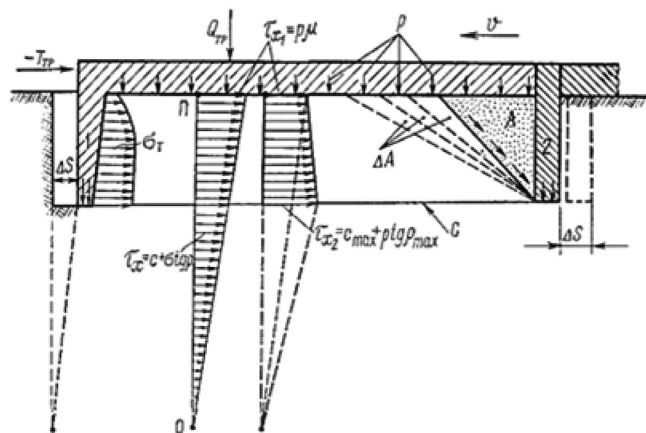


Рис. 2. Плоскостная схема нагружения грунта между двумя соседними грунтозацепами

Fig. 2. Planar scheme of loading of soil between two adjacent lugs

ются, и сдвигающая сила T падает до значения, соответствующего продолжающему действовать внутреннему трению в грунте:

$$T = (p + \Delta p) \operatorname{tg} \rho b t + \tau h t.$$

По мнению М. Г. Беккера [9], А. В. Васильева, Е. Н. Докучаевой, О. Л. Уткина-Любовцова [10], грунтозацепы могут вызвать упорную реакцию грунта по площади bh благодаря созданию сопротивления на шестой грани «кирпича» грунта. Для этого авторы предлагают увеличить шаг грунтозацепов до значения, при котором не сказывается влияние «открытой стенки», то есть ближнего расположения соседнего грунтозацепа.

Аналогичную расстановку грунтозацепов В. А. Скотников и др. [2, 5] считают целесообразным применять на болотоходных машинах с широкими резинометаллическими лентами. Авторы также подчеркивают, что гусеница Беккера с разнесенными грунтозацепами между ними содержит грунт, не нагруженный силой Q_{TP} на длине $l_{откр}$. Вследствие этого грунт в объеме $l_{откр}hb$ перед каждым грунтозацепом может сопротивляться сжатию-срезанию в горизонтальном направлении (рис. 3), нагружать шестую поверхность грунтового «кирпича». В замкнутом объеме V обычных сплошных гусениц грунт лишен такой возможности, поэтому шестая поверхность не нагружена так, как это изображено на рис. 1.

Сопротивление сжатию-сдвигу грунта на шестой поверхности грунтового «кирпича» при разнесенных грунтозацепах В. А. Скотников предлагает определять по формуле В. П. Горячкина [11] – как сопротивление резанию плоским профилем высотой h и шириной b (с учетом расположения открытой стенки на длине $l_{откр}$). Тогда на площадке грунтозацепа возникает дополнительная упорная реакция $\Delta T = k_1 b h$, где k_1 – удельное сопротивление грунта разрушению. Или, по формуле А. Н. Зеленина [12], $\Delta T = ch(1 + 0,1b)k$, тогда

$$P = \iint_{F_{он}} \tau_x dF + \sum_1^n \tau_{cp} dF_1 + \sum_1^n \Delta T.$$

Для определения касательной силы тяги предлагается множество формул [9, 13–23 и др.], в которых учитываются физико-механические свойства грунта и параметры движителей. Большинство этих уравнений основано на том, что срез грунта при взаимодействии с ним гусеничных движителей происходит по плоскости вершин грунтозацепов.

В [5] указано на то, что на связных грунтах при предельных величинах сцепления отделяемый грунтозацепом объем грунта представляет собой трехгранную призму. Основная и боковые поверхности скалывания этой призмы расположены под углом, близком к 45° . Однако указанное явление действительно для малых углов постановки передней грани грунтозацепов и грунтов невысокой влажности.

В общем виде для переувлажненной минеральной почвы авторы [5] предлагают определять касательную силу тяги, реализуемую тракком гусеницы, по формуле

$$P_i = \sqrt{\frac{S}{S_2}} [c(F_1 + 2F_2) + \sigma_{y4} \varepsilon 2F_2 \operatorname{tg} \varphi + \sigma_{y4} F_1 \operatorname{tg} \varphi + \sigma_{y4} F_3 \mu_0] + T,$$

где S – перемещение трака в пределах $0 \leq S \leq S_2$, c – связность грунта, F_1, F_2 – площади основания и бокового сдвига, $\sigma_{y4} = a_4 x^2$, a_4 – погонный объемный вес, ε – коэффициент бокового расширения грунта, φ – угол внутреннего трения грунта, μ_0 – коэффициент трения стали о грунт, T – упорная реакция грунтозацепа.

Они считают, что касательная сила тяги распределена между грунтозацепами равномерно, суммарное ее значение для гусеничного трактора равно

$$P = \sum_{i=1}^n P_i,$$

где n – число грунтозацепов.

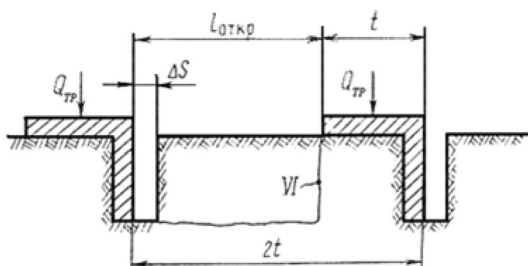


Рис. 3. Схема гусеницы с разнесенными грунтозацепами

Fig. 3. Scheme of a caterpillar with loose lugs

Предложенные в [5] схемы разрушения грунта хотя и более полно характеризуют процессы, протекающие в грунте при его разрушении траком, однако не учитывают другие возможные варианты разрушения грунта и никак не связывают схему разрушения с параметрами грунтозацепов и нагрузками, действующими на грунт, что ограничивает использование этих схем для определения силы тяги по сцеплению.

Процесс сдвига гусеничного трака И. П. Ксеневиц, В. А. Скотников и М. И. Ляско [1, 20] объясняют следующим образом. Объем грунта под траком находится в состоянии пространственного (трехосного) сжатия. В процессе этого сжатия при некотором соотношении главных напряжений происходит разрушение объема грунта как следствие сдвигов внутри него, когда по поверхности разрушения возникают касательные напряжения, превышающие сопротивления грунтового «кирпича» сдвигу. Условие прочности грунтового «кирпича» представляет собой условие предельного равновесия при сдвиге. Предельное напряжение сдвига определяет максимальный коэффициент сцепления и силу сцепления трака гусеницы с грунтом. Авторами принято допущение о плоской поверхности сдвига грунтового «кирпича» под траком, вследствие чего предельное касательное напряжение для плоской поверхности сдвига вычисляется по закону Кулона. Однако, основываясь на экспериментальных данных [10], они утверждают, что поверхность сдвига грунтового «кирпича» под траком не плоская. Также авторы отмечают, что необходимо учитывать образование уплотненного ядра перед грунтозацепом.

Анализ процесса взаимодействия трака с грунтом, выполненный М. И. Ляско [24, 25] и А. Б. Денисовым [26], а также исследования взаимодействия трака решетчатой гусеницы с грунтом, проведенные М. Г. Беккером [27, 28], показали, что в зоне перед грунтозацепом в момент сдвига формируется уплотненное ядро, которое оказывает существенное влияние на протекание процесса сдвига и формирование площадок скольжения.

Данные [26, 30] показывают, что уплотненные ядра начинают формироваться уже при упругой деформации грунта и полностью сформировываются к моменту его разрушения (предельного равновесия). В зоне уплотненного ядра перемещения частиц грунта весьма незначительны по сравнению с перемещением ядра вместе с деформатором, то есть уплотненное ядро начинает исполнять роль деформирующего элемента, существенно изменяя и форму деформатора.

В работе [31] рассматривался трак с прямым углом между передней гранью грунтозацепа и основанием трака. С использованием методов статики сыпучей среды в [32] установлено, что если область предельного равновесия выходит за габариты подошвы трака, то трактор будет буксовать при любом тяговом усилии, при котором возникает область предельного равновесия. Если область предельного равновесия не выходит за габариты подошвы трака, то трактор будет буксовать при превышении нормальной составляющей нагрузки, которая уравнивает тяговое усилие трактора, веса трактора, приходящегося на основание трака (то есть будет происходить выклинивание области предельного равновесия).

В соответствии с данными проведенных экспериментальных исследований и с учетом теории В. В. Соколовского [32] о форме тела и поверхности скольжения при взаимодействии крутых подпорных стенок с грунтом картину расположения площадок скольжения и форму тела скольжения грунта под траком гусеницы в момент предельного равновесия И. П. Ксеневиц и др. [1] представляют в следующем виде (рис. 4). Одна сторона уплотненного ядра AO_1B прилегает к передней грани грунтозацепа, а другая – к опорной поверхности трака. Наибольшая сторона играет роль упорной поверхности грунтозацепа. Форма и размеры уплотненного ядра обусловлены физико-механическими свойствами грунта и высотой грунтозацепа, а угол наклона β упорной поверхности AB ядра к вертикали не зависит

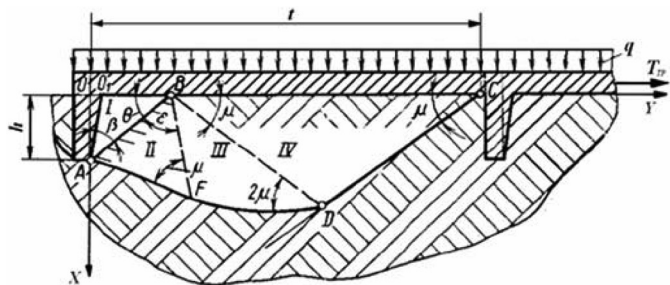


Рис. 4. Схема взаимодействия трака гусеницы с грунтом при образовании уплотненного ядра перед грунтозацепом

Fig. 4. Scheme of the interaction of the track of a caterpillar with soil when a compacted core is formed before the lug

от угла наклона упорной грани грунтозацепа в исследуемом диапазоне от 0 до 15° и значениях давления 32–65 кПа.

Тело скольжения авторы разделяют на четыре зоны: I – уплотненное ядро, имеющее форму треугольника AO_1B с углами θ и β , прилегающими к грани AB , которая взаимодействует с грунтом зоны II и исполняет роль упорной поверхности грунтозацепа при сдвиге; зона II – треугольник ABF , прилегающий к уплотненному ядру (площадки скольжения в этой зоне направлены параллельно стороне AF , при этом $\mu = \pi/4 - \delta/2$, а $\varepsilon = \pi/2 - \mu - \rho/2$); зона III – фигура FBD (линии скольжения направлены вдоль криволинейного отрезка FD – отрезка логарифмической спирали); зона IV – линии скольжения направлены параллельно стороне CD треугольника BDC под углом $\mu = \pi/4 - \delta/2$ к горизонтальной поверхности грунта.

К сожалению, эта схема не рассматривает другие возможные варианты разрушения и не учитывает наиболее опасный случай нагружения, при котором устойчивость грунта между грунтозацепами будет минимальной, а также не связывает дальнейшее разрушение грунта с последующим увеличением внешней касательной силы, приложенной к тракту. Этот случай возникает после образования площадки скольжения AB (первая фаза) и сопровождается второй фазой, при которой последовательно разрушаются слои грунта, примыкающие к площадке AB до формирования ее устойчивого положения.

Проведенный обзор показывает, что большинство исследователей подчеркивают немаловажную роль грунтозацепов в создании тягового усилия. Однако большая часть существующих методов расчета силы тяги по сцеплению базируется на той или иной определенной расчетной схеме, не зависящей от нагрузок, действующих на траки, от сочетания параметров грунтозацепов и от физико-механических свойств грунта. Использование этих методов не позволяет рассмотреть последовательность и альтернативные варианты разрушения грунта, а также установить взаимосвязь между величиной касательной силы, действующей на трак, с широким спектром сочетаний геометрических параметров грунтозацепов и связать ее с физическими процессами, протекающими в грунте. Следовательно, эти методы не в полной мере описывают взаимодействие грунтозацепов гусеничного движителя с грунтом, что затрудняет их использование для оптимизации геометрических параметров грунтозацепов.

Теоретическое обоснование взаимодействия грунтозацепа гусеничного движителя с грунтом. Нами предложен новый аналитический метод анализа взаимодействия грунта с трактом гусеничного движителя [39], основанный на закономерностях теории предельного состояния грунтовых масс и основных положений, которые используются в теории резания грунта. Данный метод учитывает выявленные особенности этого взаимодействия и позволяет проводить исследование взаимодействия траков гусеничного движителя с грунтом с учетом многофазности и альтернативных вариантов разрушения грунта, находящегося между грунтозацепами. Разработанный метод позволяет выбирать параметры грунтозацепов, обеспечивающие улучшение тягово-сцепных качеств гусеничных тягачей.

Поскольку линейный закон распределения продольных реакций грунта по передним граням грунтозацепов, расположенных на одной гусенице, является наиболее распространенным, он получил наибольшее применение. Использование иного закона не изменит сути расчетов взаимодействия траков с грунтом, и он может быть учтен на их заключительной стадии.

Суть метода сводится к следующему. При увеличении внешней силы до величины силы трения опорной части трака и вершины грунтозацепа о грунт смещения траков не происходит. При превышении этой величины начнется смещение трака, и дополнительное воздействие на грунтозацеп начнет оказывать сила, возникающая вследствие деформации грунта.

Для расчета силы, действующей на переднюю грань грунтозацепа, можно использовать современные представления о разрушении грунта [33]двигающимся на него элементом. Такое разрушение состоит, по крайней мере, из двух фаз: первичного разрушения давлением со стороны внедряемого в грунт элемента, при этом формируется начальная неустойчивая площадка скольжения, которая из-за изменения давления переформируется до устойчивого в данных условиях положения при дальнейшем перемещении элемента (последующая фаза разрушения).

Для расчета начальной фазы разрушения можно использовать положения теории пассивного давления грунта на подпорные стенки [34–36]. В этом случае подпорной стенкой будет являться

передняя грань грунтозацепа. Суть расчетов сводится к определению давления, действующего со стороны передней грани грунтозацепа, и положения появившейся в грунте первичной площадки скольжения.

При первичном разрушении грунта возможен случай, когда сразу произойдет срез всего «кирпича» грунта, расположенного между грунтозацепами. Это возможно, если сила, необходимая для среза «кирпича» грунта, будет меньше силы, при которой образуется первичная площадка скольжения OB' . Если первичная площадка скольжения выйдет за пределы удерживающей поверхности AK грунта, то есть $\psi < \psi_{KP}^I$, то в этом случае также произойдет срез грунта между грунтозацепами вследствие того, что удерживающей поверхностью будет являться менее устойчивая поверхность AT [36, 37] (рис. 5).

Если среза «кирпича» грунта не происходит, то необходимо рассмотреть последующую фазу разрушения грунта.

Во время этой фазы происходит перераспределение неустойчивой первичной площадки скольжения OB' до такого положения OB , при котором обеспечивается устойчивость грунта от дальнейшего разрушения [37]. При этом за счет увеличения давления на более крутых участках площадки скольжения происходит ее значительное спрямление.

При расчетах второй фазы следует, во-первых, контролировать положение площадки скольжения OB' , определяемое углом ее наклона ψ , относительно критического значения ψ_{KP}^I .

Во-вторых, необходимо проверять возможность среза оставшейся части грунта ненарушенной структуры $TABO$. Такой срез может произойти, когда сила, действующая со стороны вытесняемой призмы грунта OBK , превысит силы трения и сцепления, удерживающие призму $TABO$ от среза. Поэтому этот вариант разрушения необходимо постоянно рассматривать при расчете второй фазы.

В-третьих, надлежит проверять устойчивость грунта у задней грани грунтозацепа. Разрушение грунта у этой грани может произойти от давления, действующего со стороны опорной части трака. Одновременно снижается и устойчивость оставшейся части грунта, а также увеличивается критическое значение угла ψ_{KP}^I до значения ψ_{KP}^{II} . Возможность такого разрушения отмечена в [38].

Таким образом, внешняя касательная сила, приложенная к траку, может увеличиваться до тех пор, пока не произойдет одно из событий: либо полностью будет использована несущая способность грунта и осуществится его срез между соседними грунтозацепами, либо произойдет выклинивание трака на вытесняемой призме грунта при условии, что сила, действующая со стороны вытесняемой призмы OBK на опорную часть трака, превысит силу тяжести трактора, приходящуюся на один трак [15, 36, 37]. Возможность выклинивания гусеничных траков из грунта отмечена во многих работах [5, 31, 38, 39], этот процесс наблюдался авторами настоящей статьи при проведении экспериментальных исследований (рис. 6).

С помощью разработанного авторами метода исследовалось влияние шага грунтозацепов на силу тяги по сцеплению на суглинке (грунт III категории с углом внутреннего трения $\rho = 280^\circ$ и удельным сцеплением $c = 60$ кПа). В ходе проведенного эксперимента изменялся шаг грунтозацепов в диапазоне от $T = 0,06$ м до $T = 0,56$ м при неизменных остальных геометрических параметрах гусеничного движителя трактора Т10М.

На рис. 7 вертикальным отрезком LL отделена область, в которой происходит срез грунта по плоскости, проходящей через вершины грунтозацепов, на самой ранней стадии до окончания формирования предельной зоны и образования первичной площадки скольжения, выходящей на поверхность грунта.

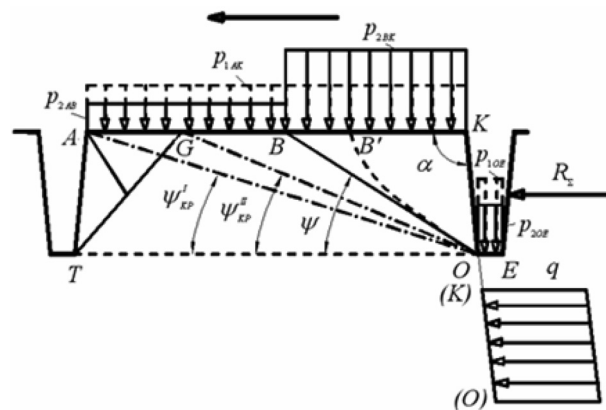


Рис. 5. Общая схема разрушения грунта между грунтозацепами

Fig. 5. General scheme of soil disintegration between grousers

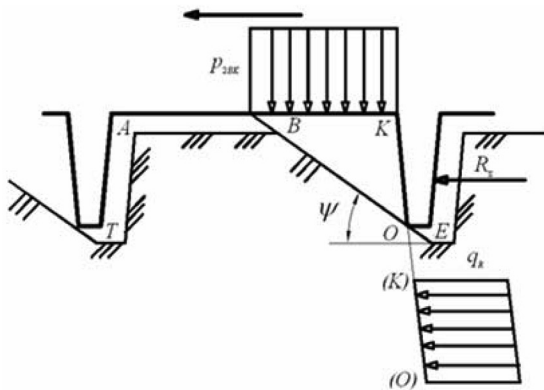


Рис. 6. Схема выклинивания трака из грунта
Fig. 6. Scheme of wedging the track out of the ground

Такое разрушение появляется тогда, когда для среза всего грунта, находящегося между грунтозацепами, требуется меньшая сила (кривая 1), чем для образования первичной площадки скольжения (кривая 2). На основании этого можно утверждать, что грунтозацепы трактора Т10М с малым шагом (до 0,19 м) разрушают грунт по схеме, не являющейся рациональной.

В области, расположенной между вертикальными отрезками LL и MM, разрушение грунта происходит по следующей схеме. Во время первой фазы появляется первичная площадка скольжения, выходящая на поверхность грунта, о чем свидетельствует положение кривой 2. При переформировании этой площадки скольжения во время второй

фазы происходит срез оставшейся призмы грунта ненарушенной структуры по плоскости, проходящей через вершины грунтозацепов, о чем свидетельствует кривая 1.

При значении шага $T = 0,4$ м для среза грунта ненарушенной структуры или выклинивания трака из грунта требуется одинаковая величина внешней касательной силы, равная $R_{\Sigma} = 176,8$ кН. Это свидетельствует о максимальном использовании несущей способности грунта в данных условиях.

При относительно больших значениях шага (свыше 0,4 м), расположенных в области, находящейся правее отрезка MM, сила, необходимая для среза грунта (кривая 1), оказывается больше силы, необходимой для выклинивания трака (кривая 3). Поэтому в этой области площадка скольжения переформируется до такого положения, при котором происходит выклинивание трака на вытесняемой призме грунта. Максимально возможная величина касательной силы в этом случае соответствует выделенному участку кривой 3. При такой схеме разрушения несущая способность грунта реализуется не полностью, поскольку часть грунта между грунтозацепами остается неразрушенной.

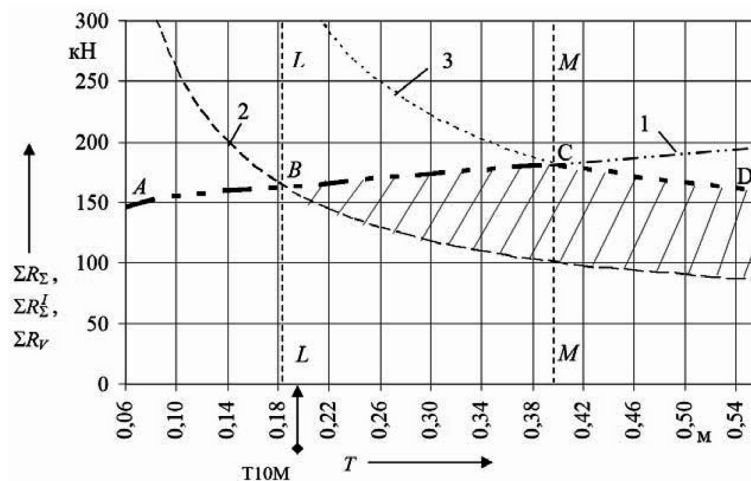


Рис. 7. Влияние шага грунтозацепов на силы, характеризующие взаимодействие рабочих поверхностей гусениц с грунтом: 1 – касательная сила, необходимая для среза грунта (ΣR_{Σ}); 2 – условная касательная сила, при которой появляется первичная площадка скольжения (ΣR_{Σ}^I); 3 – условная касательная сила, при которой траки выклиниваются из грунта (ΣR_V); /// – область протекания второй фазы

Fig. 7. Influence of the groove pitch on the forces characterizing the interaction of the working surfaces of caterpillars with soil: 1 – the tangential force required to cut the soil (ΣR_{Σ}); 2 – conditional tangential force, at which the primary slip surface appears (ΣR_{Σ}^I); 3 – conditional tangential force, at which the tracks are wedged out from the ground (ΣR_V); /// – the second phase flow area

Заключение. Проанализировав проведенные исследования в области существующих схем нагружения грунта траками гусеничных машин, можно сказать, что большинство исследователей подчеркивают немаловажную роль грунтозацепов в создании тягового усилия. Расчеты показывают, что в приведенных условиях наиболее рациональным будет являться шаг $T = 0,4$ м. Это обосновывается тем, что при таком шаге ограничения, накладываемые на величину внешней касательной силы, являются равноценными (кривые 1 и 3 пересекаются в точке С).

Эти выводы получены для конкретных условий, поэтому их не стоит автоматически применять к гусеничным машинам с другими размерами траков или к гусеницам, работающим в иных условиях. Однако подобные задачи можно решать, используя программное обеспечение, разработанное на основе предложенного авторами метода анализа взаимодействия траков гусеничного движителя с грунтом, которое позволяет адаптировать геометрические параметры грунтозацепов гусеничных машин к реальным условиям той местности, где будет эксплуатироваться машина. Программное обеспечение в виде готового программного продукта используется в учебном процессе и научных исследованиях кафедры «Транспортные и технологические машины» ГУВПО «Белорусско-Российский университет».

Список использованных источников

1. Ксеневиц, И. П. Ходовая система – почва – урожай / И. П. Ксеневиц, В. А. Скотников, М. И. Ляско. – М.: Агропромиздат, 1985. – 304 с.
2. Скотников, В. А. Исследование проходимости гусеничных болотных тракторов / В. А. Скотников. – Минск: Выш. шк., 1964. – 19 с.
3. Опейко, Ф. А. Колесный и гусеничный ход / Ф. А. Опейко. – Минск: Акад. с.-х. наук БССР, 1960. – 228 с.
4. Опейко, Ф. А. Наиболее выгодное распределение давления на грунт при разных положениях центра давления у гусеничного трактора / Ф. А. Опейко // Вопросы сельскохозяйственной механики. – Минск, 1962. – Т. 8. – С. 169–188.
5. Скотников, В. А. Проходимость машин / В. А. Скотников, А. В. Пономарев, А. В. Климанов. – Минск: Наука и техника, 1982. – 328 с.
6. Скотников, В. А. Основы теории и расчета трактора и автомобиля / В. А. Скотников, А. А. Мащенко, А. С. Солонский. – М.: Агропромиздат, 1986. – 383 с.
7. Терцаги, К. И. Строительная механика грунта / К. И. Терцаги. – М.: Госстройиздат, 1933. – 123 с.
8. Орнатский, Н. В. Механика грунтов / Н. В. Орнатский. – М.: МГУ, 1962. – 186 с.
9. Беккер, М. Г. Введение в теорию систем местность – машина / М. Г. Беккер. – М.: Машиностроение, 1973. – 520 с.
10. 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.
11. Мацелуро, М. Е. Вопросы сельскохозяйственной механики / М. Е. Мацелуро, Б. Н. Янушкевич. – Минск: Выш. шк., 1965. – 132 с.
12. Зеленин, А. Н. Резание грунтов / А. Н. Зеленин. – М.: Акад. наук СССР, 1959. – 256 с.
13. Агейкин, Я. С. Вездеходные колесные и комбинированные движители / Я. С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1972. – 234 с.
14. Антонов, А. С. Теория гусеничного движителя / А. С. Антонов. – М.: Машгиз, 1949. – 214 с.
15. Бородачев, И. П. Гусеничные и колесные тракторы и тягачи как базовые машины для бульдозеров / И. П. Бородачев, А. А. Яркин. – М.: ЦБТИ ВНИИстройдормаш, 1959. – 76 с.
16. Волчка, Л. Я. Тракторы / Л. Я. Волчка. – 2-е изд., перераб. – Минск: Выш. шк., 1977. – 413 с.
17. Гуськов, В. В. Оптимальные параметры сельскохозяйственных тракторов / В. В. Гуськов. – М.: Машиностроение, 1966. – 196 с.
18. Забавников, Н. А. Основы теории транспортных гусеничных машин / Н. А. Забавников. – М.: Машиностроение, 1975. – 448 с.
19. Карельских, Д. К. Теория, конструкция и расчет тракторов / Д. К. Карельских, М. К. Кристи. – Л.: Машгиз, 1940. – 520 с.
20. Ксеневиц, И. П. Тракторы. Проектирование, конструирование и расчет: учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / И. П. Ксеневиц, В. В. Гуськов, Н. Ф. Бочаров. – М.: Машиностроение, 1991. – 544 с.
21. Медведев, М. И. Теория гусеничных систем / М. И. Медведев. – М.: Машгиз, 1934. – 194 с.
22. Носов, Н. А. Расчет и конструирование гусеничных машин / Н. А. Носов, В. Д. Галышев, А. П. Харченко. – Л.: Машиностроение, 1972. – 560 с.
23. Рубенчик, Е. В. Испытания трактора ДТ-75Б с гусеницами с различным шагом / Е. В. Рубенчик, В. М. Столяров // Пути снижения удельного давления ходовых систем гусеничных сельскохозяйственных тракторов на почву. – М.: ЦНИИТЭИтракторосельхозмаш, 1979. – Вып. 7. – С. 17–21.
24. Ляско, М. И. Испытание трактора ДТ-75С с гусеницей увеличенного шага / М. И. Ляско, Л. Н. Кутин, П. Л. Щупак // Пути снижения удельного давления ходовых систем гусеничных сельскохозяйственных тракторов на почву. – М.: ЦНИИТЭИтракторосельхозмаш, 1979. – Вып. 7. – С. 22–31.

25. Ляско, М. И. Исследование влияния некоторых конструктивных параметров на тягово-сцепные свойства гусеничного трактора с землеройным оборудованием: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / М. И. Ляско; МАДИ. – М., 1971. – 17 с.
26. Денисов, А. Б. Исследование влияния некоторых конструктивных параметров гусеницы на тягово-сцепные свойства сельскохозяйственного трактора: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / А. Б. Денисов; НАТИ. – М., 1982. – 25 с.
27. Bekker, M. G. *Off-the-Road Locomotion: Research and Development in Terramechanics* / M. G. Bekker. – Michigan: University of Michigan Press, 1960. – 400 p.
28. Bekker, M. G. *Theory of land locomotion* / M. G. Bekker. – Michigan: University of Michigan Press, 1962. – 263 p. <https://doi.org/10.3998/mpub.9690401>
29. Зеленин, А. Н. Разрушение мерзлых грунтов резанием, ударом и вибрацией / А. Н. Зеленин. – М.: ЦИНТИАМ, 1962. – 42 с.
30. Цытович, Н. А. *Механика грунтов* / Н. А. Цытович. – М.: Госстройиздат, 1963. – 636 с.
31. Алябьев, А. Ф. Модель взаимодействия гусеницы трактора с грунтом / А. Ф. Алябьев, С. Ю. Калинин // *Лес. вестн.* – 2016. – Т. 20, № 2. – С. 173–178.
32. Соколовский, В. В. *Статика сыпучей среды* / В. В. Соколовский. – М.: Гостехиздат, 1965. – 274 с.
33. Артемьев, К. А. *Теория резания грунтов землеройными машинами: учеб. пособие* / К. А. Артемьев. – Новосибирск: Изд. Новосибир. ун-та, 1978. – 104 с.
34. Берестов, Е. И. Пассивное давление грунта на ломаные подпорные стенки. Ч. 1 / Е. И. Берестов // *Вест. Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук.* – 1996. – № 1. – С. 47–54.
35. Берестов, Е. И. Пассивное давление грунта на ломаные подпорные стенки. Ч. 2 / Е. И. Берестов // *Вест. Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук.* – 1997. – № 2. – С. 60–71.
36. Берестов, Е. И. Предельное равновесие в грунтовом массиве / Е. И. Берестов // *Проблемы качества и надежности машин: материалы респ. науч.-техн. конф., Могилев, 17–18 апр. 1994 г.: в 2 ч. / редкол.: В. И. Ходырев [и др.]. – Могилев, 1994. – Ч. 2. – С. 74.*
37. Берестов, Е. И. Сопrotивление грунтов резанию / Е. И. Берестов // *Изв. высш. учеб. заведений. Строительство.* – 1997. – № 10. – С. 102–107.
38. Барский, И. Б. *Конструирование и расчет тракторов* / И. Б. Барский. – М.: Машиностроение, 1968. – 375 с.
39. Берестов, Е. И. О повышении сцепления движителей гусеничных машин с грунтом / Е. И. Берестов, А. В. Кулабухов // *Строительные и дорожные машины.* – 2010. – № 5. – С. 50–56.

References

1. Ksenevich I. P., Lyasko M. I. *Running system – soil – harvest*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 304 p. (in Russian).
2. Skotnikov V. A. *Investigation of the patency of crawler marsh tractors*. Minsk, Vysshaya shkola Publ., 1964. 19 p. (in Russian).
3. Opeiko F. A. *Wheel and caterpillar drive*. Minsk, Academy of Agricultural Sciences of the BSSR, 1960. 228 p. (in Russian).
4. Opeiko F. A. The most favorable pressure distribution to the ground at different positions of the center of pressure of a tracked tractor. *Questions of agricultural mechanics*. Minsk, 1962, vol. 8, pp. 169–188 (in Russian).
5. Skotnikov V. A., Ponomarev A. V., Klimanov A. V. *Vehicle penetration*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1982. 328 p. (in Russian).
6. Skotnikov V. A., Mashchenskii A. A., Solonskii A. S. *Fundamentals of the theory and calculation of a tractor and a car*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1986. 383 p. (in Russian).
7. Tercagi K. I. *Building mechanics of soil*. Moscow, Gosstroizdat Publ., 1933. 123 p. (in Russian).
8. Ornat'skii N. V. *Soil mechanics*. Moscow, Moscow State University, 1962. 186 p. (in Russian).
9. Bekker M. G. *Introduction to the theory of local-machine systems*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 520 p. (in Russian).
10. Vasil'ev A. V., Dokuchaeva E. N., Utkin-Lyubovcov O. L. *Influence of design parameters of a caterpillar tractor on its traction-coupling properties*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 192 p. (in Russian).
11. Macepuro M. E., Yanushkevich B. N. *Questions of agricultural mechanics*. Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 1965. 132 p. (in Russian).
12. Zelenin A. N. *Cutting of soils*. Moscow, Academy of Sciences of USSR, 1959. 256 p. (in Russian).
13. Ageikin Ya. S. *All-wheel drive and combined propellers*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 234 p. (in Russian).
14. Antonov A. S. *The theory of caterpillar propulsion*. Moscow, Mashgiz Publ., 1949. 214 p. (in Russian).
15. Borodachev I. P., Yarkin A. A. *Crawler and wheel tractors and tractors as basic machines for bulldozers*. Moscow, TsBTI VNIstroydormash Publ., 1959. 76 p. (in Russian).
16. Volchka L. Ya. *Tractors*. Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 1977. 413 p. (in Russian).
17. Gus'kov V. V. *Optimal parameters of agricultural tractors*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966. 196 p. (in Russian).
18. Zabavnikov N. A. *The fundamentals of the theory of transport caterpillar vehicles*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 448 p. (in Russian).
19. Karel'skih D. K., Kristi M. K. *Theory, design and calculation of tractors*. Leningrad, Mashgiz Publ., 1940. 520 p. (in Russian).

20. Ksenevich I. P., Gus'kov V. V., Bocharov N. F. *Tractors. Design, construction and calculation*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 544 p. (in Russian).
21. Medvedev M. I. *The theory of caterpillar systems*. Moscow, Mashgiz Publ., 1934. 194 p. (in Russian).
22. Nosov N. A., Galyshev V. D., Harchenko A. P. *Calculation and design of caterpillar machines*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1972. 560 p. (in Russian).
23. Rubenchik E. V., Stolyarov V. M. Tests of DT-75B tractor with tracks with different steps. *Puti snizheniya udel'nogo davleniya hodovyh sistem gusenichnyh sel'skohozyajstvennyh traktorov na pochvu* [Ways to reduce the specific pressure of running systems of caterpillar agricultural tractors on soil]. Moscow, Central Scientific Research Institute for Information and Techno-Economic Research on Tractor and Agricultural Machinery, 1979, iss. 7, pp. 17–21 (in Russian).
24. Lyasko M. I., Kutin L. N., Shchupak P. L. Test of DT-75C tractor with increased track caterpillar. *Puti snizheniya udel'nogo davleniya hodovyh sistem gusenichnyh sel'skohozyajstvennyh traktorov na pochvu* [Ways to reduce the specific pressure of running systems of caterpillar agricultural tractors on soil]. Moscow, Central Scientific Research Institute for Information and Techno-Economic Research on Tractor and Agricultural Machinery, 1979, iss. 7, pp. 22–31 (in Russian).
25. Lyasko M. I. *Investigation of the influence of some design parameters on the traction-coupling properties of a crawler tractor with earth-moving equipment*. Moscow, Moscow Automobile and Road Institute, 1971. 17 p. (in Russian).
26. Denisov A. B. *Investigation of the influence of some design parameters of the track on traction and coupling properties of an agricultural tractor*. Moscow, Research Tractor Institute, 1982. 25 p. (in Russian).
27. Bekker M. G. *Off-the-Road Locomotion: Research and Development in Terramechanics*. Michigan, University of Michigan Press, 1960. 400 p.
28. Bekker M. G. *Theory of land locomotion*. Michigan, University of Michigan Press, 1962. 263 p. <https://doi.org/10.3998/mpub.9690401>
29. Zelenin A. N. *Destruction of frozen soils by cutting, impact and vibration*. Moscow, Central Institute of Scientific and Technical Information on Automation and Mechanical Engineering, 1962. 42 p. (in Russian).
30. Cytovich, N. A. *Soil mechanics*. Moscow, Gosstroizdat Publ., 1963. 636 p. (in Russian).
31. Alyab'ev A. F., Kalinin S. Yu. Model of interaction of a tractor caterpillar with a ground. *Lesnoj vestnik = Forestry Bulletin*, 2016, vol. 20, no. 2, pp. 173–178 (in Russian).
32. Sokolovskij V. V. *Static of the granular medium*. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1965. 274 p. (in Russian).
33. Artem'ev K. A. *Theory of cutting soils by excavating machines: a tutorial*. Novosibirsk, Novosibirsk University Publ., 1978. 104 p. (in Russian).
34. Berestov E. I. Passive ground pressure on broken retaining walls. Part 1. *Vestsi Akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 1996, no. 1, pp. 47–54 (in Russian).
35. Berestov E. I. Passive ground pressure on broken retaining walls. Part 2. *Vestsi Akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 1997, no. 2, pp. 60–71 (in Russian).
36. Berestov E. I. Limit equilibrium in the soil massif. *Problemy kachestva i nadezhnosti mashin: materialy resp. nauch.-tekhn. konf. Mogilev, 17–18 apr. 1994 g. Ch. 2* [Problems of quality and reliability of machines: materials rep. scientific-techn. conf., Mogilev, 17–18 April 1994. Part 2]. Mogilev, 1994, p. 74 (in Russian).
37. Berestov E. I. Resistance to cutting soil. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*, 1997, no. 10, pp. 102–107 (in Russian).
38. Barskii I. B. *Design and calculation of tractors*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 375 p. (in Russian).
39. Berestov E. I., Kulabuhov A. V. About increase of coupling of engines of caterpillar cars with a ground. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny = Construction and Road Building Machinery*, 2010, no. 5, pp. 50–56 (in Russian).

Информация об авторах

Берестов Евгений Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Транспортные и технологические машины», Белорусско-Российский университет (пр. Мира, 43, 212000, Могилев, Республика Беларусь). E-mail: beres1948@mail.ru

Кулабухов Артем Владимирович – кандидат технических наук, доцент, декан инженерно-экономического факультета, Белорусско-Российский университет (пр. Мира, 43, 212000, Могилев, Республика Беларусь). E-mail: kulabuhov1981@mail.ru

Information about the authors

Evgenii I. Berestov – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department “Transport and technological machines”, Belarusian-Russian University (43, Mira Ave., 212000, Mogilev, Republic of Belarus). E-mail: beres1948@mail.ru

Artem V. Kulabukhov – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Dean of the Faculty of Engineering and Economics, Belarusian-Russian University (43, Mira Ave., 212000, Mogilev, Republic of Belarus). E-mail: kulabuhov1981@mail.ru

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 622.232.83-231.322.3:620.178.35(045)(476)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-192-200>

Поступила в редакцию 03.11.2017

Received 03.11.2017

В. Я. Прушак¹, Д. А. Черноус², О. М. Волчек³

¹*Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством, Солигорск, Беларусь*

²*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь*

³*Барановичский государственный университет, Барановичи, Беларусь*

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ ТРАНСМИССИИ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ПРОХОДЧЕСКИХ МАШИН

Аннотация. Расчет максимальных напряжений при изгибе и контактом взаимодействии зубьев шестерен осуществляется на основе известных соотношений, содержащих стандартным образом определяемые коэффициенты. Предложена новая методика расчетного определения показателей долговечности зубчатой передачи трансмиссии тяжело нагруженных проходческих машин, позволяющая более точно оценить динамическую нагруженность зубьев. В рамках данной методики при вычислении максимальных действующих напряжений вместо удельной окружной динамической силы используются коэффициенты усиления упругого момента, определяемые по амплитудно-частотной характеристике передачи.

Определены максимальные напряжения при изгибе зубьев, дана оценка вероятности безотказной работы технической системы. В качестве примера использования предложенной расчетной методики рассмотрена прямозубая цилиндрическая передача, используемая в приводе исполнительного органа проходческого комбайна. Проведено сопоставление расчетных оценок показателей надежности зубчатой передачи, полученных на основе стандартной методики и с использованием амплитудно-частотных характеристик. На графиках представлены амплитудно-частотная характеристика передачи, полученная с использованием динамической модели трансмиссии, а также кривые функций распределения ресурса передачи с различными циклами нагружения, построенные с использованием предложенной методики. В рассмотренном расчетном примере долговечность передачи для ступенчатого цикла нагружения выше более чем в 2 раза по сравнению с непрерывным циклом нагружения. Показано, что при использовании стандартно вычисляемого коэффициента, учитывающего динамическую нагрузку, расчетные оценки долговечности передачи оказываются значительно завышены. При этом погрешность стандартной методики будет зависеть от диапазона частот, при которых работает передача, и наиболее существенна эта погрешность при работе передачи вблизи собственных частот.

Ключевые слова: показатели долговечности, ресурс зубчатой передачи, динамическая нагруженность, проходческий комбайн

Для цитирования. Прушак, В. Я. Влияние динамической нагруженности на долговечность зубчатой передачи трансмиссии тяжело нагруженных проходческих машин / В. Я. Прушак, Д. А. Черноус, О. М. Волчек // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 2. – С. 192–200. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-192-200>

V. Ya. Prushak¹, D. A. Chernous², O. M. Volchek³

¹*Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production, Soligorsk, Belarus*

²*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus*

³*Baranovichi State University, Baranovichi, Belarus*

INFLUENCE OF DYNAMIC LOAD ON GEAR TRANSMISSION DURABILITY OF HEAVY-DUTY ROADHEADING MACHINES

Abstract. The article proposes a new method of calculation of the indicators of the durability of the gear transmission of heavy-loaded roadheading machines, allowing a more accurate assessment of the dynamic loading of the teeth. Within the framework of this technique, the elastic moment amplification factors determined by the amplitude-frequency characteristic of transmission are used instead of the specific circumferential dynamic force in the calculation of the maximum operating voltages. The maximum stresses in the bending of teeth and the probability of failure-free operation of the technical system are determined. A spur transmission used in the drive of the Executive body of roadheader is considered as an example of application of the proposed design technique. The comparison of calculated estimations of gear transmission reliability obtained on the basis of the standard method and using amplitude-frequency characteristics is carried out. In the considered design

example durability of transfer for a step cycle of loading is more than 2 times higher in comparison with a continuous cycle of loading. It is shown that using a standard calculated coefficient that takes into account dynamic load, the calculated estimations of the durability of the transmission are significantly overestimated. At the same time, the error of the standard method will depend on the frequency range at which the transmission operates, and this error is most significant when the transmission operates near its own frequencies.

Keywords: durability characteristics, gear transmission durability, dynamic load, roadheading machine

For citation. Prushak V. Ya., Chernous D. A., Volchek O. M. Influence of dynamic load on gear transmission durability of heavy-duty roadheading machines. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 2, pp. 192–200 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-192-200>

Введение. Условия современного производства требуют постоянной оптимизации и модернизации технологического оборудования для повышения экономической эффективности производственных процессов. Данное наблюдение относится, в частности, к горнодобывающему оборудованию, используемому в ОАО «Беларуськалий» [1–4]. Введение инноваций в производственный процесс приводит к необходимости проведения комплексного многопараметрического анализа нового технического решения. Подобный анализ подразумевает оценку как технико-экономических параметров технической системы, так и ее надежности. Основным показателем надежности узлов и агрегатов проходческих комбайнов является долговечность (наработка элемента до отказа) [1, 3]. Для прогнозирования долговечности узлов осуществляется стандартный расчет деталей машин на усталость при нестационарной напряженности и ограниченном ресурсе [1, 5–7]. Основной этап такого расчета – это определение максимального значения интенсивности тензора напряжений, действующих в детали.

Базовым элементом трансмиссий проходческого комбайна являются зубчатые передачи. Расчет максимальных напряжений при изгибе и контактном взаимодействии зубьев шестерен осуществляется на основе известных соотношений [8], содержащих стандартным образом определяемые коэффициенты. Однако при варьировании значений геометрических, кинематических и силовых параметров передачи в достаточно широких диапазонах использование данных коэффициентов не обеспечивает приемлемой точности прогноза максимальных напряжений. В частности, при расчете коэффициента K_v , учитывающего динамическую нагрузку [8, 9], принимается, что сама удельная окружная динамическая сила прямо пропорциональна окружной скорости. Такой подход не позволяет адекватно оценить вибрационную нагруженность шестерен, в особенности вблизи собственных частот передачи [10]. Более адекватными в этом отношении представляются расчетные методики, подразумевающие использование амплитудно-частотных характеристик исследуемой системы [10–12]. В связи со сказанным *целью настоящего исследования* является проведение сравнительного анализа расчетных оценок показателей надежности зубчатой передачи, полученных на основе стандартной методики и с использованием амплитудно-частотных характеристик (АЧХ).

Оценка вероятности безотказной работы технической системы. При нестационарной напряженности долговечность T деталей машин определяется соотношением [6]

$$\lg(T) = \lg(\tilde{T}) + u_P S_{\lg T}, \quad (1)$$

где \tilde{T} – медиальное значение долговечности, соответствующее вероятности разрушения $P = 0,5$ (50 %); u_P – квантиль нормального распределения, соответствующий заданному значению вероятности разрушения P ; $S_{\lg T}$ – среднее квадратичное отклонение логарифма долговечности.

При известном значении u_P вероятность разрушения P и, соответственно, вероятность безотказной работы P_+ будут вычисляться по формулам:

$$P(u_P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \exp\left[-0,5(x - u_P)^2\right] dx, \quad P_+(u_P) = 1 - P(u_P). \quad (2)$$

Величина $S_{\lg T}$ определяется коэффициентами вариации амплитуды действующего напряжения v_σ и предела выносливости детали $v_{\sigma-1д}$:

$$S_{lgT} = 0,434m\sqrt{v_{\sigma_a}^2 + v_{\sigma_{-1д}}^2}, \quad (3)$$

где m – показатель степени для кривой усталости $\sigma(N)$ в форме

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{-1}}\right)^m = \frac{N_0}{N},$$

где σ_{-1} – предел выносливости по кривой усталости; N_0 – число циклов, соответствующее точке перелома на кривой усталости; N – число циклов, которое выдерживает испытуемый образец при амплитуде напряжения σ . Коэффициент вариации определяется как отношение среднего квадратичного отклонения величины к ее среднему значению.

В режиме работы узлов проходческих комбайнов выделяются повторяющиеся блоки нагружения [1]. Эти блоки состоят из r ступеней, характеризующихся заданной циклической частотой f_i (s^{-1}) и амплитудой σ_{ai} (МПа) циклов напряженности ($i = 1..r$). При таком режиме нагружения медиальное значение долговечности \tilde{T} определяется следующим образом [5, 6]:

$$\tilde{T} = t_6 \frac{a_P \bar{\sigma}_{-1д}^m N_0}{N_6 \sum_{(\bar{\sigma}_{ai} > \bar{\sigma}_{-1д})} \bar{\sigma}_{ai}^m v_i} = \frac{a_P \bar{\sigma}_{-1д}^m N_0}{\sum_{(\bar{\sigma}_{ai} > \bar{\sigma}_{-1д})} \bar{\sigma}_{ai}^m v_i} \sum_{i=1}^r \frac{v_i}{f_i}, \quad (4)$$

где t_6 – продолжительность блока нагружения; N_6 – общее число циклов напряженности в блоке; $\bar{\sigma}_{-1д}$, $\bar{\sigma}_{ai}$ – средние значения предела выносливости детали и амплитуды напряжения, соответствующей i -й ступени; $v_i = N_i/N_6$ – относительное число циклов, соответствующее i -й ступени; a_P – сумма относительных усталостных повреждений. Величина a_P определяется по результатам экспериментальных исследований при программном нагружении исследуемой детали в режиме, эквивалентном режиму естественного функционирования [1]. При отсутствии достаточного объема экспериментальных данных для упрощенных расчетов можно использовать следующее соотношение [6]:

$$a_P = \frac{\bar{\sigma}_{a \max} \zeta - K \bar{\sigma}_{-1д}}{\bar{\sigma}_{a \max} - K \bar{\sigma}_{-1д}}, \quad \zeta = \sum_{(\bar{\sigma}_{ai} > K \bar{\sigma}_{-1д})} \frac{\bar{\sigma}_{ai}}{\bar{\sigma}_{a \max}} v_i, \quad (5)$$

где $\bar{\sigma}_{a \max}$ – наибольшее значение амплитуды напряжений в блоке. Коэффициент K в последнем равенстве чаще всего [5] принимается равным 0,6.

Если в блоке нагружения не удастся выделить отдельные ступени напряженности, то устанавливается непрерывная функция распределения амплитудных значений напряжения с плотностью вероятности $\varphi(\sigma_a)$. При этом суммирование в знаменателе правой части равенства (4) заменяется интегралом

$$\sum_{(\bar{\sigma}_{ai} > \bar{\sigma}_{-1д})} \bar{\sigma}_{ai}^m v_i \Rightarrow \int_{\bar{\sigma}_{-1д}}^{\infty} \bar{\sigma}_a^m \varphi(\bar{\sigma}_a) d\bar{\sigma}_a. \quad (6)$$

Коэффициент ζ в (5) будет также определяться интегрированием

$$\zeta = \frac{1}{\bar{\sigma}_{a \max} \int_{K \bar{\sigma}_{-1д}}^{\infty} \varphi(\bar{\sigma}_a) d\bar{\sigma}_a} \int_{\bar{\sigma}_{-1д}}^{\infty} \bar{\sigma}_a \varphi(\bar{\sigma}_a) d\bar{\sigma}_a. \quad (7)$$

Суммирование в числителе правой части равенства (4) определяет так называемый эффективный период процесса T_e (усредненное по блоку нагружения значение периода колебаний). Величина T_e обратна несущей частоте процесса f_0 [7]. При непрерывном изменении средних значений амплитуды напряжений в блоке и изменении циклической частоты в диапазоне от f_{\min} до f_{\max} для вычисления периода T_e необходимо знать функцию спектральной плотности $\Phi(f)$. Тогда

$$T_e = \sum_{i=1}^r \frac{v_i}{f_i} = \frac{1}{\sqrt{\int_0^{\infty} f^2 \Phi(f) df}} \sqrt{\int_0^{\infty} \Phi(f) df}. \quad (8)$$

Функция $\Phi(f)$ равна нулю вне области изменения частоты. Для учета дополнительной динамической нагрузки, обусловленной изменением частоты деформирования, предлагается при нормировке функции спектральной плотности в уравнении (8) использовать коэффициенты усиления упругого момента $K_{\text{АЧХ}}(f)$, определяемые по приведенной ($K_{\text{АЧХ}}(0) = 1$) амплитудно-частотной характеристике передачи. При этом в диапазоне частот от f_{\min} до f_{\max} выполняется равенство $\Phi(f) = \Phi_1(f) \cdot K_{\text{АЧХ}}(f)$. Здесь $\Phi_1(f)$ – функция спектральной плотности, нормированная на единицу.

Используя совместно уравнения (1) и (2), установим зависимость вероятности безотказной работы P_+ от величины долговечности T (функцию распределения долговечности):

$$P_T(T) = P_+ \left(\frac{\lg(T) - \lg(\tilde{T})}{S_{\lg T}} \right). \quad (9)$$

Здесь величина $S_{\lg T}$ определяется соотношением (3), а \tilde{T} – соотношением (4) с учетом (5)–(8).

Определение максимальных напряжений при изгибе зубьев. Определение входящих в приведенные соотношения средних значений амплитуд действующих напряжений осуществляется по стандартной методике [8]. В рамках настоящей работы ограничимся оценкой ресурса, обусловленного усталостью зубьев шестерен на изгиб. При этом

$$\bar{\sigma}_a = Y_F Y_\varepsilon Y_\beta \omega_F \mu^{-1}, \quad (10)$$

где Y_F , Y_ε , Y_β – коэффициенты, учитывающие форму зуба, перекрытие зубьев и наклон зуба соответственно; ω_F – удельная окружная сила (Н/мм); μ – модуль зацепления (мм). Амплитуда напряжения в последнем равенстве измеряется в МПа.

Величина ω_F определяется соотношением

$$\omega_F = 2000 M_F (b_\omega d_\omega) K_\alpha K_\beta K_v, \quad (11)$$

где M_F – расчетная нагрузка (Н·м); b_ω – рабочая ширина венца (мм); d_ω – начальный диаметр шестерни (мм); K_α , K_β , K_v – коэффициенты, учитывающие распределение нагрузки между зубьями, распределение нагрузки по ширине венца и динамическую нагрузку соответственно.

При использовании стандартной методики расчета величина нагрузки M_F соразмерна максимальному подводимому к шестерни моменту, число циклов действия которого превышает $0,03N_6$. В описанной выше расчетной методике (4)–(8) используются значения амплитуд напряжения, соответствующие каждой отдельной ступени нагружения (данному значению частоты). Поэтому в рамках настоящей работы мы будем использовать «текущие» значения крутящего момента, которые задаются циклограммой работы передачи.

Коэффициент K_v определяется соотношением

$$K_v = 1 + \frac{\omega_{Fv}}{\omega_{Fст}}, \quad \omega_{Fст} = 2000 M_F (b_\omega d_\omega)^{-1} K_\alpha K_\beta, \quad (12)$$

где ω_{Fv} – удельная окружная динамическая сила.

Согласно стандартной расчетной методике значение величины ω_{Fv} вычисляется по формуле

$$\omega_{Fv} = \delta_F g_0 v \sqrt{\frac{a_\omega}{u}}, \quad (13)$$

где δ_F – коэффициент, учитывающий влияние вида зубчатой передачи и модификации профиля зубьев; g_0 – размерный коэффициент, учитывающий влияние разности шагов зацепления зубьев

шестерни и колеса; $v = \pi \cdot f \cdot d_{\omega} \cdot 10^{-3}$ – окружная скорость (м/с); a_{ω} – межосевое расстояние (мм); i – передаточное число. Если определенная по формуле (13) удельная динамическая сила превысит значение $\omega_{Fv\max}$, то при расчетах принимается $\omega_{Fv} = \omega_{Fv\max}$. Величина $\omega_{Fv\max}$ задается по стандартным таблицам [8] в зависимости от модуля зацепления μ и степени точности передачи по нормам плавности.

Для более точного учета вибрационной нагруженности передачи коэффициент K_v в уравнении (11) заменяется коэффициентом усиления упругого момента $K_{\text{АЧХ}}(f)$. При этом

$$\omega_F = \omega_{F\text{ст}} K_{\text{АЧХ}}(f). \quad (14)$$

Предел выносливости $\sigma_{-1д}$ для шестерни связан с величиной σ_{-1} , определяемой по кривой усталости соотношением

$$\bar{\sigma}_{-1д} = \frac{\sigma_{-1}}{S_F} K_g K_c Y_c, \quad (15)$$

где K_g , K_c , Y_c – коэффициенты учитывающие влияние шлифования переходной поверхности, двустороннего приложения нагрузки, градиента напряжений и чувствительности материала к концентрациям напряжений соответственно; S_F – коэффициент безопасности, учитывающий нестабильность свойств материала, ответственность передачи и способ получения заготовок.

Значения коэффициентов, входящих в равенства (10)–(15), определяются по стандартным графикам и таблицам, приведенным, в частности, в [8].

Пример расчета. В качестве примера использования предложенной расчетной методики рассмотрим прямозубую цилиндрическую передачу, используемую в приводе исполнительного органа проходческого комбайна [1]. Исходные геометрические параметры передачи следующие: модуль передачи $\mu = 20$ мм; число зубьев шестерни $z_1 = 14$; число зубьев зубчатого колеса $z_2 = 22$; рабочая ширина венца $b_{\omega} = 60$ мм. Степень точности передачи по нормам плавности 5-я. Шестерня и зубчатое колесо изготовлены из стали 20Х2Н4А. Твердость поверхности составляет HRC = 58–60, а сердцевины – HB = 360. Параметры выносливости по кривой усталости принимаются равными [9] $N_0 = 4 \cdot 10^6$, $m = 9$, $\sigma_{-1} = 820$ МПа. Экспериментально определенные значения коэффициентов вариации действующих напряжений и предела выносливости шестерни, необходимые для вычисления среднего квадратичного отклонения логарифма долговечности (3), составляют соответственно $v_{\sigma} = 0,13$ и $v_{-1д} = 0,08$.

В табл. 1 представлены значения коэффициентов, необходимых для вычисления амплитудных значений действующих напряжений и предела выносливости шестерни. Данные значения определены по справочным данным из [8].

Таблица 1. Коэффициенты для вычисления максимальных действующих напряжений и предела выносливости шестерни

Table 1. Coefficients for calculation of maximum stresses and fatigue limit of a gearwheel

Параметр	Y_F	Y_{ϵ}	Y_{β}	K_{α}	K_{β}	δ_F	g_0 , Н·с/(м·мм ^{1,5})	$\omega_{Fv\max}$, Н/мм	K_g	K_c	Y_c	S_F
Значение	4	1	1	1	1,1	0,016	37	150	0,75	1	0,86	1,7

На рис. 1 представлена амплитудно-частотная характеристика передачи, полученная с использованием динамической модели трансмиссии [13].

Не снижая общности вышеизложенной методики оценки ресурса, в расчетном примере предположим, что в течение цикла нагружения подаваемая на шестерню мощность не изменяется. При этом изменение крутящего момента, а следовательно, и амплитуды напряжения обусловлено изменением частоты вращения. Опишем два режима работы передачи (рис. 1). При первом режиме частота вращения шестерни изменяется от 5 до 8 об/с, при втором – от 18 до 21 об/с. Для обоих режимов зададим одинаковое значение максимального крутящего момента $M_{F\max} = 6000$ Н·м. Тогда текущие значения момента будут вычисляться по формуле

$$M_F = M_{F\max} \frac{f_{\min}}{f}. \quad (16)$$

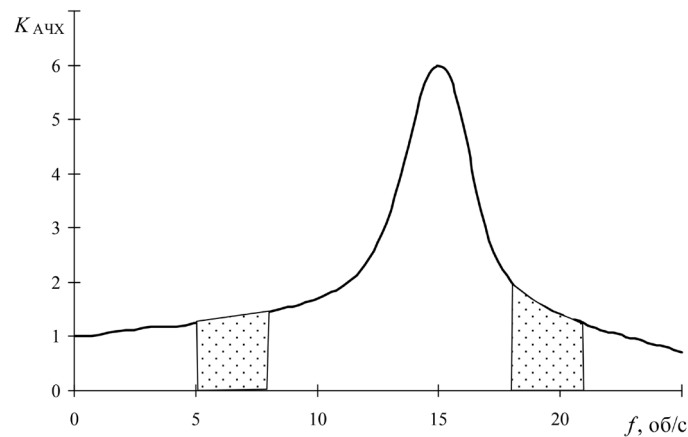


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика. Выделенные области соответствуют рассматриваемым диапазонам частот

Fig. 1. The amplitude-frequency response characteristic. The highlighted areas correspond to the considered frequency bands

Используя соотношение (16) в уравнениях (10)–(14), установим расчетную зависимость средних значений амплитуд действующих напряжений от частоты $\bar{\sigma}_a(f)$. Значение $M_{F_{\max}}$ выбрано таким образом, чтобы для обоих диапазонов частот выполнялись условия $\bar{\sigma}_{a_{\max}} > \bar{\sigma}_{-1д}$, $\bar{\sigma}_{-1д} > \bar{\sigma}_{a_{\min}} > K\bar{\sigma}_{-1д}$.

Для каждого из режимов рассмотрим два способа изменения частоты и, соответственно, напряжения. При первом способе циклограмма нагружения будет трехступенчатой, а при втором – непрерывной. Циклограмма для первого способа изменения частоты определяется данными табл. 2. Для описания данного цикла достаточно задать массивы значений частот f_i и относительных чисел циклов v_i . Соответствующие значения амплитуд напряжений определяются соотношением $\bar{\sigma}_{ai} = \bar{\sigma}_a(f_i)$.

Таблица 2. Трехступенчатый цикл нагружения передачи
Table 2. The three-stage gear loading cycle

Параметр	Степень		
	1	2	3
f	f_{\min}	$0,5(f_{\max} + f_{\min})$	f_{\max}
n	0,1	0,2	0,7

При непрерывном изменении частоты необходимо определить параметры плотности вероятности $\varphi(\sigma_a)$ распределения амплитудных значений напряжения. В расчетном примере будем рассматривать наиболее характерный для большинства технических систем [6, 7] рэлеевский закон распределения, плотность вероятности для которого выражается формулой

$$\varphi(\sigma_a) = \frac{\sigma_a}{S_\sigma^2} \exp\left(-\frac{\sigma_a^2}{2S_\sigma^2}\right), \tag{17}$$

где S_σ – параметр масштаба, для данного распределения совпадающий с модой.

Параметр S_σ можно определить, зная функцию $\bar{\sigma}_a(f)$. Приравняв усредненное по диапазону частот значение амплитуды напряжений к математическому ожиданию, определенному для функции (17), получим

$$S_\sigma = \sqrt{\frac{2}{\pi} \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \frac{\bar{\sigma}_a(f) df}{f_{\max} - f_{\min}}}. \tag{18}$$

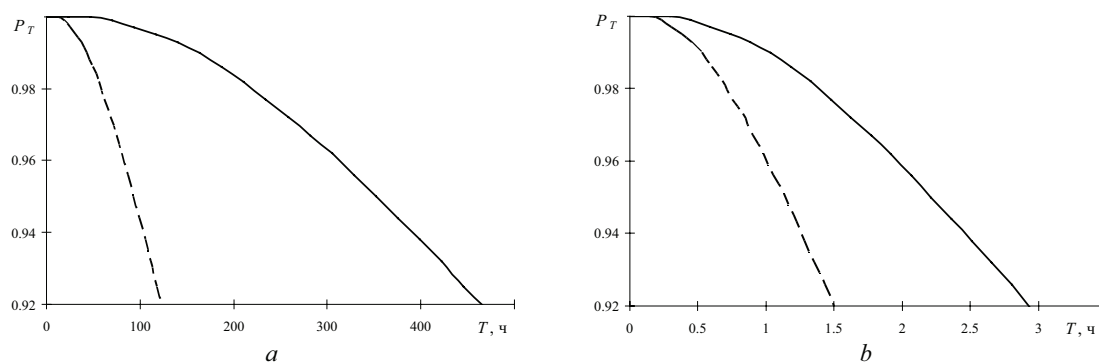


Рис. 2. Расчетные функции распределения ресурса передачи для диапазонов частот от 5 до 8 об/с (а) и от 18 до 21 об/с (б). Сплошные кривые соответствуют трехступенчатому циклу нагружения, пунктирные – непрерывному

Fig. 2. The estimating functions of distribution of transmission resource for frequency bands 5 to 8 Rev/s (a) and 18 to 21 Rev/s (b). The solid curves correspond to three-step loading cycle, the dotted curves – to continuous one

Расчет медиального значения долговечности будем осуществлять на основе двух различных подходов. Методика I (стандартная) – при вычислении средних значений амплитуд действующих напряжений используется коэффициент K_v , определяемый соотношениями (12) и (13). Методика II (по АЧХ) – удельная окружная сила ω_F определяется уравнением (14), где функция $K_{АЧХ}(f)$ задается амплитудно-частотной характеристикой передачи.

В табл. 3 представлены результаты расчетного определения величины \tilde{T} . Зная величину \tilde{T} и определив среднее квадратичное отклонение логарифма долговечности, можно по формуле (9) установить распределение ресурса передачи $P_T(T)$. Кривые, представленные на рис. 2, построены с использованием методики II. В табл. 3 в скобках указаны определенные по кривым $P_T(T)$ значения долговечности, соответствующие 95%-ной вероятности безотказной работы.

Таблица 3. Результаты расчета медиального значения долговечности и долговечности, соответствующей 95%-ной вероятности безотказной работы (ч)

Table 3. The results of calculation of durability median values and durability corresponded to 95 % probability of failure-free operation (hour)

Диапазон частот	Способ изменения	Расчетная методика	
		I	II
От 5 до 8 об/с	Трехступенчатый	13551 (2038)	2345 (353)
	Непрерывный	7071 (1063)	621 (93)
От 18 до 21 об/с	Трехступенчатый	788 (119)	15 (2)
	Непрерывный	159 (24)	8 (1)

Можно отметить, что расчетные оценки, полученные на основе стандартного подхода, завышены по сравнению с результатами использования более точной методики, учитывающей амплитудно-частотную характеристику передачи. Отмеченное расхождение наиболее существенно при работе передачи вблизи собственных частот. В рассмотренном расчетном примере долговечность передачи для ступенчатого цикла нагружения выше более чем в 2 раза по сравнению с непрерывным циклом нагружения.

Заключение. Изложена методика расчета ресурса зубчатой передачи, в рамках которой используется коэффициент усиления момента, определяемый по амплитудно-частотной характеристике. Показано, что при использовании стандартно вычисляемого коэффициента, учитывающего динамическую нагрузку, расчетные оценки долговечности передачи оказываются существенно завышены. При этом погрешность стандартной методики будет зависеть от диапазона частот, при которых работает передача.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Прушак, В. Я. Научные основы повышения долговечности быстроизнашивающихся деталей горных машин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.06 / В. Я. Прушак. – М., 2000. – 324 л.
2. Технологические схемы рудников ПО «Беларуськалий»: состояние, проблемы, перспективы совершенствования / А. Д. Смычник [и др.] // Гор. журн. – 2003. – № 7. – С. 16–20.
3. Анализ и пути повышения надежности отечественного и зарубежного горно-шахтного оборудования / В. Я. Щерба [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Приклад. науки. – 2005. – № 6. – С. 191–194.
4. Старовойтов, Ю. В. Проблемы реструктуризации калийных рудников Старобинского месторождения / Ю. В. Старовойтов, М. В. Прушак, Т. П. Щерба // Гор. информ.-аналит. бюл. – 2006. – Вып. 1. – С. 45–51.
5. Серенсен, С. В. Руководство по расчету на усталость деталей машин (в вероятностном аспекте) / С. В. Серенсен, В. П. Когаев. – М.: ВНИИНМАШ, 1972. – 48 с.
6. Серенсен, С. В. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность / С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Р. М. Шнейдерович. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
7. Болотин, В. В. О прогнозировании надежности и долговечности машин / В. В. Болотин // Машиноведение. – 1977. – № 5. – С. 86–93.
8. Зубчатые передачи: справочник / Е. Г. Гинзбург [и др.]; под общ. ред. Е. Г. Гинзбурга. – М.: Машиностроение, 1980. – 416 с.
9. Когаев, В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени / В. П. Когаев. – М.: Машиностроение, 1977. – 218 с.
10. Ишин, Н. Н. Динамика и вибромониторинг зубчатых передач / Н. Н. Ишин. – Минск: Беларус. навука, 2013. – 432 с.
11. Старовойтов, Ю. В. Разработка эквивалентной динамической модели и определение амплитудно-частотной характеристики привода исполнительного органа барабанного типа с вертикальной осью / Ю. В. Старовойтов, Н. А. Дакуко // Гор. информ.-аналит. бюл. – 2006. – Вып. 1. – С. 223–231.
12. Старовойтов, Ю. В. Методы и средства снижения динамических нагрузок в приводах выемочных машин / Ю. В. Старовойтов // Гор. механика. – 2008. – № 2. – С. 60–63.
13. Кучик, А. С. Моделирование работы исполнительного органа проходческого комбайна / А. С. Кучик, Е. В. Щерба, О. М. Волчек // Инновации на транспорте и в машиностроении: сб. тр. IV междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 28–29 апр. 2016 г.: в 2 т. / Нац. минерально-сырьевой ун-т «Горный»; под ред. В. В. Максарова. – СПб., 2016. – Т. 2. – С. 34–37.

References

1. Prushak V. Ya. *Scientific basis of increase of wearing parts durability of mining machines*. Moscow, 2000. 324 p. (in Russian).
2. Smychnik A. D., Zubov V. P., Kalugin P. A., Kirienko V. M. Technological schemes of mines of PE “Belaruskali”: the status, problems and prospects of development. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*, 2003, no. 7, pp. 16–20 (in Russian).
3. Shcherba V. Ya., Starovoitov V. S., Starovoitov Yu. V., Zayats I. M. Analysis and ways of increasing of reliability of domestic and foreign mining equipment. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B: Prikladnye nauki = Vestnik of Polotsk State University. Part B. Industry. Applied Sciences*, 2005, no. 6, pp. 191–194 (in Russian).
4. Starovoitov Y. V., Prushak M. V., Shcherba T. P. Issues of restructuring of potash mines of Starobin Deposit. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining Information and Analytics Bulletin*, 2006, iss. 1, pp. 45–51 (in Russian).
5. Serensen S. V., Kogaev V. P. *Guidance on calculation of fatigue of machine parts (in probabilistic aspect)*. Moscow, VNIINMASH Publ., 1972. 48 p. (in Russian).
6. Serensen S. V., Kogaev V. P., Shneiderovitch R. M. *Bearing capacity and calculation of strength of machine parts*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 488 p. (in Russian).
7. Bolotin V. V. Simulation of reliability and durability of machines. *Mashinovedenie [Machine Science]*, 1977, no. 5, pp. 86–93 (in Russian).
8. Ginzburg E. G., Golovanov N. F., Firun N. B., Khalebskii N. T. *Gear transmission: Handbook*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 416 p. (in Russian).
9. Kogaev V. P. *Strength calculations by time-varying stresses*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 218 p. (in Russian).
10. Ishin N. N. *Dynamics and gear vibration monitoring*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2013. 432 p. (in Russian).
11. Starovoitov Y. V., Dakuko N. A. Development of equivalent dynamic model and determination of amplitude-frequency characteristics of vertical axis drum-type actuator. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining Information and Analytics Bulletin*, 2006, iss. 1, pp. 223–231 (in Russian).
12. Starovoitov Y. V. Methods and means of reducing of dynamic loads on mining machines drives. *Gornaya mekhanika [Mining Mechanics]*, 2008, no. 2, pp. 60–63 (in Russian).
13. Kuchik A. S., Shcherba E. V., Volchek M. O. Operations simulation of executive body of a roadheader. *Innovatsii na transporte i v mashinostroenii: sbornik trudov IV mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Sankt-Peterburg, 28–29 aprelya 2016 g. T. 2 [Innovations in transport and mechanical engineering: Proceedings of the IV International scientific-practical conference, St. Petersburg, 28–29 April, 2016. Vol. 2]*. Saints Petersburg, V. V. Maksarov Mining National Mineral Resources University, 2016, pp. 34–37 (in Russian).

Информация об авторах

Прушак Виктор Яковлевич – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, директор, Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством (ул. Козлова, 69, 223710, Солигорск, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: ipr@sipr.by

Черноус Дмитрий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая физика и теоретическая механика», Белорусский государственный университет транспорта (ул. Кирова, 34, 246653, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: belsut@belsut.gomel.by

Волчек Ольга Михайловна – аспирант, Барановичский государственный университет (ул. Войкова, 21, 225404, Барановичи, Брестская область, Республика Беларусь). E-mail: leolya07@mail.ru

Information about the authors

Victor Y. Prushak – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Director, Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production (69, Kozlov Str., 223710, Soligorsk, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: ipr@sipr.by

Dmitry A. Chernous – Ph. D. (Engineering), Associate Professor of the Department of Technical Physics and Theoretical Mechanics, Belarusian State University of Transport (34, Kirov Str., 246653, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: belsut@belsut.gomel.by

Olga M. Volchek – Postgraduate Student, Baranovichi State University (21, Voikov St., 225404, Baranovichi, Brest Region, Republic of Belarus). E-mail: leolya07@mail.ru

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

УДК 536.2(075)46
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-201-213>

Поступила в редакцию 20.10.2017
Received 20.10.2017

В. А. Кот

*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь*

**ИНТЕГРАЛЬНЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
С ГРАНИЧНЫМ УСЛОВИЕМ ВТОРОГО РОДА.**
1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Аннотация. На основе систем тождественных равенств, и интегральных граничных характеристик представлен новый алгоритм решения краевой задачи нестационарной теплопроводности для тел канонической формы с граничным условием второго рода. Схема отыскания приближенных аналитических решений краевых задач нестационарной теплопроводности с граничным условием второго рода предусматривает введение в рассмотрение фронта температурного возмущения и разделения всего процесса нагрева на две стадии. Для первой стадии процесса на основе предварительного дифференцирования уравнения теплопроводности по пространственной координате и последующего применения симметричных интегральных и дифференциальных операторов построены соответственно две последовательности интегральных и дифференциальных тождественных равенств. Каждая из них содержит интегральные либо дифференциальные граничные характеристики для заданного граничного условия второго рода. Для второй стадии путем введения граничной функции, предварительного дифференцирования уравнения теплопроводности по пространственной координате и последующего применения симметричных интегральных операторов построена последовательность интегральных тождественных равенств, содержащих интегральные граничные характеристики для граничного условия второго рода и граничной функции. На основе полученных интегральных и дифференциальных тождественных равенств построены замкнутые системы уравнения, позволяющие находить полиномиальные коэффициенты температурного профиля для первой и второй стадий процесса. Приведена общая схема нахождения приближенных значений собственных чисел краевых задач с граничными условиями второго рода на основе составления обыкновенного дифференциального уравнения с переводом его в характеристическое уравнение. Для каждого из двух этапов предложены специальные интегральные операторы, которые сводят краевую задачу к обыкновенному дифференциальному уравнению.

Ключевые слова: уравнение теплопроводности, интегральный метод теплового баланса, фронт температурного возмущения

Для цитирования. Кот, В. А. Интегральный метод решения задач теплопроводности с граничным условием второго рода. 1. Основные положения / В. А. Кот // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – Т. 63, № 2. – С. 201–213. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-201-213>

V. A. Kot

A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**INTEGRAL METHOD OF SOLVING HEAT-CONDUCTION PROBLEMS WITH
THE SECOND-KIND BOUNDARY CONDITION.**
1. BASIC STATEMENTS

Abstract. On the basis of systems of identical equalities and integral boundary characteristics, a new algorithm of solving a boundary-value problem on the nonstationary heat conduction in a canonical body with boundary condition of the second kind has been developed. The scheme proposed for finding approximate analytical solutions of boundary-value problems on nonstationary heat conduction with boundary conditions of the second kind involves the introduction into consideration of a temperature-disturbance front and separation of the whole heating process into two stages. For the first stage of this pro-

cess, on the basis of the differentiation of the heat-conduction equation over a space variable and the application of symmetric integral and differential operators to the expressions obtained, two sequences of integral and differential identical equalities have been constructed. Each of these sequences includes integral or differential limiting characteristics for a definite boundary condition of the second kind. For the second stage, by way of introduction of a boundary function, differentiation of the heat-conduction equation with respect to a spatial coordinate, and application of integral operators to the expression obtained, a sequence of integral identical equalities involving integral boundary characteristics for the second-kind boundary condition has been constructed. On the basis of the integral and differential identical equalities obtained, closed systems of equations, allowing one to find polynomial coefficients of the temperature profile for the first and second stages of the heating process, have been constructed. A general scheme of determining approximate eigenvalues of boundary-value problems with boundary conditions of the second kind on the basis of construction of an ordinary differential equation and transformation of it into the characteristic equation is proposed. For each of the two stages of the heating process, special integral operators, reducing the boundary-value heat-conduction problem to the ordinary differential equation, are proposed.

Keywords: heat-conduction equation, integral method of heat balance, temperature disturbance front

For citation. Kot V. A. Integral method of solving heat-conduction problems with the second-kind boundary condition.

1. Basic statements. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 2, pp. 201–213 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-201-213>

Постановка задачи. Рассмотрим задачу нестационарной теплопроводности в следующей математической формулировке:

$$\frac{1}{\kappa} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} = \frac{1}{\bar{y}^m} \left(\bar{y}^m \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{y}} \right), \quad \bar{t} > 0, \quad 0 < \bar{y} < R, \quad (1)$$

$$\bar{T}(\bar{y}, 0) = T_0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{T}(0, \bar{t})}{\partial \bar{y}} = 0, \quad \lambda \frac{\partial \bar{T}(R, \bar{t})}{\partial \bar{y}} = \bar{q}(\bar{t}), \quad (3)$$

где \bar{T} – температура, T_0 – начальная температура, \bar{t} – время, κ – коэффициент температуропроводности, λ – коэффициент теплопроводности, R – половина толщины (радиус) канонического тела, \bar{y} – координата, $\bar{q}(\bar{t})$ – плотность теплового потока, $m = 0, 1, 2$ соответственно для декартовой, цилиндрической и сферической систем координат. Придадим задаче (1)–(3) безразмерный вид, введя обозначения:

$$T = \frac{\bar{T} - T_0}{\Delta T}, \quad \Delta T = T_{\text{ref}} - T_0, \quad t = \frac{\bar{t}}{t^*}, \quad t^* = \frac{R^2}{\kappa}, \quad y = \frac{\bar{y}}{R}, \quad q(t) = \frac{R}{\lambda} \bar{q}(\bar{t}),$$

где T_{ref} – референтная температура, ΔT – температурный масштаб, t^* – временной масштаб. Тогда вместо (1)–(3) придем к задаче:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{y^m} \frac{\partial}{\partial y} \left(y^m \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad t > 0, \quad 0 < y < 1, \quad (4)$$

$$T(y, 0) = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial T(0, t)}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial T(1, t)}{\partial y} = q(t). \quad (6)$$

В соответствии с концепцией интегральных методов, основанных на рассмотрении фронта температурного возмущения, разделим процесс на две стадии. При этом будем предполагать, что на первой стадии происходит постепенное продвижение фронта температурного возмущения $\delta(t)$ вглубь тела до момента достижения фронтом центра симметрии. В этом случае область, находящаяся за пределами фронта возмущения ($0 \leq y \leq 1 - \delta(t)$), будет сохранять начальную температуру. Начиная со второй стадии, происходит прогрев тела по всему сечению.

Переходя к координате $\xi = 1 - y$, отсчитываемой от поверхности тела, запишем задачу (4)–(6) для первой стадии процесса:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{(1-\xi)^m} \frac{\partial}{\partial \xi} \left((1-\xi)^m \frac{\partial T}{\partial \xi} \right), \quad 0 < t \leq t_1, \quad \xi \in [0, \delta(t)], \quad (7)$$

$$T(\xi, 0) = 0, \quad \delta(0) = 0, \quad (8)$$

$$-\frac{\partial T(0, t)}{\partial \xi} = q(t), \quad 0 \leq t \leq t_1, \quad (9)$$

$$(i): T(\delta, t) = 0, \quad (ii): \frac{\partial T(\delta, t)}{\partial y} = 0. \quad (10)$$

Здесь t_1 соответствует условию $\delta(t_1) = 1$. Для второй стадии математическая формулировка задачи имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{(1-\xi)^m} \frac{\partial}{\partial \xi} \left((1-\xi)^m \frac{\partial T}{\partial \xi} \right), \quad t_1 \leq t < \infty, \quad \xi \in [0, 1], \quad (11)$$

$$T(\xi, t_1) = T(\xi, t_1), \quad (12)$$

$$-\frac{\partial T(0, t)}{\partial \xi} = q(t), \quad t_1 \leq t < \infty, \quad (13)$$

$$\frac{\partial T(1, t)}{\partial \xi} = 0, \quad t_1 \leq t < \infty. \quad (14)$$

Интегральные тождественные равенства. В [14, 15] доказано существование последовательности тождественных равенств в краевой задаче нестационарной теплопроводности с граничным условием первого рода. Следуя [15], введем в рассмотрение интегральные операторы следующего вида:

$$\mathcal{L}_\xi^\xi \equiv \int_\delta^\xi d\xi (1-\xi)^m \int_\delta^\xi \frac{1}{(1-\xi)^m} (\cdot) d\xi, \quad \mathcal{L}_1 \equiv \int_\delta^0 d\xi (1-\xi)^m \int_\delta^\xi \frac{1}{(1-\xi)^m} (\cdot) d\xi. \quad (15)$$

Данные операторы образуют две последовательности:

$$\mathcal{L}_n^\xi \equiv \overbrace{\mathcal{L}_\xi \dots \mathcal{L}_\xi}^n \mathcal{L}_\xi, \quad \mathcal{L}_n \equiv \overbrace{\mathcal{L}_1 \dots \mathcal{L}_1}^n \mathcal{L}_1, \quad n = 1, 2, \dots \quad (16)$$

Также введем в рассмотрение интегральные граничные характеристики:

$$Q_n \equiv \underbrace{\int_0^t \dots \int_0^t}_{n} q(t) dt^{(n)} = \int_0^t \frac{(t-\tau)^{n-1}}{(n-1)!} q(\tau) d\tau, \quad \forall n \in \mathbb{Z}_+. \quad (17)$$

Далее последовательно рассмотрим первую и вторую стадии процесса, для которых получим соответствующие последовательности интегральных тождественных равенств.

Первая стадия. Умножим дифференциальное уравнение (7) на $(1-\xi)^m$ и проинтегрируем по области $\xi \in [0, \delta]$:

$$\begin{aligned} \int_0^\delta (1-\xi)^m \frac{\partial T}{\partial t} d\xi &= \frac{d}{dt} \int_0^\delta T(1-\xi)^m d\xi - T(\delta, t)(1-\delta)^m \frac{d\delta}{dt} = \int_0^\delta \frac{\partial}{\partial \xi} \left((1-\xi)^m \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) d\xi = \\ &= \left[(1-\xi)^m \frac{\partial T}{\partial \xi} \right]_0^\delta = (1-\delta)^m \frac{\partial T(\delta, t)}{\partial \xi} - \frac{\partial T(0, t)}{\partial \xi}. \end{aligned} \quad (18)$$

С учетом граничных условий (9) и (10) уравнение (18) примет вид интеграла теплового баланса [1]

$$\frac{d}{dt} \int_0^\delta T(1-\xi)^m d\xi = q(t). \quad (19)$$

Интегрирование (18) при условиях (8) и (9) даст интегральное соотношение

$$\hat{\mathcal{L}}_0 T \equiv Q_1, \tag{20}$$

которое назовем интегральным соотношением первого порядка. Здесь использован интегральный оператор $\hat{\mathcal{L}}_0 \equiv \int_0^\delta (1-\xi)^m (\cdot) d\xi$.

Применим к уравнению (7) интегральный оператор $\hat{\mathcal{L}}_\xi \equiv \int_\delta^\xi (1-\xi)^m (\cdot) d\xi$. Обозначив $T_\xi \equiv \partial T / \partial \xi$, $D_t \equiv \partial / \partial t$, с учетом (10) получим уравнение

$$D_t (\hat{\mathcal{L}}_\xi T) = (1-\xi)^m T_\xi. \tag{21}$$

Используя теорему Лейбница и граничные условия (10), представим уравнение (21) в измененном виде

$$\frac{1}{(1-\xi)^m} D_t (\hat{\mathcal{L}}_\xi T) \equiv D_t \left(\frac{1}{(1-\xi)^m} \hat{\mathcal{L}}_\xi T \right) = T_\xi. \tag{22}$$

Проинтегрируем (22) по области $\xi \in [\xi, \delta]$. С учетом граничного условия (10) имеем:

$$\int_\delta^\xi D_t \left(\frac{1}{(1-\xi)^m} \hat{\mathcal{L}}_\xi T \right) d\xi = D_t \left[\int_\delta^\xi \left(\frac{1}{(1-\xi)^m} \hat{\mathcal{L}}_\xi T \right) d\xi \right] = \int_\delta^\xi T_\xi d\xi = T \Big|_\delta^\xi = T. \tag{23}$$

Теперь умножим (23) на $(1-\xi)^m$ и проинтегрируем по области $\xi \in [\xi, \delta]$:

$$\int_\delta^\xi d\xi (1-\xi)^m \frac{d}{dt} \left[\int_\delta^\xi \left(\frac{1}{(1-\xi)^m} \hat{\mathcal{L}}_\xi T \right) d\xi \right] \equiv \frac{d}{dt} \int_\delta^\xi d\xi (1-\xi)^m \int_\delta^\xi \left(\frac{1}{(1-\xi)^m} \hat{\mathcal{L}}_\xi T \right) d\xi = \int_\delta^\xi T (1-\xi)^m d\xi. \tag{24}$$

В операторной форме уравнение (24) примет вид

$$D_t (\mathcal{L}_\xi (\hat{\mathcal{L}}_\xi T)) = \hat{\mathcal{L}}_\xi T. \tag{25}$$

При $\xi = 0$ уравнение (25) переходит в следующее:

$$D_t (\mathcal{L}_\xi (\hat{\mathcal{L}}_\xi T)) \Big|_{\xi=0} = D_t (\mathcal{L}_1 (\hat{\mathcal{L}}_\xi T)) = (\hat{\mathcal{L}}_\xi T) \Big|_{\xi=0} = \hat{\mathcal{L}}_0 T, \tag{26}$$

или с учетом (20):

$$D_t (\mathcal{L}_1 (\hat{\mathcal{L}}_\xi T)) = Q_1. \tag{27}$$

Интегрирование (27) с начальным условием (8) даст тождественное равенство второго порядка

$$\mathcal{L}_1 (\hat{\mathcal{L}}_\xi T) \equiv Q_2. \tag{28}$$

Применим к уравнению (25) интегральный оператор \mathcal{L}_1 . С учетом граничных условий (10) сразу запишем как

$$\mathcal{L}_1 (D_t (\mathcal{L}_\xi (\hat{\mathcal{L}}_\xi T))) \equiv D_t (\mathcal{L}_1 (\mathcal{L}_\xi (\hat{\mathcal{L}}_\xi T))) \equiv D_t (\mathcal{L}_2 (\hat{\mathcal{L}}_\xi T)) = \mathcal{L}_1 (\hat{\mathcal{L}}_\xi T). \tag{29}$$

Исключив в (29) правую часть с помощью (28), получим

$$D_t (\mathcal{L}_2 (\hat{\mathcal{L}}_\xi T)) = Q_2. \tag{30}$$

Интегрирование (30) даст тождественное равенство третьего порядка

$$\mathcal{L}_2 (\hat{\mathcal{L}}_\xi T) \equiv Q_3. \tag{31}$$

Аналогично могут быть получены тождества более высоких порядков. Основываясь на (20), (28) и (31) и задав $\mathcal{L}_0(\hat{\mathcal{L}}_\xi T) \equiv \hat{\mathcal{L}}_\xi T$, окончательно придем к последовательности интегральных тождественных равенств:

$$\left\{ \mathcal{L}_{n-1}(\hat{\mathcal{L}}_\xi T) \equiv Q_n \right\}_n, \quad \forall n \in \mathbb{Z}_+, \quad 0 < t \leq t_1, \quad \xi \in [0, \delta]. \quad (32)$$

Вторая стадия. Умножим уравнение (11) на $(1 - \xi)^m$ и проинтегрируем по области $\xi \in [0, 1]$:

$$\int_0^1 (1 - \xi)^m \frac{\partial T}{\partial t} d\xi = \frac{d}{dt} \int_0^1 T(1 - \xi)^m d\xi = \int_0^1 \frac{\partial}{\partial \xi} \left((1 - \xi)^m \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) d\xi = -\frac{\partial T(0, t)}{\partial \xi} = q(t). \quad (33)$$

Проинтегрируем уравнение (33) в пределах $t \in [0, t]$:

$$\int_0^1 T(1 - \xi)^m d\xi = \int_{t_1}^t q(t) dt + C, \quad (34)$$

где C – постоянная интегрирования, определяемая из (34) как $C = \int_0^1 T(\xi, t_1)(1 - \xi)^m d\xi$. Из тождественного равенства (19) для момента времени $t = t_1$ имеем:

$$\int_0^1 T(\xi, t_1)(1 - \xi)^m d\xi = Q_1(t_1). \quad (35)$$

Отсюда приходим к соотношению

$$\int_0^1 T(1 - \xi)^m d\xi = \int_{t_1}^t q(t) dt + \int_0^1 T(\xi, t_1)(1 - \xi)^m d\xi = \int_{t_1}^t q(t) dt + \int_0^{t_1} q(t) dt = \int_0^t q(t) dt. \quad (36)$$

Введя в рассмотрение интегральный оператор $\hat{\mathcal{M}}_0 \equiv \int_0^1 (1 - \xi)^m (\cdot) d\xi$, из (36) получим

$$\hat{\mathcal{M}}_0 T \equiv Q_1, \quad 0 \leq \xi \leq 1, \quad t_1 \leq t < \infty. \quad (37)$$

Теперь применим к уравнению (11) интегральный оператор $\hat{\mathcal{M}}_\xi \equiv \int_1^\xi (1 - \xi)^m (\cdot) d\xi$:

$$\hat{\mathcal{M}}_\xi (D_t T) \equiv D_t (\hat{\mathcal{M}}_\xi T) = (1 - \xi)^m T_\xi. \quad (38)$$

Запишем уравнение (38) в ином виде:

$$D_t \left(\frac{1}{(1 - \xi)^m} \hat{\mathcal{M}}_\xi T \right) = T_\xi. \quad (39)$$

Проинтегрируем (39) по области $\xi \in [\xi, 1]$:

$$\int_1^\xi D_t \left(\frac{1}{(1 - \xi)^m} \hat{\mathcal{M}}_\xi T \right) d\xi = D_t \left[\int_1^\xi \left(\frac{1}{(1 - \xi)^m} \hat{\mathcal{M}}_\xi T \right) d\xi \right] = \int_1^\xi T_\xi d\xi = T|_1^\xi = T - T(1, t). \quad (40)$$

Далее умножим уравнение (40) на $(1 - \xi)^m$ и проинтегрируем по области $\xi \in [0, 1]$. С учетом полученного выше тождественного равенства (35) и введения в рассмотрение граничной функции $g(t) = T(1, t)$, придем к уравнению

$$\begin{aligned} \int_0^1 (1 - \xi)^m D_t \left[\int_1^\xi \left(\frac{1}{(1 - \xi)^m} \hat{\mathcal{M}}_\xi T \right) d\xi \right] d\xi &\equiv D_t \left[\int_0^1 (1 - \xi)^m \int_1^\xi \left(\frac{1}{(1 - \xi)^m} \hat{\mathcal{M}}_\xi T \right) d\xi \right] = \\ &= \int_0^1 (1 - \xi)^m T d\xi - \int_0^1 (1 - \xi)^m T(1, t) d\xi = Q_1 - T(1, t) \int_0^1 (1 - \xi)^m d\xi = Q_1 - \frac{g(t)}{1 + m}. \end{aligned} \quad (41)$$

Введем в рассмотрение интегральные операторы:

$$\mathcal{M}_\xi \equiv \int_1^\xi d\xi (1-\xi)^m \int_1^\xi \frac{1}{(1-\xi)^m} (\cdot) d\xi, \quad \mathcal{M}_1 \equiv \int_1^0 d\xi (1-\xi)^m \int_1^\xi \frac{1}{(1-\xi)^m} (\cdot) d\xi, \quad (42)$$

образующие две последовательности:

$$\mathcal{M}_n^\xi \equiv \overbrace{\mathcal{M}_\xi \dots \mathcal{M}_\xi}^n \mathcal{M}_\xi, \quad \mathcal{M}_n \equiv \overbrace{\mathcal{M}_1 \dots \mathcal{M}_1}^n \mathcal{M}_1, \quad \forall n \in \mathbb{Z}_+. \quad (43)$$

В этом случае уравнение (41) предстанет в новой операторной форме:

$$\mathcal{M}_1(D_t(\hat{\mathcal{M}}_\xi T)) \equiv D_t(\mathcal{M}(\hat{\mathcal{M}}_\xi T)) = Q_1 - g(t) / (1+m). \quad (44)$$

Интегрирование (42) с учетом условия $g(t_1) = 0$, а также очевидного тождества $\mathcal{M}_1(\hat{\mathcal{M}}_\xi T(\xi, t_1)) \equiv \mathcal{L}_1(\hat{\mathcal{L}}_\xi T(\xi, t_1))$ дает уравнение

$$\begin{aligned} \mathcal{M}_1(\hat{\mathcal{M}}_\xi T) &= \int_{t_1}^t Q_1 dt - \int_{t_1}^t \frac{g(t)}{m+1} dt + \mathcal{M}_1(\hat{\mathcal{M}}_\xi T(\xi, t_1)) = \\ &= \int_{t_1}^t Q_1 dt - \int_{t_1}^t \frac{g(t)}{m+1} dt + \mathcal{L}(\hat{\mathcal{L}}_\xi T(\xi, t_1)) = \int_{t_1}^t Q_1 dt + \int_0^{t_1} Q_1 dt - \int_{t_1}^t \frac{g(t)}{m+1} dt = Q_2 - \int_{t_1}^t \frac{g(t)}{m+1} dt. \end{aligned} \quad (45)$$

Введя в рассмотрение, согласно [16], последовательность интегральных функций

$$G_n \equiv \underbrace{\int_0^t \dots \int_0^t}_{n} g(t) dt^{(n)} = \int_0^t \frac{(t-\tau)^{n-1}}{(n-1)!} g(\tau) d\tau, \quad \forall n \in \mathbb{Z}_+, \quad (46)$$

вместо (45) запишем первое тождественное равенство

$$\mathcal{M}_1(\hat{\mathcal{M}}_\xi T) \equiv Q_2 - \frac{G_1}{m+1}. \quad (47)$$

Далее умножим левую и правую части уравнения (40) на $(1-\xi)^m$ и проинтегрируем по области $\xi \in [\xi, 1]$:

$$\begin{aligned} \int_1^\xi (1-\xi)^m D_t \left[\int_1^\xi \left(\frac{1}{(1-\xi)^m} \hat{\mathcal{M}}_\xi T \right) d\xi \right] d\xi &\equiv D_t \left[\int_1^\xi (1-\xi)^m \int_1^\xi \left(\frac{1}{(1-\xi)^m} \hat{\mathcal{M}}_\xi T \right) d\xi \right] = \\ &= \int_1^\xi (1-\xi)^m T d\xi - \int_1^\xi (1-\xi)^m T(1,t) d\xi = \int_1^\xi (1-\xi)^m T d\xi + T(1,t) \frac{(1-\xi)^{1+m}}{m+1}, \end{aligned} \quad (48)$$

или в операторной форме

$$D_t(\mathcal{M}_1^\xi(\hat{\mathcal{M}}_\xi T)) = \hat{\mathcal{M}}_\xi T + (1-\xi)^{m+1} g(t). \quad (49)$$

Применив к уравнению (49) интегральный оператор \mathcal{M}_ξ , получим:

$$\begin{aligned} \mathcal{M}_\xi \{ D_t(\mathcal{M}_1^\xi(\hat{\mathcal{M}}_\xi T)) \} &\equiv D_t(\mathcal{M}_\xi \mathcal{M}_\xi(\hat{\mathcal{M}}_\xi T)) \equiv D_t(\mathcal{M}_2^\xi(\hat{\mathcal{M}}_\xi T)) = \\ &= \mathcal{M}_\xi \{ \hat{\mathcal{M}}_\xi T \} + \mathcal{M}_\xi \left\{ \frac{(1-\xi)^{m+1}}{m+1} g(t) \right\} = \mathcal{M}_\xi \{ \hat{\mathcal{M}}_\xi T \} + \frac{g(t)}{m+1} \int_1^\xi d\xi (1-\xi)^m \int_1^\xi \frac{(1-\xi)^{m+1}}{(1-\xi)^m} d\xi = \\ &= \mathcal{M}_\xi \{ \hat{\mathcal{M}}_\xi T \} + \frac{g(t)}{m+1} \int_1^\xi d\xi (1-\xi)^m \int_1^\xi \frac{(1-\xi)^{m+1}}{(1-\xi)^m} d\xi = \\ &= \mathcal{M}_\xi \{ \hat{\mathcal{M}}_\xi T \} + \frac{g(t)}{m+1} \int_1^\xi d\xi (1-\xi)^m \int_1^\xi (1-\xi) d\xi = \mathcal{M}_\xi \{ \hat{\mathcal{M}}_\xi T \} + \frac{g(t)}{(m+1)(2m+6)} (1-x)^{m+3}. \end{aligned}$$

Отсюда следует

$$D_t(\mathcal{M}_2^\xi(\hat{\mathcal{M}}_\xi T)) = \mathcal{M}_\xi\{\hat{\mathcal{M}}_\xi T\} + \frac{g(t)}{(m+1)(2m+6)}(1-x)^{3+m}. \quad (50)$$

Запишем уравнение (50) для точки $\xi = 0$:

$$D_t(\mathcal{M}_2^\xi(\hat{\mathcal{M}}_\xi T))\Big|_{\xi=0} = \mathcal{M}_\xi\{\hat{\mathcal{M}}_\xi T\}\Big|_{\xi=0} + \frac{g(t)}{(m+1)(2m+6)} = \mathcal{M}_1(\hat{\mathcal{M}}_\xi T) + \frac{g(t)}{(m+1)(2m+6)},$$

или с учетом тождественного равенства (47):

$$D_t(\mathcal{M}_2(\hat{\mathcal{M}}_\xi T)) = Q_2 - \int_{t_1}^t \frac{g(t)}{m+1} dt + \frac{g(t)}{(m+1)(2m+6)}. \quad (51)$$

Интегрирование (51) с учетом начальных условий (8), (10) и введенных обозначений (42) и (43) даст

$$\mathcal{M}_2(\hat{\mathcal{M}}_\xi T) = \int_{t_1}^t Q_2 dt - \frac{G_2}{m+1} + \frac{G_1}{(m+1)(2m+6)} + C. \quad (52)$$

Определим из (52) постоянную интегрирования: $C = \mathcal{M}_2(\hat{\mathcal{M}}_\xi T)\Big|_{t=t_1}$. Используя очевидные тождества $\mathcal{M}_2(\hat{\mathcal{M}}_\xi T)\Big|_{t=t_1} \equiv \mathcal{L}_2(\hat{\mathcal{L}}_\xi T)\Big|_{t=t_1}$ и (31), для постоянной C запишем: $C = \mathcal{L}_2(\hat{\mathcal{L}}_\xi T)\Big|_{t=t_1} = Q_3\Big|_{t=t_1}$. Отсюда вместо (52) придем к тождественному равенству

$$\begin{aligned} \mathcal{M}_2(\hat{\mathcal{M}}_\xi T) &= \int_{t_1}^t Q_2 dt - \frac{G_2}{m+1} + \frac{G_1}{(m+1)(2m+6)} + Q_3\Big|_{t=t_1} = \\ &= \int_0^t Q_2 dt - \int_0^{t_1} Q_2 dt - \frac{G_2}{m+1} + \frac{G_1}{(m+1)(2m+6)} + \int_0^{t_1} Q_2 dt = Q_3 - \frac{G_2}{m+1} + \frac{G_1}{(m+1)(2m+6)}. \end{aligned} \quad (53)$$

Получим следующее по порядку тождественное равенство, воспользовавшись уравнением (51). Применим к данному уравнению интегральный оператор \mathcal{M}_1 :

$$\begin{aligned} \mathcal{M}_\xi\{D_t(\mathcal{M}_2^\xi(\hat{\mathcal{M}}_\xi T))\} &\equiv D_t(\mathcal{M}_\xi\mathcal{M}_2^\xi(\hat{\mathcal{M}}_\xi T)) = \mathcal{M}_\xi\{\mathcal{M}_\xi(\hat{\mathcal{M}}_\xi T)\} + \\ + \mathcal{M}_\xi\left\{\frac{g(t)}{(m+1)(2m+6)}(1-x)^{3+m}\right\} &= \mathcal{M}_2^\xi(\hat{\mathcal{M}}_\xi T) + \frac{g(t)}{(m+1)(2m+6)}\mathcal{M}_\xi\{(1-x)^{3+m}\}. \end{aligned} \quad (54)$$

Проинтегрировав (54) с учетом (51) и (53), получим уравнение

$$D_t(\mathcal{M}_3^\xi(\hat{\mathcal{M}}_\xi T)) = \mathcal{M}_2^\xi(\hat{\mathcal{M}}_\xi T) + \frac{g(t)}{(m+1)(2m+6)(4m+20)}(1-\xi)^{m+5}. \quad (55)$$

Применив уравнение (55) в точке $\xi = 0$, придем к уравнению

$$D_t(\mathcal{M}_3(\hat{\mathcal{M}}_\xi T)) = \mathcal{M}_2(\hat{\mathcal{M}}_\xi T) + \frac{g(t)}{(m+1)(2m+6)(4m+20)},$$

или с учетом (53)

$$D_t(\mathcal{M}_3(\hat{\mathcal{M}}_\xi T)) = Q_3 - \frac{G_2}{m+1} + \frac{G_1}{(m+1)(2m+6)} + \frac{g(t)}{(m+1)(2m+6)(4m+20)}. \quad (56)$$

Интегрирование (56) даст тождественное равенство

$$\mathcal{M}_3(\hat{\mathcal{M}}_\xi T) = Q_4 - \frac{G_3}{m+1} + \frac{G_2}{(m+1)(2m+6)} + \frac{G_1}{(m+1)(2m+6)(4m+20)}. \quad (57)$$

Аналагічна могуць быць получены тождества более высокого порядка. Например, для тождественного равенства четвертого порядка имеем

$$\begin{aligned} \mathcal{M}_4(\hat{\mathcal{M}}_\xi T) = Q_5 + \frac{G_4}{m+1} + \frac{G_3}{(m+1)(2m+6)} + \frac{G_2}{(m+1)(2m+6)(4m+20)} + \\ + \frac{G_1}{(m+1)(2m+6)(4m+20)(6m+42)}. \end{aligned} \quad (58)$$

Основываясь на (37), (47), (53), (57) и (58) и положив $G_0 = 0$, получим окончательно

$$\left\{ \mathcal{M}_{n-1}(\hat{\mathcal{M}}_\xi T) = Q_n + \sum_{i=0}^{n-1} p_i G_i \right\}_n, \quad \forall n \in \mathbb{Z}_+. \quad (59)$$

Дифференциальные тождественные равенства. Следуя [14, 17], рассмотрим область $(y, t) \in \Omega_T = (0, 1) \times (0, \infty)$, описываемую дифференциальным уравнением (7) при граничных условиях (13) и (14). Продифференцируем (7) по ξ :

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{1}{(1-\xi)^m} \frac{\partial}{\partial \xi} \left((1-\xi)^m \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) \right). \quad (60)$$

Введя в рассмотрение дифференциальный оператор

$$L_\xi \equiv \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{1}{(1-\xi)^m} \frac{\partial}{\partial \xi} \left((1-\xi)^m (\cdot) \right) \right), \quad (61)$$

запишем уравнение (60) в операторной форме:

$$D_t T_\xi = L_\xi T_\xi. \quad (62)$$

Применим оператор (61) к уравнению (62). С учетом правила перестановки производных и теоремы Лейбница получаем уравнение

$$L_\xi (D_t T_\xi) \equiv D_t (L_\xi T_\xi) = L_\xi (L_\xi T_\xi) = L_\xi L_\xi T_\xi = L_\xi^2 T_\xi, \quad (63)$$

где L_ξ^2 – дифференциальный оператор второго порядка:

$$L_\xi^2 \equiv \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{1}{(1-\xi)^m} \frac{\partial}{\partial \xi} \left((1-\xi)^m \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{1}{(1-\xi)^m} \frac{\partial}{\partial \xi} \left((1-\xi)^m (\cdot) \right) \right) \right) \right). \quad (64)$$

Произведя в соответствии с (62) замену $L_\xi T_\xi \rightarrow D_t T_\xi$ в левой части уравнения (63), получим уравнение

$$D_t^2 T_\xi = L_\xi^2 T_\xi, \quad (65)$$

где $D_t^2 \equiv \partial^2 / \partial t^2$.

Теперь применим оператор (61) к уравнению (65). Опустив выкладки, запишем:

$$L_\xi (D_t^2 T_\xi) \equiv D_t^2 (L_\xi T_\xi) = L_\xi (L_\xi^2 T_\xi) = L_\xi^3 T_\xi. \quad (66)$$

Произведя в (66), как в (64), подстановку $L_\xi T_\xi \rightarrow D_t T_\xi$, придем к уравнению

$$D_t^3 T_\xi = L_\xi^3 T_\xi, \quad (67)$$

где $D_t^3 \equiv \partial^3 / \partial t^3$, и дифференциальный оператор L_ξ^3 имеет вид

$$L_\xi^3 \equiv \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{1}{(1-\xi)^m} \frac{\partial}{\partial \xi} \left((1-\xi)^m \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{1}{(1-\xi)^m} \frac{\partial}{\partial \xi} \left((1-\xi)^m \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{1}{(1-\xi)^m} \frac{\partial}{\partial \xi} \left((1-\xi)^m (\cdot) \right) \right) \right) \right) \right) \right). \quad (68)$$

Отсюда, основываясь на уравнениях (62), (65) и (67), придем к последовательности

$$\left\{ D_t^n T_\xi = L_\xi^n T_\xi \right\}_n, \quad \forall n \in \mathbb{Z}_+, \quad (69)$$

где $D_t^n \equiv \partial^n / \partial t^n$, $L_\xi^n \equiv \overbrace{L_\xi L_\xi \dots L_\xi}^n$ – дифференциальные операторы n -го порядка.

Применим уравнения, входящие в последовательность (69) в точке $\xi = 0$. Поскольку решение краевой задачи ищется в виде степенных, многократно дифференцируемых рядов, принадлежащих классу аналитических функций, подобное действие представляется правомочным. Отсюда можно записать:

$$\left\{ D_t^n T_\xi \Big|_{\xi=0} = L_\xi^n T_\xi \Big|_{\xi=0} \right\}_n, \quad \forall n \in \mathbb{Z}_+. \quad (70)$$

Учитывая граничное условие (14), для левой части уравнений в (70) имеем

$$D_t^n T_\xi \Big|_{\xi=0} = D_t^n (T_\xi \Big|_{\xi=0}) = \frac{\partial^n}{\partial t^n} \left(\frac{\partial T}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} \right) = \frac{\partial^n}{\partial t^n} (-q(t)) = -D_t^n q. \quad (71)$$

Учитывая (69), вместо (68) придем окончательно к последовательности

$$\left\{ L_\xi^n T_\xi \Big|_{\xi=0} \equiv -D_t^n q \right\}_n, \quad \forall n \in \mathbb{Z}_+. \quad (72)$$

Схема построения полиномиальных решений. Изложим схему построения решений краевых задач нестационарной теплопроводности на основе последовательностей (59) и (72). Будем исходить из двухстадийности процесса.

Первая стадия. Опишем температурный профиль полиномом степени N в виде

$$T = \left(1 - \frac{\xi}{\delta} \right)^2 \sum_{j=0}^{N-2} a_j(t) \left(\frac{\xi}{\delta} \right)^j, \quad (73)$$

в котором учитываются оба граничных условия (10). Для определения коэффициента a_0 воспользуемся граничным условием (9), откуда находим

$$a_0 = \frac{1}{2} (\delta q(t) + a_1). \quad (74)$$

Определение коэффициентов a_j ($j = \overline{1, N-2}$) свяжем с тождественными равенствами последовательностей (59) и (72):

$$\left\{ \mathcal{L}_{n-1}(\hat{\mathcal{L}}_\xi T) = Q_n \right\}_n \cup \left\{ L_\xi^k T_\xi \Big|_{\xi=0} \equiv -D_t^k q \right\}_k, \quad \forall n \in \mathbb{Z}_\geq, k \in \mathbb{Z}_+. \quad (75)$$

Для получения замкнутой системы $N - 2$ уравнений из (75) приходим к двойному множеству следующего вида:

$$\left\{ \mathcal{L}_{n-1}(\hat{\mathcal{L}}_\xi T) = Q_n \right\}_{n=1}^{N-K-3} \cup \left\{ L_\xi^k T_\xi \Big|_{\xi=0} \equiv -D_t^k q \right\}_{k=0}^K, \quad k \in \overline{0, K}, K \in \mathbb{Z}_\geq. \quad (76)$$

Решение задачи в первом приближении свяжем с заданием $K = 0$. В таком случае все последующие приближения (второе, третье и т. д.) будут соответствовать значениям $K = 1, 2, 3, \dots$. Остается задать число интегральных тождественных равенств, отвечающих каждому приближению. Пусть для первого приближения ($K = 0$) мы имеем N_0 интегральных тождественных равенств последовательности (32). Это позволяет записать:

$$\begin{aligned}
 K = 0 &\rightarrow \left\{ \mathcal{L}_{n-1}(\hat{\mathcal{L}}_{\xi} T) \equiv Q_n \right\}_{n=1}^{N_0} \\
 K = 1 &\rightarrow \left\{ \mathcal{L}_{n-1}(\hat{\mathcal{L}}_{\xi} T) \equiv Q_n \right\}_{n=1}^{N_0+P} \cup \left\{ L_{\xi}^k T_{\xi} \Big|_{\xi=0} \equiv -D_i^k q \right\}_{k=1}^1, \\
 K = 2 &\rightarrow \left\{ \mathcal{L}_{n-1}(\hat{\mathcal{L}}_{\xi} T) \equiv Q_n \right\}_{n=1}^{N_0+2P} \cup \left\{ L_{\xi}^k T_{\xi} \Big|_{\xi=0} \equiv -D_i^k q \right\}_{k=1}^2 \\
 &\dots\dots\dots
 \end{aligned} \tag{77}$$

или в общем виде

$$\left\{ \mathcal{L}_{n-1}(\hat{\mathcal{L}}_{\xi} T) \equiv Q_n \right\}_{n=1}^{N_0+KP} \cup \left\{ L_{\xi}^k T_{\xi} \Big|_{\xi=0} \equiv -D_i^k q \right\}_{k=1}^K, \quad K \in \mathbb{Z}_{\geq}. \tag{78}$$

Здесь P – шаг приращения числа интегральных тождественных равенств для каждого $(K+1)$ -го приближения. Отсюда следует $N_K = N_0 + KP + K = N_0 + (P+1)K$.

Для нахождения функции $\delta(t)$ обратимся к уравнению (23), которое запишем как

$$\frac{d}{dt} \int_{\delta}^{\xi} \frac{d\xi}{(1-\xi)^m} \int_{\delta}^{\xi} T(1-\xi)^m d\xi = T. \tag{79}$$

При $\xi \rightarrow 0$ из (79) приходим к интегральному соотношению

$$\frac{d}{dt} \int_{\delta}^0 \frac{d\xi}{(1-\xi)^m} \int_{\delta}^{\xi} T(1-\xi)^m d\xi = T(0, t). \tag{80}$$

Подстановка (73) в (80) дает дифференциальное уравнение относительно $\delta(t)$ с начальным условием $\delta(0) = 0$. Его решение заканчивает рассмотрение первой стадии процесса.

Вторая стадия. Температурный фронт опишем полиномом следующего вида:

$$T = g(t) + \sum_{j=2}^N b_j(t)(1-\xi)^j. \tag{81}$$

Данный полином удовлетворяет граничному условию (14) и граничной функции $g(t) = T(1, t)$. Из граничного условия (14) получаем уравнение

$$\sum_{j=2}^N j b_j(t) = q(t). \tag{82}$$

Для получения остальных $N - 2$ уравнений воспользуемся полученными выше интегральными и дифференциальными тождественными равенствами, входящими в последовательности (59) и (72). По аналогии с (77) сразу запишем:

$$\begin{aligned}
 K = 0 &\rightarrow \left\{ \mathcal{M}_{n-1}(\hat{\mathcal{M}}_{\xi} T) = Q_n + \sum_{i=0}^{n-1} p_i G_i \right\}_{n=1}^{N_0} \\
 K = 1 &\rightarrow \left\{ \mathcal{M}_{n-1}(\hat{\mathcal{M}}_{\xi} T) = Q_n + \sum_{i=0}^{n-1} p_i G_i \right\}_{n=1}^{N_0+P} \cup \left\{ L_{\xi}^k T_{\xi} \Big|_{\xi=0} \equiv -D_i^k q \right\}_{k=1}^1, \\
 K = 2 &\rightarrow \left\{ \mathcal{M}_{n-1}(\hat{\mathcal{M}}_{\xi} T) = Q_n + \sum_{i=0}^{n-1} p_i G_i \right\}_{n=1}^{N_0+2P} \cup \left\{ L_{\xi}^k T_{\xi} \Big|_{\xi=0} \equiv -D_i^k q \right\}_{k=1}^2 \\
 &\dots\dots\dots
 \end{aligned} \tag{83}$$

или в общем виде

$$\left\{ \mathcal{M}_{n-1}(\hat{\mathcal{M}}_{\xi} T) = Q_n + \sum_{i=0}^{n-1} p_i G_i \right\}_{n=1}^{N_0+KP} \cup \left\{ L_{\xi}^k T_{\xi} \Big|_{\xi=0} \equiv -D_i^k q \right\}_{k=1}^K, \quad K \in \mathbb{Z}_{\geq}. \tag{84}$$

Для нахождения функции $g(t)$ воспользуемся уравнением (40), придав ему следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_1^{\xi} \frac{d\xi}{(1-\xi)^m} \int_1^{\xi} T(1-\xi)^m d\xi = T - T(1,t). \quad (85)$$

При $\xi \rightarrow 0$ из (85) с учетом $T(1,t) = g(t)$ получим интегральное соотношение

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_1^0 \frac{d\xi}{(1-\xi)^m} \int_1^{\xi} T(1-\xi)^m d\xi = T(0,t) - g(t). \quad (86)$$

Подстановка (73) в (86) даст интегро-дифференциальное уравнение

$$f(g', g, \{Q_i\}_{i=1}^{N_K}, \dots) = F(t), \quad (87)$$

где $F(t)$ – свободный член. Решение (87) возможно двумя путями. Первый связан с последовательным N_K -кратным дифференцированием (87) по t с переводом уравнения (87) в обыкновенное дифференциальное уравнение. Однако, по всей видимости, наиболее простой путь решения связан с введением новой функции $\varphi = \varphi(t) = Q_{N_K}$, приводящей к множеству очевидных тождеств:

$$Q_{N_K} = \varphi, \quad Q_{N_K-1} = \varphi', \quad Q_{N_K-2} = \varphi'', \dots, \quad Q_0 = q = \varphi^{(N_K)}, \quad q' = \varphi^{(N_K+1)}. \quad (88)$$

С учетом (88) уравнение (87) примет вид

$$f(\varphi^{(N_K+1)}, \varphi^{(N_K)}, \dots, \varphi', \varphi) = F(t). \quad (89)$$

Для функции $\varphi(t)$, исходя из ее определения и представления функции $G_n(t)$ в виде (46), справедливы начальные условия:

$$Q_{N_K}(t_1) = \varphi(t_1) = 0, \quad Q_{N_K-1}(t_1) = \varphi'(t_1) = 0, \quad Q_{N_K-2}(t_1) = \varphi''(t_1) = 0, \dots, \quad Q_0(t_1) = \varphi^{(N_K)}(t_1) = 0. \quad (90)$$

Отсюда на основании уравнения (89) и начальных условий (90) приходим к задаче Коши. Теперь запишем отвечающее (89) характеристическое уравнение (v_i ($i = 0, N_K + 1$) – коэффициенты):

$$\sum_{i=0}^{N_K+1} v_i \mu^i = 0. \quad (91)$$

Действительные корни (89) определяют собственные значения краевой задачи μ_j ($j = \overline{1, N_K + 1}$). Решение системы (87)–(88) (с определением φ) и последующее (N_K+1) -кратное дифференцирование по t функции φ дает граничную функцию $g(t) = \varphi^{(N_K+1)}(t)$ и, соответственно, приближенное аналитическое решение краевой задачи для второй стадии теплового процесса.

Заключение. Предложена новая схема отыскания приближенных аналитических решений краевых задач нестационарной теплопроводности с граничным условием второго рода на основе введения в рассмотрение фронта температурного возмущения и разделения всего процесса на две стадии. Для первой стадии на основе предварительного дифференцирования уравнения теплопроводности по пространственной координате и последующего применения симметричных интегральных и дифференциальных операторов построены, соответственно, две последовательности интегральных и дифференциальных тождественных равенств. Каждая из них содержит интегральные либо дифференциальные граничные характеристики для заданного граничного условия второго рода. Для второй стадии путем введения граничной функции, предварительного дифференцирования уравнения теплопроводности по пространственной координате и последующего применения симметричных интегральных операторов построена последовательность интегральных тождественных равенств, содержащих интегральные граничные характеристики для граничного условия второго рода и граничной функции. На основе полученных интегральных и дифференциальных тождественных равенств построены замкнутые системы уравнений, позволяющие находить полиномиальные коэффициенты температурного профиля для первой и второй стадий. Для каждого этапа предложены специальные интегральные операторы, сводящие краевую задачу к обыкновенному дифференциальному уравнению.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Goodman, T. R. Application of Integral Methods to Transient Nonlinear Heat Transfer / T. R. Goodman // *Adv. Heat Transfer*. – 1964. – Vol. 1. – P. 51–122. [https://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70097-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70097-2)
2. Goodman, T. R. The Heat-Balance Integral – Further Considerations and Refinements / T. R. Goodman // *Transactions of the ASME, J. Heat Transfer*. – 1961. – Vol. 83, iss. 1. – P. 83–85. <https://doi.org/10.1115/1.3680474>
3. Wood, A. S. A new look at the heat balance integral method / A. S. Wood // *Appl. Math. Model.* – 2001. – Vol. 25, iss. 10. – P. 815–824. [https://doi.org/10.1016/S0307-904X\(01\)00016-6](https://doi.org/10.1016/S0307-904X(01)00016-6)
4. Био, М. Вариационные принципы в теории теплообмена / М. Био. – М.: Энергия, 1975. – 209 с.
5. Dorodnitsyn, A. A. General method of integral relations and its application to boundary layer theory / A. A. Dorodnitsyn // *Advances in Aeronautical Sciences: Proc. of the Second International Congress in the Aeronautical Sciences, Zürich, 12–16 Sept. 1960* / eds.: T. Von Kármán, A. M. Ballantyne, R. R. Dexter. – New York: Pergamon Press, 1962. – Vol. 3. – P. 207–219. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-006550-2.50018-1>
6. Hristov, J. The heat-balance integral method by a parabolic profile with unspecified exponent: Analysis and exercises / J. Hristov // *Thermal Sci.* – 2009. – Vol. 13, № 2. – P. 27–48. <https://doi.org/2298/TSCI0902027H>
7. Sadoun, N. On the refined integral method for the one-phase Stefan problem with time-dependent boundary conditions / N. Sadoun, E. K. Si-Ahmed, P. Colinet // *Appl. Math. Model.* – 2006. – Vol. 30, iss. 6. – P. 531–544. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2005.06.003>
8. Mitchell, S. L. Application of standard and refined heat balance integral methods to one-dimensional Stefan problems / S. L. Mitchell, T. G. Myers // *SIAM Rev.* – 2010. – Vol. 52, iss. 1. – P. 57–86. <https://doi.org/10.1137/080733036>
9. Myers, T. G. Optimizing the exponent in the heat balance and refined integral methods / T. G. Myers // *Int. Comm. Heat Mass Transfer*. – 2009. – Vol. 36, iss. 2. – P. 143–147. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.10.013>
10. Langford, D. The heat balance integral method / D. Langford // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 1973. – Vol. 16, iss. 12. – P. 2424–2428. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(73\)90026-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(73)90026-4)
11. Mitchell, S. L. Improving the accuracy of heat balance integral methods applied to thermal problems with time dependent boundary conditions / S. L. Mitchell, T. G. Myers // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2010. – Vol. 53, iss. 17–18. – P. 3540–3551. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.04.015>
12. Федоров, Ф. М. Граничный метод решения прикладных задач математической физики / Ф. М. Федоров. – Новосибирск: Наука, 2000. – 220 с.
13. Стефанюк, Е. В. Дополнительные граничные условия в нестационарных задачах теплопроводности / Е. В. Стефанюк, В. А. Кудинов // *Теплофизика высоких температур*. – 2009. – Т. 47, № 2. – С. 269–282. <https://doi.org/10.1134/S0018151X0>
14. Кот, В. А. Метод граничных характеристик / В. А. Кот // *Инженерно-физический журнал*. – 2015. – Т. 88, № 6. – С. 1345–1363. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1377-9>
15. Кот, В. А. Граничные характеристики для обобщенного уравнения теплопроводности и их эквивалентные представления / В. А. Кот // *Инженерно-физический журнал*. – 2016. – Т. 89, № 4. – С. 983–1006. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1461-1>
16. Kot, V. A. Integral Method of Boundary Characteristics: The Dirichlet Condition. Principles / V. A. Kot // *Heat Transfer Research*. – 2016. – Vol. 47, no. 10. – P. 927–944. <https://doi.org/10.1615/HeatTransRes.2016014883>
17. Кот, В. А. Метод граничной функции. Основные положения / В. А. Кот // *Инженерно-физический журнал*. – 2017. – Т. 90, № 2. – С. 391–417. <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1576-z>

References

1. Goodman T. R. Application of Integral Methods to Transient Nonlinear Heat Transfer. *Advances in Heat Transfer*, 1964, vol. 1, pp. 51–122. [https://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70097-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70097-2)
2. Goodman T. R. Heat-Balance Integral – Further Considerations and Refinements. *Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer*, 1961, vol. 83, iss. 1, pp. 83–85. <https://doi.org/10.1115/1.3680474>
3. Wood A. S. A new look at the heat balance integral method. *Applied Mathematical Modelling*, 2001, vol. 25, iss. 10, pp. 815–824. [https://doi.org/10.1016/S0307-904X\(01\)00016-6](https://doi.org/10.1016/S0307-904X(01)00016-6)
4. Bio M. *Variational principles in heat-exchange theory*. Moscow, Energiya Publ., 1975. 209 p. (in Russian).
5. Dorodnitsyn A. A. General method of integral relations and its application to boundary layer theory. Kármán T. Von, Ballantyne A. M., Dexter R. R. (eds.). *Advances in Aeronautical Sciences: Proceedings of the Second International Congress in the Aeronautical Sciences, Zürich, 12–16 September 1960. Volume 3*. New York, Pergamon, 1962, pp. 207–219. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-006550-2.50018-1>
6. Hristov J. The heat-balance integral method by a parabolic profile with unspecified exponent: Analysis and exercises. *Thermal Science*, 2009, vol. 13, no. 2, pp. 27–48. <https://doi.org/2298/TSCI0902027H>
7. Sadoun N., El-Khider Si-Ahmed, Colinet P. On the refined integral method for the one-phase Stefan problem with time-dependent boundary conditions. *Applied Mathematical Modelling*, 2006, vol. 30, iss. 6, pp. 531–544. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2005.06.003>
8. Mitchell S. L., Myers T. G. Application of standard and refined heat balance integral methods to one-dimensional Stefan problems. *SIAM Review*, 2010, vol. 52, iss. 1, pp. 57–86. <https://doi.org/10.1137/080733036>
9. Myers T. G. Optimizing the exponent in the heat balance and refined integral methods. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2009, vol. 36, iss. 2, pp. 143–147. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.10.013>

10. Langford D. The heat balance integral method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1973, vol. 16, iss. 12, pp. 2424–2428. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(73\)90026-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(73)90026-4)
11. Mitchell S. L., Myers T. G. Improving the accuracy of heat balance integral methods applied to thermal problems with time dependent boundary conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, vol. 53, iss. 17–18, pp. 3540–3551. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.04.015>
12. Fedorov F. M. *Boundary method of solving applied problems of mathematical physics*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2000. 220 p. (in Russian).
13. Stefanyuk E. V., Kudinov V. A. Additional boundary conditions in nonstationary problems of heat conduction. *High Temperature*, 2009, vol. 47, iss. 2, pp. 250–262. <https://doi.org/10.1134/s0018151x09020163>
14. Kot V. A. Method of Boundary Characteristics. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2015, vol. 88, iss. 6, pp. 1390–1408. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1377-9>
15. Kot V. A. Boundary Characteristics for the Generalized Heat-Conduction Equation and Their Equivalent Representations. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2016, vol. 89, iss. 4, pp. 985–1007. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1461-1>
16. Kot V. A. Integral Method of Boundary Characteristics: The Dirichlet Condition. Principles. *Heat Transfer Research*, 2016, vol. 47, no. 10, pp. 927–944. <https://doi.org/10.1615/HeatTransRes.2016014883>
17. Kot V. A. The Boundary Function Method. Fundamentals. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2017, vol. 90, iss. 2, pp. 366–391. <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1576-z>

Информация об авторе

Кот Валерий Андреевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории турбулентности, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: valery.kot@hmti.ac.by

Information about the author

Valery A. Kot – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher of the Laboratory of Turbulence, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: valery.kot@hmti.ac.by

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 536.46:533.6

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-214-219>

Поступила в редакцию 24.11.2017

Received 24.11.2017

М. С. Ассад, О. Г. Пенязьков, И. Н. Тарасенко*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь***РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ
НА СМЕСИ БЕНЗИНА С ВОЗДУХОМ, ОБОГАЩЕННОЙ ВОДОРОДОМ**

Аннотация. Изучено влияние добавок водорода на рабочий процесс бензинового двигателя внутреннего сгорания поршневого типа. Построена индикаторная диаграмма и дан анализ работы поршневого двигателя на бензин-воздушных смесях, обогащенных водородом в размере 0...20 % от объема поступающего в двигатель воздуха. Показана возможность получения удовлетворительных показателей при работе на бензине с добавками водорода. Исследовано изменение работы двигателя в зависимости от коэффициента избытка окислителя. Установлено, что коэффициент избытка окислителя, при котором достигается максимум индикаторного давления, смещается в область бедных смесей. При обогащении смеси водородом в размере 20 % от объема воздуха максимум индикаторного давления, равный $p_{i\max} = 5,3...5,8$ МПа, достигается при $\alpha = 1,15...1,25$, а при 10%-ной добавке водорода имеет место максимум $p_{i\max} = 4,9...5,2$ МПа при $\alpha = 1,05...1,10$ против $p_{i\max} = 4,7...5,1$ МПа при $\alpha = 0,90...0,95$ для чистого бензина. По индикаторной диаграмме изучена динамика внутрицилиндровых параметров при обогащении смеси водородом. Так, при 20%-ной добавке водорода среднее индикаторное давление падает на 12...19 %, несмотря на некоторое возрастание максимального давления цикла (на 3...18 %), по сравнению с работой на бензине, что ведет к пропорциональному снижению как индикаторной мощности двигателя, так и индикаторного КПД.

Ключевые слова: поршневой двигатель, бензин, водород, индикаторная диаграмма, индикаторное давление, коэффициент избытка окислителя

Для цитирования. Ассад, М. С. Рабочий процесс двигателя внутреннего сгорания на смеси бензина с воздухом, обогащенной водородом / М. С. Ассад, О. Г. Пенязьков, И. Н. Тарасенко // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – Т. 63, № 2. – С. 214–219. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-214-219>

M. S. Assad, O. G. Penyazkov, I. N. Tarasenko*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus***WORKING PROCESS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE RUNNING
ON ENRICHED HYDROGEN GASOLINE-AIR MIXTURE**

Abstract. The effect of hydrogen additives on the working process of a piston-type gasoline engine is studied. The indicator diagram has been built, and the operation of the piston engine on gasoline-air mixtures enriched with hydrogen in the amount of 0...20 % of the volume of air entering the engine has been analyzed. The possibility of obtaining satisfactory parameters when the engine works on gasoline with hydrogen additives is shown. The dynamics of the engine performance is studied depending on the oxidant excess coefficient. It has been established that the oxidizer excess ratio at which the maximum indicator pressure is reached is moved to the zone of poor mixtures. When the mixture is enriched with hydrogen in the amount of 20 % of the air volume, the maximum of indicator pressure $p_{i\max} = 5.3...5.8$ MPa is reached at $\alpha = 1.15...1.25$, while for 10 % hydrogen addition the maximum $p_{i\max} = 4.9...5.2$ MPa takes place at $\alpha = 1.05...1.10$ against $p_{i\max} = 4.7...5.1$ MPa at $\alpha = 0.90...0.95$ for pure gasoline. According to the indicator diagram, the dynamics of intra-cylinder parameters is studied when the mixture is enriched with hydrogen. Thus, with a 20 % hydrogen addition the mean indicator pressure decreases by 12...19 %, despite a slight increase in the maximum cycle pressure (3...18 %), compared with gasoline operation, which leads to a proportional decrease in both the engine indicator power, and the indicator efficiency.

Keywords: piston engine, gasoline, hydrogen, indicator diagram, indicator pressure, oxidant excess ratio

For citation. Assad M. S., Penyazkov O. G., Tarasenko I. N. Working process of the internal combustion engine running on enriched hydrogen gasoline-air mixture. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 2, pp. 214–219 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-214-219>

Введение. Тепловые энергоустановки (двигатели внутреннего и внешнего сгорания, котельные установки и др.) являются основным потребителем углеводородного топлива и одним из главных источников загрязнения окружающей среды. Это обстоятельство, наряду с истощением мировых запасов нефти, обуславливает необходимость разработки и создания принципиально

новых двигателей и применения новых видов моторного топлива. В качестве перспективного топлива можно рассматривать водород, который характеризуется хорошими физико-химическими и моторными свойствами, о чем свидетельствуют многочисленные исследования [1–12].

Основным процессом, определяющим эффективность работы двигателя, является сгорание, в течение которого химическая энергия введенного в цилиндр топлива превращается в тепло. Характер процесса сгорания определяется множеством факторов, среди которых: вид и состав применяемого топлива, содержание окислителя, момент воспламенения (угол опережения зажигания), степень сжатия, нагрузка и скоростной режим двигателя. В рамках настоящего исследования ставилась задача построить индикаторную диаграмму и выявить особенности рабочего процесса двигателя внутреннего сгорания (ДВС) при питании бензином с разной степенью обогащения водородом.

Индицирование процесса горения в цилиндре. Индикаторная диаграмма является главным инструментом для понимания протекания рабочего процесса поршневого ДВС. Измерение давления в цилиндре и последующее построение индикаторной диаграммы дают возможность выявить практическую ценность и эффективность использования топлива в данном двигателе.

Индицирование давления в цилиндре двигателя осуществлялось с помощью специально разработанной системы, приведенной в [13]. Опыты проводились на подробно описанном в [10] экспериментальном стенде, ядром которого является двигатель Honda D15B2. Давление, развиваемое при сгорании топлива в цилиндре, передавалось на датчик через соединительный канал, проходящий через корпус свечи зажигания и сообщенный с надпоршневым пространством. Для регистрации давления использовались два типа датчиков производства фирмы PCB Piezotronics и Научно-исследовательского института физических измерений (г. Пенза, Россия). В этих датчиках в качестве чувствительного элемента применен пакет пьезокерамических дисков.

Общая характеристика работы двигателя. Широкие концентрационные пределы воспламенения водорода в смеси с воздухом ($\alpha = 0,15 \dots 10,0$) позволили получить удовлетворительную работу двигателя на оклостехиометрических и бедных смесях с коэффициентом избытка окислителя $\alpha = 0,95 \dots 2,55$. Двигатель работал на режимах холостого хода и средней нагрузки с частотами вращения коленчатого вала $n = 740 \dots 3800 \text{ мин}^{-1}$. Добавка водорода χ варьировала в пределах от 0 до 20 % от объема поступающего в двигатель воздуха.

Анализ полученных результатов позволил заключить, что на исследованных режимах работы двигателя сгорание является практически полным. Концентрация остаточного водорода в продуктах сгорания, измеренная газоанализатором Testo, не превышает сотых долей процента, что явилось основанием для данного заключения. В диапазоне $\alpha = 0,95 \dots 1,4$ имеет место устойчивая работа двигателя со склонностью к перегреву в области стехиометрического состава смеси; с дальнейшим увеличением $\alpha > 1,4$ устойчивость работы двигателя падает.

Что касается детонационно-подобных явлений, отметим, что склонность бензин-водородно-воздушной смеси к детонации в исследованном двигателе (Honda D15B2) существенно зависит от коэффициента избытка окислителя α и степени обогащения смеси водородом χ . Такое сгорание имеет место при большой добавке водорода ($\chi > 15 \%$ по воздуху) и обогащенных составах смеси ($\alpha < 0,95$). Склонность к детонации снижается с увеличением α и в области бедных смесей практически исчезает. Так, при работе двигателя на бензин-воздушных смесях, обогащенных водородом до 20 % от воздуха, со значениями $\alpha = 1,15 \dots 2,55$ признаки детонации не наблюдались, при этом сохранилась склонность двигателя к перегреву. Последний эффект объясняется повышенными значениями температуры горения водорода (примерно на $110 \dots 150 \text{ }^\circ\text{C}$) сравнительно с бензином. Хотя в [8, 9] отмечается низкая детонационная стойкость водородно-воздушных смесей при составах, близких к стехиометрическому. Противоречие в отношении детонации при использовании водорода связано, по-видимому, с различием в подходах к организации рабочего процесса при питании двигателя водородом, а также с разной степенью совершенства опытных двигателей, используемых в разных исследованиях.

Влияние коэффициента избытка окислителя на рабочий процесс ДВС. Анализ рабочего процесса ДВС показывает, что среднее индикаторное давление в цилиндре имеет экстремальный характер при обогащении смеси воздухом. При этом значение коэффициента избытка окислителя,

при котором достигается максимум индикаторного давления, и величина этого максимума зависят от степени обогащения смеси водородом. Добавка водорода в размере 10 % от объема воздуха приводит к тому, что максимум индикаторного давления, равный $p_{i\max} = 4,9 \dots 5,2$ МПа, достигается при $\alpha = 1,05 \dots 1,10$. Дальнейшее обогащение смеси водородом до 20 % несколько поднимает пик давления до $p_{i\max} = 5,3 \dots 5,8$ МПа, который наблюдается при $\alpha = 1,15 \dots 1,25$ против $p_{i\max} = 4,7 \dots 5,1$ МПа при $\alpha = 0,90 \dots 0,95$ для чистого бензина. Некоторое смещение $p_{i\max}$ в область бедных смесей при добавлении водорода является следствием роста коэффициента молекулярного изменения по мере увеличения коэффициента избытка окислителя (рис. 1).

Суммарный коэффициент молекулярного изменения μ_0^Σ для смесей бензина с воздухом, обогащенных водородом, вычисляем с помощью выражения

$$\mu_0^\Sigma = \mu_0^{\text{H}_2} \cdot \beta + \mu_0^{\text{Gasoline}} \cdot (1 - \beta), \quad (1)$$

где $\mu_0^{\text{H}_2}$ – коэффициент молекулярного изменения при окислении водорода с воздухом, равный 0,852; μ_0^{Gasoline} – коэффициент молекулярного изменения при окислении бензина с воздухом, равный 1,058.

Используя данное выражение, влияние коэффициента избытка окислителя α на суммарный коэффициент молекулярного изменения μ_0^Σ можно выразить следующей зависимостью:

$$\mu_0^\Sigma = \frac{2,88 + 2,38(\alpha - 1)}{1 + 2,38\alpha} \cdot \beta + \frac{64 + 59,5(\alpha - 1)}{1 + 59,5\alpha} \cdot (1 - \beta).$$

Результаты исследования индикаторной диаграммы двигателя. Термодинамические и, в некоторой степени, теплофизические характеристики процесса сгорания удобно оценивать по индикаторной диаграмме, которая является основным инструментом исследования рабочих процессов двигателей. Анализ индикаторной диаграммы, построенной для различных режимов и условий работы исследованного двигателя (Honda D15B2), показал, что максимальное давление цикла при работе на смесях бензина с водородом выше, чем на бензине, при этом среднее индикаторное давление, характеризующее работу за цикл, наоборот, ниже. На рис. 2 в качестве примера представлена индикаторная диаграмма, снятая при добавках водорода 0...20 % от объема воздуха, при одинаковых коэффициенте избытка окислителя $\alpha = 1,18$, частоте вращения коленчатого вала $n = 2670$ мин⁻¹ и при оптимальном угле опережения зажигания для каждой смеси. Видно, что обогащение бензин-воздушной смеси водородом до 20 % от объема воздуха увеличивает максимальное давление цикла примерно на 19 % и смещает его пик по углу кривошипа на 6°. При этом среднее индикаторное давление явно падает на 3...18 % по сравнению с работой на чистом бензине, что ведет к пропорциональному снижению как индикаторной мощности двигателя, так и индикаторного КПД цикла. Хотя, по данным [12], обогащение бензин-воздушной смеси водородом приводит к снижению индикаторного давления, а максимальные давления цикла пример-

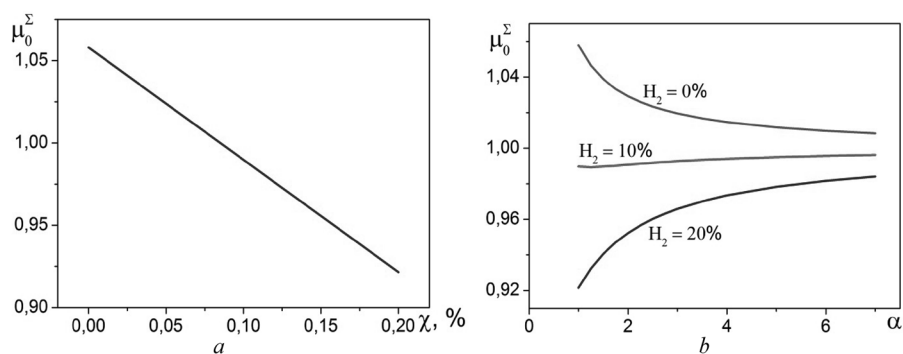
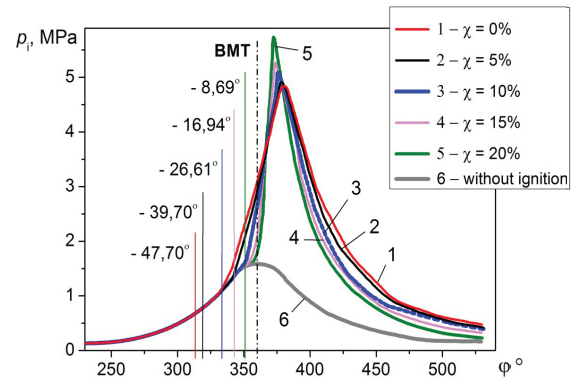


Рис. 1. Зависимость коэффициента молекулярного изменения от содержания водорода в топливно-воздушной смеси (а) и от степени обеднения смеси топливом (б)

Fig. 1. Ratio of molecular changes vs. the amount of hydrogen in a fuel/air mixture (a) and the degree of depletion of a fuel-enriched mixture (b)

Рис. 2. Индикаторная диаграмма двигателя при работе двигателя на бензине с добавками водорода: 1 – $H_2 = 0\%$, $\varphi = 47,70^\circ$; 2 – $H_2 = 5\%$, $\varphi = 39,70^\circ$; 3 – $H_2 = 10\%$, $\varphi = 26,61^\circ$; 4 – $H_2 = 15\%$, $\varphi = 16,94^\circ$; 5 – $H_2 = 20\%$, $\varphi = 8,69^\circ$; 6 – без зажигания ($\alpha = 1,18$; $n = 2670 \text{ мин}^{-1}$)

Fig. 2. Indicator diagram of the H_2 -enriched gasoline engine mode: 1 – $H_2 = 0\%$, $\varphi = 47,70^\circ$; 2 – $H_2 = 5\%$, $\varphi = 39,70^\circ$; 3 – $H_2 = 10\%$, $\varphi = 26,61^\circ$; 4 – $H_2 = 15\%$, $\varphi = 16,94^\circ$; 5 – $H_2 = 20\%$, $\varphi = 8,69^\circ$; 6 – no ignition ($\alpha = 1.18$; $n = 2670 \text{ min}^{-1}$)



но одинаковы. Такое различие, как отмечалось выше, вероятно, результат исследования разных двигателей с разным уровнем совершенства рабочего процесса. Очевидно, эффект уменьшения среднего индикаторного давления является следствием снижения объемной теплотворной способности смеси, вызванной наличием водорода, которая выражается следующим образом:

$$h_u^\Sigma = h_u^{H_2} \cdot \beta + h_u^{\text{Gasoline}} \cdot (1 - \beta), \quad (2)$$

где $h_u^{H_2}$ – объемная теплота сгорания водородно-воздушной смеси, равная $h_u^{H_2} = \frac{H_u^{H_2}}{1 + \alpha L_o^{H_2}}$ (при $\alpha \geq 1$), $h_u = \frac{H_u^{H_2} - \Delta H_u^{H_2}}{1 + \alpha L_o^{H_2}}$ (при $\alpha < 1$); h_u^{Gasoline} – объемная теплота сгорания бензин-воздушной

смеси, равная $h_u^{\text{Gasoline}} = \frac{H_u^{\text{Gasoline}}}{1 + \alpha L_o^{\text{Gasoline}}}$ (при $\alpha \geq 1$), $h_u = \frac{H_o^{\text{Gasoline}} - \Delta H_o^{\text{Gasoline}}}{1 + \alpha L_o^{\text{Gasoline}}}$ (при $\alpha < 1$);

$H_u^{H_2} = 240,74 \text{ МДж/кмоль}$ – низшая теплота сгорания 1 кмоль водорода; $H_u^{\text{Gasoline}} = 43,961 \text{ МДж/кг}$ – низшая теплота сгорания 1 кг бензина; μ_{Gasoline} – средняя молярная масса бензина (изооктана), равная 115 г/моль; β – объемная доля водородно-воздушной части в комбинированной горючей смеси стехиометрического состава (объем всей смеси принимается равным объему камеры сгорания с учетом коэффициента наполнения 0,95), вычисленная по формуле $\beta = \delta \chi (1 + L_o^{H_2})$ ($\delta = 0,98$ – коэффициент, учитывающий объемную долю воздуха в стехиометрической реакции окисления бензина); χ – доля водорода относительно объема поступающего в двигатель воздуха; $L_o^{H_2} = 2,38$ – количество воздуха, теоретически необходимое для полного сгорания 1 моля водорода, которое находим из стехиометрического уравнения баланса $H_2 + 0,5O_2 + 1,88N_2 \rightleftharpoons H_2O + 1,88N_2$; $(1 - \beta)$ – объемная доля бензин-воздушной части в комбинированной горючей смеси.

Уравнение (2) показывает вклад водорода в теплотворную способность смеси. Поскольку $h_u^{H_2}$ всегда меньше h_u^{Gasoline} , то тем меньше общая теплота сгорания смеси, чем больше доля водорода в ней.

На основании изложенного можно заключить, что наличие водорода в топливно-воздушной смеси вызывает падение индикаторной эффективности цикла. Это падение можно представить как безразмерную величину, равную единице минус отношения индикаторных давлений при сгорании обогащенной водородом смеси и базовой бензин-воздушной смеси:

$$\bar{\eta} = 1 - \frac{P_i(\text{gasoline}+H_2)}{P_i(\text{gasoline})}. \quad (3)$$

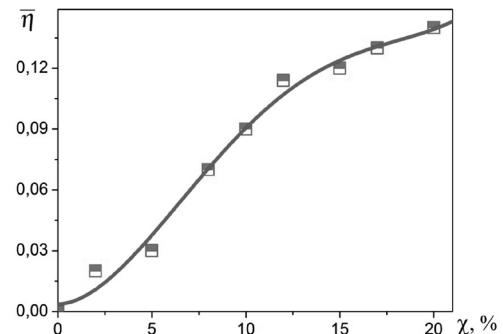


Рис. 3. Зависимость падения индикаторной эффективности $\bar{\eta}$ в цилиндре от содержания водорода в смеси χ ($n = 2180 \text{ мин}^{-1}$; $\alpha = 1,04$)

Fig. 3. Lowering of the indicated efficiency $\bar{\eta}$ in the cylinder vs. hydrogen content in the mixture χ ($n = 2180 \text{ min}^{-1}$; $\alpha = 1.04$)

На рис. 3 показано изменение падения индикаторной эффективности $\bar{\eta}$ цикла в зависимости от степени обогащения смеси водородом. Видно, что с увеличением содержания водорода величина $\bar{\eta}$ увеличивается и при 20%-ной добавке водорода составляет 14 %. Падение индикаторной эффективности $\bar{\eta}$ имеет следующую полиномиальную зависимость от доли водорода χ в смеси:

$$\bar{\eta} = 0,00361 + 4,12329 \cdot 10^{-4} \chi + 0,00187 \chi^2 - 1,30437 \cdot 10^{-4} \chi^3 + 2,64989 \cdot 10^{-6} \chi^4.$$

Заклучение. По результатам экспериментального исследования построена индикаторная диаграмма и проведен анализ работы поршневого двигателя на бензин-воздушных смесях, обогащенных водородом в размере 0...20 % от объема поступающего в двигатель воздуха. Показана возможность получения удовлетворительных показателей при работе на бензине с добавками водорода.

Коэффициент избытка окислителя, при котором достигается максимум индикаторного давления, смещается в область бедных смесей. При обогащении смеси водородом в размере 20 % от объема воздуха максимум индикаторного давления, равный $p_{i\max} = 5,3...5,8$ МПа, получается при $\alpha = 1,15...1,25$, а при 10%-ной добавке водорода имеет место максимум $p_{i\max} = 4,9...5,2$ МПа при $\alpha = 1,05...1,10$ против $p_{i\max} = 4,7...5,1$ МПа при $\alpha = 0,90...0,95$ для чистого бензина.

Среднее индикаторное давление при обогащении смеси водородом снижается. При 20%-ной добавке водорода индикаторное давление падает на 12...19 %, несмотря на некоторое возрастание максимального давления цикла (на 3...18 %) по сравнению с работой на бензине, что ведет к пропорциональному снижению, как индикаторной мощности двигателя, так и индикаторного КПД.

Список использованных источников

1. Andrea, T. D. The addition of hydrogen to a gasoline-fueled SI engine / T. D. Andrea, P. F. Henshaw, D. S.-K. Ting // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2004. – Vol. 29, № 14. – P. 1541–1552. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.02.002>
2. De Boer, P. C. T. Performance and emission of hydrogen fueled internal combustion engines / P. C. T. De Boer, W. J. McLean, H. S. Homan // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 1976. – Vol. 1, iss. 2. – P. 153–172.
3. Internal combustion engines fueled by natural gas–hydrogen mixtures / S. O. Akansua [et al.] // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2004. – Vol. 29, iss. 14. – P. 1527–1539. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.01.018>
4. Karim, G. A. Methane–hydrogen mixtures as fuels / G. A. Karim, I. Wierzbza, Y. Al-Alousi // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 1996. – Vol. 21, iss. 7. – P. 625–631. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.01.018>
5. Ogden, J. M. A comparison of hydrogen, methanol and gasoline as fuels for fuel cell vehicles: implications for vehicle design and infrastructure development / J. M. Ogden, M. M. Steinbugler, T. G. Kreutz // *J. Power Sources*. – 1999. – Vol. 79, iss. 2. – P. 143–168. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00057-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00057-9)
6. Renewable energy systems based on hydrogen for remote applications / K. Agbossou [et al.] // *J. Power Sources*. – 2001. – Vol. 96, iss. 1. – P. 168–172. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00495-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00495-5)
7. Scenarios for a clean energy future / M. A. Brown [et al.] // *Energy Policy*. – 2001. – Vol. 29, iss. 14. – P. 1179–1196. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(01\)00066-0](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00066-0)
8. Ricardo, H. R. *The High-Speed Internal Combustion Engine* / H. R. Ricardo. – Glasgow: Blackie Publ., 1953. – 435 p.
9. Хмыров, В. И. Исследование рабочего процесса поршневого двигателя на водородно-воздушных смесях / В. И. Хмыров, Б. Е. Лавров // *Труды Института энергии АН КазССР: сб. науч. тр.* – Алма-Ата: Наука КазССР, 1958. – Т. 1. – С. 17–25.
10. Ассад, М. С. Продукты сгорания жидких и газообразных топлив: образование, расчет, эксперимент / М. С. Ассад, О. Г. Пенязьков. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 305 с.
11. Горение водородсодержащих смесей в модели камеры сгорания ДВС / М. С. Ассад [и др.] // *Инженерно-физический журнал*. – 2009. – Т. 82, № 6. – С. 1031–1045. <https://doi.org/10.1007/s10891-010-0291-9>
12. Анализ работы поршневого двигателя на водороде / И. Л. Варшавский [и др.] // *Изв. Высш. учеб. заведений. Машиностроение*. – 1977. – № 10. – С. 110–114.
13. Ассад, М. С. Особенности работы двигателя внутреннего сгорания на водородсодержащих топливах / М. С. Ассад, О. Г. Пенязьков // *Инженерно-физический журнал*. – 2010. – Т. 83, № 4. – С. 814–820. <https://doi.org/10.1007/s10891-010-0408-1>

References

1. Andrea T. D., Henshaw P. F., Ting D. S.-K. The addition of hydrogen to a gasoline-fueled SI engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2004, vol. 29, iss. 14, pp. 1541–1552. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.02.002>
2. De Boer P. C. T., McLean W. J., Homan H. S. Performance and emission of hydrogen fueled internal combustion engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1976, vol. 1, iss. 2, pp. 153–172. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(76\)90068-9](https://doi.org/10.1016/0360-3199(76)90068-9)
3. Akansua S. O., Dulgerb Z., Kahramana N., Veziroğlu T. N. Internal combustion engines fueled by natural gas–hydrogen mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2004, vol. 29, iss. 14, pp. 1527–1539. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.01.018>

4. Karim G. A., Wierzba I., Al-Alousi Y. Methane-hydrogen mixtures as fuels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1996, vol. 21, iss. 7, pp. 625–631. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(95\)00134-4](https://doi.org/10.1016/0360-3199(95)00134-4)
5. Ogden J. M., Steinbugler M. M., Kreutz T. G. A comparison of hydrogen, methanol and gasoline as fuels for fuel cell vehicles: implications for vehicle design and infrastructure development. *Journal of Power Sources*, 1999, vol. 79, iss. 2, pp. 143–168. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00057-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00057-9)
6. Agbossou K., Chahine R., Hamelin J., Laurencelle F., Anouar A., St-Arnaud J. M., Bose T. K. Renewable energy systems based on hydrogen for remote applications. *Journal of Power Sources*, 2001, vol. 96, pp. 168–172. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00495-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00495-5)
7. Brown M. A., Levine M. D., Short W., Koomey J. G. Scenarios for a clean energy future. *Energy Policy*, 2001, vol. 29, iss. 14, pp. 1179–1196. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(01\)00066-0](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00066-0)
8. Ricardo H. R. *The High-Speed Internal Combustion Engine*. Glasgow, Blackie Publ., 1953. 435 p.
9. Khmyrov V. I., Lavrov B. E. Investigation of the working process of a piston engine on hydrogen-air mixtures. *Trudy Instituta energii Akademii nauk Kazakhskoi SSR: sbornik nauchnykh trudov. Tom 1* [Proceedings of the Institute of Energy of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR: a collection of scientific papers. Vol. 1]. Alma-Ata, Nauka KazSSR, 1958, pp. 17–25 (in Russian).
10. Assad M. S., Penyazkov O. G. *Products of combustion of liquid and gaseous fuels. Formation, calculation, experiment*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2010. 305 p. (in Russian).
11. Assad M. S., Leshchevich V. V., Mironov V. N., Penyazkov O. G., Sevruk K. L., Skilond' A. V. Burning of hydrogenous mixtures in the model of an internal-combustion-engine chamber. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2009, vol. 82, iss. 6, pp. 1042–1058. <https://doi.org/10.1007/s10891-010-0291-9>
12. Varshavskii I. L., Mishchenko A. I., Makarov A. A., Talda G. B. Analysis of operation of a hydrogen piston engine. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 1977, no. 10, pp. 110–114 (in Russian).
13. Assad M. S., Penyazkov O. G. Distinctive features of operation of an internal combustion engine running on hydrogen-containing fuels. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2010, vol. 83, iss. 4, pp. 869–875. <https://doi.org/10.1007/s10891-010-0408-1>

Информация об авторах

Ассад Мохамед Сабетович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: assad@hmti.ac.by

Пенязков Олег Глебович – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор физико-математических наук, директор, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: penyaz@dnr.itmo.by

Тарасенко Илья Николаевич – аспирант, младший научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: yayo@tut.by

Information about the authors

Mohamad S. Assad – D. Sc. (Engineering), Leading Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: assad@hmti.ac.by

Oleg G. Penyazkov – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Physics and Mathematics), Director, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: penyaz@dnr.itmo.by

Ilya N. Tarasenko – Ph. D. Student, Junior Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yayo@tut.by

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
УДК 577.31+615.832.9
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-220-228>

Поступила в редакцию 12.10.2017
Received 12.10.2017

А. А. Маханёк, М. Л. Левин

*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь*

ВЛИЯНИЕ ОБЩЕЙ ГАЗОВОЙ КРИОТЕРАПИИ НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ЧЕЛОВЕКА

Аннотация. Лечебный эффект от процедуры общей газовой криотерапии (ОГКТ) достигается, когда средняя температура поверхности кожи человека (пациента) во время процедуры находится в определенном температурном диапазоне, а скорость уменьшения этой температуры превышает некоторое пороговое значение. В работе представлены результаты теоретического анализа теплового состояния пациента на этапе лечебного воздействия ОГКТ. Анализ основан на результатах численного моделирования распределения температуры в разных частях тела пациентов (мужчин) с телосложением (рост, см × масса, кг) 160 × 60, 175 × 75, 190 × 90. Особое внимание уделено взаимосвязи между величиной теплового потока, отводимого от поверхности кожи, и скоростью охлаждения кожных покровов пациента. Результаты численного моделирования представлены графически и обобщены в виде соотношения между безразмерной средней температурой кожных покровов на лечебном этапе процедуры ОГКТ и временем пребывания пациента в процедурной камере, отнесенном ко времени начала этого этапа. Применительно к ОГКТ с температурой газового хладагента от –160 до –110 °С обнаружены следующие закономерности: 1) примерное постоянство (ошибка менее 1 %) среднего значения коэффициента теплоотдачи от поверхности кожи в газовую среду процедурной камеры на протяжении лечебного этапа; 2) экспоненциальная зависимость величины интенсивности кожного кровотока (перфузии крови) от средней температуры охлаждаемых кожных покровов; 3) линейная зависимость от логарифма времени логарифма отношения скорости уменьшения температуры поверхности кожи к величине теплового потока, отводимой конвекцией и излучением плотности.

Ключевые слова: общая газовая криотерапия, холодное воздействие, температура, теплообмен, тепловой поток, скорость уменьшения средней температуры кожного покрова

Для цитирования. Маханёк, А. А. Влияние общей газовой криотерапии на тепловое состояние человека / А. А. Маханёк, М. Л. Левин // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 2. – С. 220–228. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-220-228>

A. A. Makhaniok, M. L. Levin

A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

THE EFFECT OF WHOLE BODY GAS CRYOTHERAPY ON THE HUMAN THERMAL STATE

Abstract. The therapeutic effect of the whole body gas cryotherapy (WBGC) procedure is achieved when the average temperature of the human's (patient's) skin surface during the procedure is in a certain temperature range, and the rate of reduction of this temperature exceeds a certain threshold value. The paper presents the results of a theoretical analysis of the patient's thermal state at the stage of the therapeutic effect of WBGC. The analysis was based on the results of the numerical simulation of temperature distribution in different parts of patients (men) of different body constitution (height, cm × mass, kg) 160 × 60, 175 × 75, 190 × 90. Particular attention was paid to the relationship between the amount of heat flow removed from the skin surface and the rate of cooling of the skin of a patient. The results of numerical modeling are presented graphically and are summarized as the ratio between the dimensionless average temperature of the skin at the treatment stage of the WBGC procedure and the time of the patient's stay in the procedural chamber, referred to the time of the beginning of this stage. With regard to WBGC within the temperatures range of –160 to –110 °C the following regularities were found: 1) approximate constancy (descripancy less than 1 %) at the stage of therapeutic modality of the coefficient of heat transfer from the skin surface to the gas medium in the treatment chamber; 2) the exponential dependence of the value of cutaneous blood flow rate (blood perfusion) on the mean temperature of cooled cutaneous coverings; 3) linear dependence of the logarithm of the ratio of the rate of skin temperature reduction to the value of heat flux density removed by convection and radiation on the logarithm time.

Key words: whole body gas cryotherapy, cold exposure, temperature, heat transfer, heat transfer

For citation. Makhaniok A. A., Levin M. L. The effect of whole body gas cryotherapy on the human thermal state. *Vestsi Natsyuanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 2, pp. 220–228 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-220-228>

Введение. Общая газовая криотерапия (ОГКТ) оказывает благотворное влияние на организм человека (пациента) при самых разнообразных расстройствах здоровья и патологических состояниях. Лечебный эффект от применения ОГКТ проявляется, когда температура газового хладагента (охлажденного сухого воздуха или паров азота) составляет менее $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, а продолжительность холодового воздействия (ХВ) находится в интервале времени 2–4 мин. Используемые в настоящее время условия и режимы проведения ОГКТ установлены опытным путем и не имеют обоснования, основанного на учете физиологических, биофизических, биохимических и других механизмов реализации лечебного эффекта и закономерностей, вызываемых подобным кратковременным ХВ или сопровождающих его. В настоящее время известно, что холодовые рецепторы реагируют как на находящийся в определенном диапазоне уровень стационарной температуры (статическая реакция), так и на скорость изменения температуры (динамическая реакция). Холодовыe терморепцепторы TRPA1 у людей активируются при понижении температуры кожных покровов ниже $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1]. Диапазон активации холодовых рецепторов TRPM8 равен $8\text{--}28\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2]. Динамический отклик холодовых терморепцепторов возникает при превышении скорости изменения температуры порогового уровня $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ [3]. В [4, 5] были установлены и исследованы некоторые закономерности терморепцепции при кратковременном остром ХВ и физиологические эффекты, обусловленные этим воздействием, косвенно свидетельствующие о лечебных условиях проведения ОГКТ. На основании этих данных в [6] был сформулирован критерий лечебных условий ОГКТ: лечебный эффект такой терапии достигается, если средняя температура поверхности кожи пациента во время процедуры находится в диапазоне $8\text{--}18\text{ }^{\circ}\text{C}$, а скорость уменьшения этой температуры превышает пороговое значение $\dot{T}_{\text{th}} = 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$.

Цель данного исследования – установление количественной взаимосвязи между интенсивностью теплопотерь пациентом и скоростью охлаждения поверхности его кожи на этапе лечебного воздействия ОГКТ.

Физико-математическая модель ОГКТ. Перед прохождением процедуры ОГКТ пациент в течение 15 мин адаптируется при комнатной температуре. К моменту входа в процедурную камеру температура поверхности его кожи примерно на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ превышает верхний температурный порог, но с началом ХВ начинает быстро уменьшаться. Скорость охлаждения зависит от температуры газового хладагента в процедурной камере и, как показывают численные оценки, для всех вариантов криотерапевтических установок с рабочей (лечебной) температурой от -160 до $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ значительно превышает пороговое значение $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$. Достижение верхней границы терапевтического температурного диапазона $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит спустя некоторое время от момента начала процедуры. Это время тем больше, чем выше температура в процедурной камере. При слишком низкой температуре в процедурной камере и большой продолжительности ХВ температура кожи становится меньше нижней границы терапевтического диапазона, и дальнейшее проведение ХВ уже не будет иметь лечебного действия, дополнительного к достигнутому терапевтическому эффекту. Лечебное действие процедуры ОГКТ прекратится и после того, как скорость охлаждения поверхности кожи окажется меньше порогового значения \dot{T}_{th} , что также произойдет через некоторое время от начала ХВ, зависящее от условий проведения ОГКТ.

Распределение и эволюция температуры по глубине биотканей и поверхности кожных покровов пациента могут количественно оцениваться из решения системы уравнений энергии, описывающей перенос тепла в различных частях тела человека, далее называемых компартментами. Эти части имеют тепловую связь между собой, создаваемую кровотоком. В рамках рассматриваемой физической модели ОГКТ тело человека разбивается на 18 частей, состоящих из четырех слоев: ядра (костная или мягкая биоткани), мышечного слоя, слоя подкожной жировой клетчатки и слоя кожи. При этом голова представляется двумя сферическими и цилиндрическими сегментами: «голова», «лоб» и «лицо». Шея и все остальные части имеют цилиндрическую форму. Туловище представляется в виде двух частей – верхней, называемой «грудная клетка», и нижней, условно называемой «живот». Все конечности являются парными и одинаковыми и имеют следующие условные названия: «плечо», «рука», «кисть», «бедро», «голень» и «ступня». Толщины слоев и другие геометрические характеристики компартментов выбираются так, чтобы у модельного человека обеспечивалось соответствие основным антропометрическим харак-

теристикам реального пациента: его росту, общей массе, количеству подкожного жира, мышечной и костной массе.

Теплоперенос в отдельном (k -м) слое j -го компартмента описывается уравнением

$$(\rho C_p)_{jk} \frac{\partial T_{jk}}{\partial t} = \nabla (\lambda_{jk} \nabla T_{jk}) + q_{jk}, \quad (1)$$

где ρ – плотность биоткани, C_p – теплоемкость биоткани, λ – ее теплопроводность, q_{jk} – удельная объемная мощность источников и стоков тепла в биоткани, t – время, T – температура биоткани. Во всех слоях биоткани слагаемое q_{jk} в уравнении энергии (1) учитывает удельную мощность внутренних источников и стоков тепла, в частности обусловленных внутритканевым конвективным (перфузионным) теплообменом [7] и метаболической теплопродукцией: $q_{jk} = q_{\text{conv},jk} + q_{\text{met},jk}$, где $q_{\text{conv},jk} = (\rho C)_{\text{b}} W_{jk} (T_{\text{b}} - T_{jk})$ и $q_{\text{met},jk} = q_{\text{met,bas}} p^{(T_{jk} - T_{\text{bas},jk})/T_{\text{ref}}}$. Здесь индекс b означает кровь, W – перфузия крови, $q_{\text{met,bas}}$ – удельная мощность выделений тепла метаболизма при базальных (термонеutralных) условиях, $p = 2$, $T_{\text{ref}} = 10^\circ\text{C}$ [8] (для головного мозга $p = 3$ [9]). Температура крови T_{b} определяется как средневзвешенная температура всех перфузируемых кровью слоев биоткани (субкомпарментов). Предполагается, что на выходе из каждого слоя она равна его температуре, а изменением температуры крови при движении по крупным сосудам (теплообменом с окружающей сосуд биотканью и между сосудами) можно пренебречь. В компартменте «грудная клетка» учитываются потери тепла на испарение влаги в легких. Величина перфузии крови W характеризует интенсивность внутритканевого кровотока и представляет собой объемный расход крови через биоткань единичного объема. Она является переменной величиной, зависящей от локальной температуры биоткани, типа биоткани и параметров терморегуляционной модели. В данной работе вычисление величины перфузии крови осуществлялось с использованием терморегуляционной модели Столвика [10, 11].

В граничных условиях учитывается непрерывность температуры и теплового потока на границах соседних слоев:

$$T_{jk}|_{\Gamma_{jk}} = T_{j,k-1}|_{\Gamma_{jk}}; \quad \lambda_{jk} \nabla T_{jk}|_{\Gamma_{jk}} = \lambda_{j,k-1} \nabla T_{j,k-1}|_{\Gamma_{jk}}, \quad k = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где Γ_{jk} – граница k -го слоя.

Тепловой поток в центре каждого компартмента полагаем нулевым (условие симметрии поля температур по радиусу). На границе кожи и окружающей среды теплообмен описывается законом Ньютона – Рихмана

$$-\lambda_{j4} \nabla T_{j4}|_{\Gamma_{j4}} = \alpha_j (T_{j4}|_{\Gamma_{j4}} - T_e), \quad (3)$$

в котором α_j – коэффициент теплоотдачи, T_e – температура окружающей среды.

Начальное распределение температур для этапа ОГКТ можно выразить следующим образом:

$$T_{jk}(t = 0) = T_{jk}^0. \quad (4)$$

Здесь T_{jk}^0 – распределение температуры по радиусу компартмента j в слое k . Коэффициенты теплоотдачи α_j отличаются для разных частей тела и зависят от температуры поверхности кожи и температуры окружающей среды. При моделировании эти коэффициенты учитывают также радиационный теплообмен между поверхностью кожных покровов пациента и стенками процедурной камеры.

Другие детали постановки тепловой задачи, а также многочисленные геометрические и теплофизические параметры и источники, из которых они были взяты, приведены в [12, 13].

При вычислении средней температуры кожных покровов учитывается температура и площадь лишь открытых участков кожи шеи, туловища, рук и ног. Поверхности головы частично, а кистей и стоп всегда полностью теплоизолированы. Тепловой поток от них полагался нулевым.

Результаты моделирования теплового состояния пациента во время ОГКТ и их обсуждение. Для определения теплового состояния пациента перед общим криовоздействием рассматривали дополнительно три этапа. Первый этап – определение установочных температур, необходимых для применения терморегуляционной модели Столвика [10, 11]. Эти температуры характерны для конкретного человека с его специфическими антропометрическими и возрастными данными. Под следующими этапами подразумеваем пребывание частично обнаженного пациента при комнатной температуре 20 °С в течение 15 мин (второй этап) и его адаптацию к низкой температуре в предкамере криоустановки при –60 °С на протяжении 30 с (третий этап). Завершающий (четвертый) этап моделирования – нахождение пациента в основной процедурной камере криоустановки при $T_e = -110$ °С в течение 3 мин.

Моделирование проводилось для людей стандартизированной комплекции (рост, см × масса тела, кг): 160 × 60, 175 × 75 и 190 × 90 с показателями индекса массы тела $BMI = M/L^2$ от 23,44 до 24,84. В установках ОГКТ с температурой газового хладагента T_e ниже –110 °С этап адаптации в предкамере не предусмотрен, поэтому при моделировании теплового состояния пациента с $T_e < -110$ °С этот этап не учитывался. В табл. 1 и 2 показаны некоторые антропометрические характеристики пациентов (мужчин) рассмотренных комплекций, а также геометрические характеристики крупнейшей части тела «живот» для этих комплекций. Подчеркнем, что здесь явно учтен жир лишь в подкожной жировой клетчатке. Висцеральный жир, обволакивающий внутренние органы брюшной полости, косвенно учитывается в мягких тканях ядра компартамента «живот».

Толщина кожи у людей разного телосложения в соответственных местах одинакова. Изменение массовой доли кожи у людей разной комплекции, как это видно из табл. 1, существенно и связано с различием в площади кожных покровов. Толщина подкожной клетчатки у людей стандартизированной комплекции изменяется относительно слабо с изменением их роста и массы в диапазоне от 160 × 60 до 190 × 90.

Таблица 1. Антропометрические характеристики пациентов (мужчин) рассматриваемых комплекций
Table 1. Anthropometric characteristics of patients (men) of the examined body types

Телосложение	BMI	Масса биоткани, кг (%)			
		ядро	мышцы	жир	кожа
160 × 60	23,44	23,8 (29,6)	25,7 (42,8)	7,5 (12,5)	3,0 (5,1)
175 × 75	24,49	28,8 (38,4)	32,2 (42,9)	10,3 (13,7)	3,7 (4,9)
190 × 90	24,84	34,4 (38,3)	38,4 (42,7)	12,8 (14,3)	4,3 (4,8)

Таблица 2. Некоторые характеристики компартамента «живот» рассматриваемых комплекций мужчин и температура крови и кожи после 15 мин адаптации при комнатных условиях

Table 2. Some characteristics of the “stomach” compartment of the men’s body types under consideration and the temperature of the blood and skin after 15 minutes of adaptation under room conditions

Телосложение	Толщина подкожного жира, мм	Площадь поверхности кожи, м ²	Удельная площадь кожи, %	Температура перед ОГКТ	
				крови, °С	поверхности кожи, °С
160 × 60	8,94	0,40	26,6	36,77	33,86
175 × 75	9,58	0,44	23,9	36,76	33,85
190 × 90	9,86	0,48	22,3	36,76	33,86

Последние две строки табл. 2 показывают независимость температуры крови и поверхности компартамента «живот» от телосложения после адаптации пациентов при комнатных условиях в течение 15 мин.

В слое кожи компартамента «живот» перфузия крови перед ОГКТ составила 7,82 мл/(100 г·мин), или $1,30 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Рис. 1, 2 демонстрируют изменения основных показателей теплообмена и теплового состояния пациента во время его нахождения в процедурной камере при ОГКТ с температурой газо-

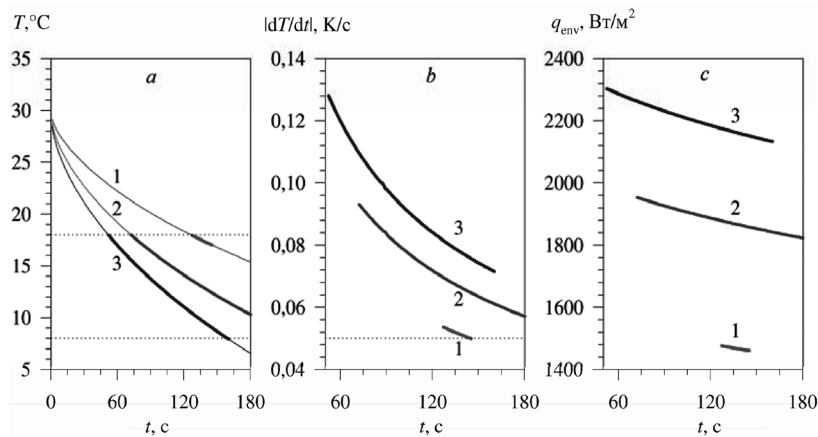


Рис. 1. Средняя температура поверхности кожных покровов (а), скорость ее уменьшения (b) и плотность теплового потока от поверхности кожи (с) при ОГКТ пациента с телосложением 175×75 : 1 – минус 110°C , 2 – минус 140°C , 3 – минус 160°C

Fig. 1. The average temperature of the skin surface (a), the rate of its decrease (b), and the heat flux density from the skin surface (c) for WBGC of the patient with a body type 175×75 : 1 – minus 110°C , 2 – minus 140°C , 3 – minus 160°C

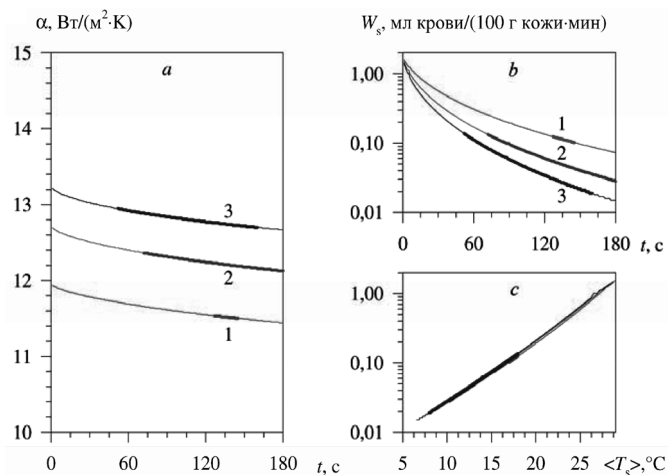


Рис. 2. Эволюция средних значений коэффициента теплоотдачи (а) и интенсивности кожного кровотока (b) от времени и зависимость перфузии крови в коже от средней температуры поверхности кожи (с) при ОГКТ пациента с телосложением 175×75 : 1 – минус 110°C , 2 – минус 140°C , 3 – минус 160°C

Fig. 2. Evolution of the mean values of heat transfer coefficient (a) and intensity of cutaneous blood flow (b) versus time and the dependence of blood perfusion in the skin on the average skin surface temperature (c) for WBGC of a patient with a body type 175×75 : 1 – minus 110°C , 2 – minus 140°C , 3 – minus 160°C

вого хладагента от -160 до -110°C . Индекс s на рис. 2 и далее означает, что параметр относится к коже. Жирными линиями выделены участки, на которых процедура ОГКТ дает лечебный эффект. Расхождения в их протяженности обусловлены сочетанием различий в условиях (интенсивности) отвода тепла от кожных покровов пациента и действия ограничений по величине температуры поверхности и скорости уменьшения этой температуры.

В случае ОГКТ при -110°C верхняя граница лечебной температуры достигается лишь спустя примерно 2 мин от начала острого ХВ. Ограничением лечебной экспозиции явилась скорость охлаждения, которая оказалась ниже порогового уровня менее чем через 30 с от начала терапевтического режима данной процедуры. При ОГКТ с температурой газового хладагента -160°C лечебное действие ОГКТ возникает значительно раньше, чем при -110°C , и, согласно нашим модельным расчетам, прекращается до завершения самой процедуры из-за понижения температуры кожных покровов ниже минимального порогового уровня 8°C . Обращает на себя внимание близкая к линейной зависимость от времени плотности теплового потока от поверхности кожи на лечебном этапе ОГКТ (рис. 1, с).

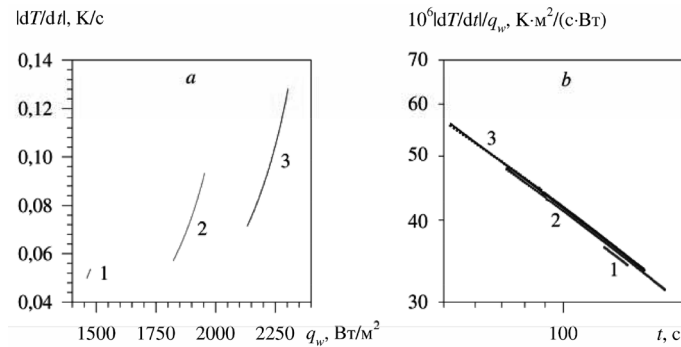


Рис. 3. Взаимосвязь между скоростью уменьшения температуры поверхности кожи и величиной плотности теплового потока (а) и относительной величиной этих параметров в зависимости от времени (б) при ОГКТ пациента с телосложением 175×75 : 1 – минус 110°C , 2 – минус 140°C , 3 – минус 160°C

Fig. 3. Relationship between the rate of decrease of the temperature of the skin surface and the value of the heat flux density (a) and the relative value of these parameters as a function of time (b) for WBGК of a patient with a body type 175×75 : 1 – minus 110°C , 2 – minus 140°C , 3 – minus 160°C

На лечебном этапе ОГКТ характерна линейная зависимость коэффициента теплоотдачи от времени (рис. 2, а). Более того, с относительной погрешностью менее 1 % можно полагать этот коэффициент постоянным.

Рис. 2, б показывает изменение логарифма величины перфузии крови в коже, качественно подобное изменению средней температуры поверхности кожи. Сопоставление этих параметров при одинаковых временах ХВ обнаруживает, во-первых, близкую к линейной взаимосвязь между ними и, во-вторых, независимость этой взаимосвязи от условий теплообмена (рис. 2, с). Таким образом, на лечебном отрезке времени ОГКТ возникает близкая к экспоненциальной зависимость перфузии крови в коже от температуры поверхности кожи.

Еще более интересным и значимым оказывается соотношение между скоростью уменьшения температуры поверхности кожи и величиной плотности теплового потока, показанное на рис. 3. Хотя связь между скоростью изменения температуры поверхности кожи и величиной теплового потока от кожи нелинейна и обусловлена температурой газового хладагента, логарифм отношения \dot{T}_s / q_s зависит от логарифма времени линейно с коэффициентом корреляции выше 0,9994, а влияние условий охладений почти исчезает (рис. 3, б).

Это означает, что между данными параметрами имеется взаимосвязь следующего вида (здесь и далее индекс s опущен для краткости и подразумевается значение параметра T или q на поверхности кожи)

$$\frac{\dot{T}}{q} = C \exp(-\gamma t) = \frac{\dot{T}_u}{q_u} \exp\left(-\gamma \frac{t}{t_u}\right), \quad (5)$$

где индекс u обозначает начало лечебного режима ОГКТ, то есть момент времени достижения верхней границы лечебной температуры 18°C .

На основании эмпирического соотношения (5) в приближении постоянства коэффициента теплоотдачи на лечебном этапе ОГКТ нетрудно получить зависимость температуры поверхности кожных покровов от времени охлаждения. Непосредственное интегрирование выражения (5) по времени дает соотношение

$$\ln \Theta = \frac{\beta}{1-\gamma} \left(1 - \tau^{1-\gamma}\right), \quad (6)$$

в котором параметр $\beta = \frac{|\dot{T}_u| t_u}{T_u - T_e}$, а также введены следующие обозначения для безразмерной температуры поверхности кожи и времени: $\Theta = \frac{T - T_e}{T_u - T_e}$, $\tau = t / t_u$. Параметр β зависит от ско-

рости охлаждения в момент времени t_u и обусловлен всей совокупностью антропометрических, теплофизических и режимных параметров, входящих в тепловую задачу ОГКТ.

Из соотношения (6) следует, что в случае, когда ограничением лечебного этапа ОГКТ является скорость уменьшения температуры кожных покровов пациента, то есть в момент времени t_d имеем $|\dot{T}_d| = R_{th}$, а относительное время этого момента является корнем уравнения

$$\tau_d^{1/(1-\gamma)} + \frac{1-\gamma}{\beta} \tau_d^{1/\gamma} = 1 - \frac{1-\gamma}{\beta} \ln \frac{R_{th}}{|\dot{T}_u|}. \quad (7)$$

В случае достижения наименьшего значения лечебной температуры из (5) получаем для соответствующего момента времени соотношение

$$\tau_d = \left(1 - \frac{\ln \Theta_d}{\beta} \right)^{1/(1-\gamma)}, \quad (8)$$

где $\Theta_d = \frac{8-T_e}{18-T_e} < 1$ – константа при заданной температуре газового хладагента.

Соотношения (7) и (8) интересны тем, что они позволяют оценивать продолжительность ОГКТ, при которой достигается максимальная для заданных условий лечебная экспозиция. Такую задачу мы здесь не рассматриваем, имея в виду дальнейшее продолжение исследований особенностей теплообмена и теплового состояния пациентов при ОГКТ в случае произвольных сочетаний роста и массы, относительного количества мышечной и жировой биоткани, а также возрастных и других индивидуальных особенностей.

Параметры C и γ эмпирической модели (5) приведены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры модели (5) и результаты оценки времени окончания лечебного этапа ОГКТ для различных комплекций пациентов и условий проведения ОГКТ

Table 3. Parameters of the model (5) and the results of the evaluation of the completion time of the treatment phase of WBGC for different patient populations and conditions for WBGC

Температура газового хладагента, °С	Параметр		Ошибка (%) величины t_d/t_u при $\gamma = 0,5$
	C	γ	
<i>Телосложение 160 × 60</i>			
-110	2,518	0,455	-0,64
-140	2,544	0,464	—*
-160	2,530	0,455	2,01
<i>Телосложение 175 × 75</i>			
-110	2,527	0,459	-0,73
-140	2,537	0,461	—*
-160	2,525	0,452	2,11
<i>Телосложение 190 × 90</i>			
-110	2,522	0,457	-1,14
-140	2,534	0,460	—*
-160	2,521	0,451	2,94

Примечание: * – ошибка не оценивалась, так как лимитирующим фактором была продолжительность ОГКТ, то есть на момент окончания процедуры (3 мин) температура и скорость ее изменения находились в терапевтическом диапазоне значений.

Можно отметить примерное постоянство параметров эмпирической модели (5) для ОГКТ в диапазоне температур газового хладагента от -160 до -110 °С. Так, параметр C имеет разброс относительно среднего значения менее 0,5 %, а параметр γ – менее 1,4 %.

Заключение. На лечебном отрезке времени ОГКТ обнаруживается несколько закономерностей, соблюдаемых с высокой точностью при температурах газового хладагента от -160 до -110 °С.

В частности: 1) примерное постоянство (ошибка менее 1 %) на протяжении лечебного этапа среднего значения коэффициента теплоотдачи от поверхности кожи в газовую среду процедурной камеры; 2) экспоненциальная зависимость величины интенсивности кожного кровотока (перфузии крови) от средней температуры охлаждаемых кожных покровов; 3) линейная зависимость от логарифма времени логарифма отношения скорости уменьшения температуры поверхности кожи к величине теплового потока, отводимой конвекцией и излучением плотности. Последняя закономерность в сочетании с первой позволяет получить выражение, явным образом связывающее относительную температуру кожных покровов от времени и в перспективе оптимизировать продолжительность ОГКТ для получения максимальной лечебной экспозиции с учетом индивидуальных антропометрических особенностей пациентов.

Список использованных источников

1. ANKTM1, a TRP-like Channel Expressed in Nociceptive Neurons, Is Activated by Cold Temperatures / G. M. Story [et al.] // *Cell*. – 2003. – Vol. 112, iss. 6. – P. 819–829. [https://doi.org/10.1016/S0092-8674\(03\)00158-2](https://doi.org/10.1016/S0092-8674(03)00158-2)
2. Ständer, S. Neuroreceptors and Mediators / S. Ständer, T. A. Luger // *Neuroimmunology of the Skin* / eds. R. D. Granstein, T. A. Luger. – Berlin ; Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. – P. 13–22. https://doi.org/10.1007/978-3-540-35989-0_2
3. Molinary, H. H. The effect of rate of temperature change and adapting temperature on thermal sensitivity / H. H. Molinary, G. D. Greenspan, D. R. Krenshalo // *Sensory Processes*. – 1977. – Vol. 1, № 4. – P. 354–362.
4. Роль терморепреции в функциональных изменениях эффекторных систем при термических воздействиях на организм / Т. В. Козырева [и др.] // *Бюллетень СО РАМН*. 2004. – № 2. – С. 123–129.
5. Зависимость формирования терморегуляторных реакций на охлаждение от типа активности кожных терморепрепторов / Е. Я. Ткаченко [и др.] // *Бюллетень СО РАМН*. – 2010. – Т. 30, № 4. – С. 95–100.
6. Лавров, Н. А. Аспекты определения индикаторов дозирования общего криотерапевтического воздействия для получения эффекта криостимуляции / Н. А. Лавров, С. К. Савельев, Д. В. Курнасов // *Труды IX Междунар. науч.-практ. конф. «Криотерапия в России»*, г. Санкт-Петербург, 12 мая 2016 г. – СПб.: Ун-т ИТМО, 2017. – С. 20–28.
7. Pennes, H. H. Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm / H. H. Pennes // *J. Appl. Physiol.* – 1948. – Vol. 1. – P. 93–122. <https://doi.org/10.1152/jappl.1948.1.2.93>
8. Маханёк, А. А. Теплофизические аспекты общей газовой криотерапии / А. А. Маханёк, М. Л. Левин, В. Л. Драгун // *Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук.* – 2011. – № 3. – С. 59–71.
9. Xu, X. A mathematical model for human brain cooling during cold-water near-drowning / X. Xu, P. Tikuisis, G. Giesbrecht // *J. Appl. Physiol.* – 1999. – Vol. 86, № 1. – P. 265–272. <https://doi.org/10.1152/jappl.1999.86.1.265>
10. Stolwijk, J. A. J. Temperature regulation in man – A theoretical study / J. A. J. Stolwijk, J. D. Hardy // *Pflügers Archiv*. – 1966. – Vol. 291, iss. 2. – P. 129–162. <https://doi.org/10.1007/bf00412787>
11. Stolwijk, J. A. J. Mathematical models of thermal regulation / J. A. J. Stolwijk // *Annals of the New York Academy of Sciences*. – 1980. – Vol. 335, iss. 1. – P. 98–106.
12. Левин, М. Л. Влияние некоторых факторов теплообмена при общей криотерапии на температуру кожных покровов / М. Л. Левин, А. А. Маханёк, В. Л. Драгун // *Тр. II науч.-практ. конф. «Криотерапия в России»*, г. Санкт-Петербург, 14 мая 2009 г. – Санкт-Петербург, 2009. – СПб.: Ун-т ИТМО – С. 80–103.
13. Charny, C. K. A whole body thermal model of man during hyperthermia tissues / C. K. Charny, M. J. Haggmann, R. L. Levin // *IEEE Trans. on Biomed. Eng.* – 1987. – Vol. BME-34, iss. 5. – P. 375–386. <https://doi.org/10.1109/tbme.1987.325969>

References

1. Story G. M., Peier A. M., Reeve A. J., Eid S. R., Mosbacher J., Hricik T. R., Earley T. J., Hergarden A. C., Andersson D. A., Sun Wook Hwang, Intyre P. Mc, Jegla T., Bevan S., Patapoutian A. ANKTM1, a TRP-like Channel Expressed in Nociceptive Neurons, Is Activated by Cold Temperatures. *Cell*, 2003, vol. 112, iss. 6, pp. 819–829. [https://doi.org/10.1016/S0092-8674\(03\)00158-2](https://doi.org/10.1016/S0092-8674(03)00158-2)
2. Ständer S., Luger T. A. Neuroreceptors and Mediators. Granstein R. D., Luger T. A. (eds.) *Neuroimmunology of the Skin*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2009, pp. 13–22. https://doi.org/10.1007/978-3-540-35989-0_2
3. Molinary H. H., Greenspan G. D., Krenshalo D. R. The effect of rate of temperature change and adapting temperature on thermal sensitivity. *Sensory Processes*, 1977, vol. 1, no. 4, pp. 354–362.
4. Kozyreva T. V., Tkachenko E. Ya., Eliseeva L. S., Simonova T. G., Kozaruk V. N., Gonsales E. V., Lomakina S. V. The role of thermoreception in functional changes in effector systems under thermal effects on the body. *Byulleten' Sibirskogo otdeleniya Rossiiskoi akademii meditsinskikh nauk = Bulletin of the Siberian Branch of the Russian Academy of Medical Sciences*, 2004, no. 2 (112), pp. 123–129 (in Russian).
5. Tkachenko E. Ya., Kozaruk V. P., Khramova G. M., Voronova I. P., Meita E. S., Kozyreva T. V. Dependence of the formation of thermoregulatory reactions on cooling on the type of activity of cutaneous thermoreceptors. *Byulleten' Sibirskogo otdeleniya Rossiiskoi akademii meditsinskikh nauk = Bulletin of the Siberian Branch of the Russian Academy of Medical Sciences*, 2010, vol. 30, no. 4, pp. 95–100 (in Russian).

6. Lavrov N. A., Savel'ev S. K., Kurnasov D. V. Aspects of determining the dosing indicators of the total cryoteria effect for obtaining the cryostimulation effect. *Trudy IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Krioterapiya v Rossii", Sankt-Peterburg, 12 maya 2016 g.* [Proceedings 9th International Scientific and Practical Conference "Cryotherapy in Russia", Saint Petersburg, May 12, 2016]. Saint Petersburg, ITMO University, 2017, pp. 20–28 (in Russian).
7. Pennes H. H. Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm. *Journal of Applied Physiology*, 1948, vol. 1, pp. 93–122. <https://doi.org/10.1152/jappl.1948.1.2.93>
8. Makhaniok A. A., Levin M. L., Dragun V. L. Thermophysical aspects of the whole body gas cryotherapy. *Vestsi Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2011, no. 3, pp. 59–71 (in Russian).
9. Xu X., Tikuisis P., Giesbrecht G. A mathematical model for human brain cooling during cold-water near-drowning. *Journal of Applied Physiology*, 1999, vol. 86, no. 1, pp. 265–272. <https://doi.org/10.1152/jappl.1999.86.1.265>
10. Stolwijk J. A. J., Hardy J. D. Temperature regulation in man – A theoretical study. *Pflügers Archiv*, 1966, vol. 291, iss. 2, pp. 129–162. <https://doi.org/10.1007/bf00412787>
11. Stolwijk J. A. J. Mathematical models of thermal regulation. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1980, vol. 335, iss. 1, pp. 98–106. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1980.tb50739.x>
12. Levin M. L., Makhaniok A. A., Dragun V. L. Influence of some heat transfer factors in the whole body cryotherapy on the temperature of the skin. *Trudy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Krioterapiya v Rossii", Sankt-Peterburg, 14 maya 2009 g.* [Proceedings 2th International Scientific and Practical Conference Cryotherapy in Russia, Saint Petersburg, May 14, 2009]. Saint Petersburg, ITMO University, 2009, pp. 80–103 (in Russian).
13. Charny C. K., Hagmann M. J., Levin R. L. A whole body thermal model of man during hyperthermia tissues. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1987, vol. BME-34, iss. 5, pp. 375–386. <https://doi.org/10.1109/tbme.1987.325969>

Информация об авторах

Маханёк Александр Анатольевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории нанопроцессов и технологий, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: amakh@tut.by

Левин Марк Львович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории нанопроцессов и технологий, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: marklvn@belhard.com

Information about the authors

Aliaksandr A. Makhaniok – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Laboratory of Nanoprocess and Technologies, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: amakh@tut.by

Mark L. Levin – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher of the Laboratory of Nanoprocess and Technologies, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: marklvn@belhard.com

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
УДК 621.313
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-229-243>

Поступила в редакцию 16.02.2018
Received 16.02.2018

А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин

Военная академия Республики Беларусь, Минск, Беларусь

МЕТОДИКА СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА КОМБИНИРОВАННОГО ГЕНЕРАТОРА ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ ЭНЕРГОУСТАНОВОК РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА БАЗЕ СВОБОДНОПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Аннотация. Система энергоснабжения современных робототехнических комплексов требует разработки электромеханических преобразователей энергии с высокими энергетическими и минимальными массогабаритными показателями. В связи с этим в качестве перспективной энергоустановки рассматривается свободнопоршневой двигатель с электрическим генератором.

Интерес к исследованию энергоустановок на базе свободнопоршневых двигателей обусловлен рядом преимуществ в сравнении с классическими двигателями внутреннего сгорания с кривошипно-шатунным механизмом: относительной простотой конструкции; на 40 % меньшим количеством элементов, что в 2,5–3 раза увеличивает габаритную мощность, удельную массу и металлоемкость свободнопоршневого двигателя; сниженным на 30 % расходом топлива. Также важное конструктивное преимущество энергоустановок на базе свободнопоршневых двигателей – это сравнительно легкое их модульное исполнение. В разрабатываемых энергоустановках на базе свободнопоршневых двигателей зарубежных стран (США, Россия, Германия, Китай, Великобритания, Япония, Швеция, Израиль и др.) в качестве электрической машины переменного тока чаще всего применяются возвратно-поступательные электрические генераторы с поперечным приращением магнитного потока. Основным недостатком такого типа генераторов являются отсутствие согласования электрической и механической подсистем энергоустановки в крайних точках рабочего цикла, что ограничивает эффективность использования свободнопоршневого двигателя и снижает надежность энергоустановки.

Для решения этой проблемы было предложено использовать электромеханический преобразователь энергии с поперечным и продольным приращением магнитного потока (комбинированный генератор). Однако в настоящее время отсутствует научно обоснованная методика синтеза такого типа генератора. С целью решения этой задачи была разработана методика структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора возвратно-поступательного типа для энергоустановки на базе свободнопоршневого двигателя, основанная на использовании удельной массы комбинированного генератора в качестве целевой функции, что позволяет синтезировать электрическую машину возвратно-поступательного типа с заданным КПД и минимальной удельной массой.

Ключевые слова: методика структурно-параметрического синтеза, комбинированный генератор возвратно-поступательного типа, возвратно-поступательный электрический генератор, свободнопоршневой двигатель

Для цитирования: Менжинский, А. Б. Методика структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора возвратно-поступательного типа для энергоустановок робототехнических комплексов на базе свободнопоршневого двигателя / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – Т. 63, № 2. – С. 229–243. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-229-243>

A. B. Menzhinski, A. N. Malashin

Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

METHODS OF STRUCTURAL AND PARAMETRIC SYNTHESIS OF COMBINED GENERATOR OF RECIPROCATING POWER PLANTS FOR ROBOTIC SYSTEMS ON THE BASIS OF A FREE PISTON ENGINE

Abstract. Power supply system of advanced robotic systems requires the development of electromechanical energy converters with high energy and minimum weight and overall dimensions. In this regard, a free piston engine with an electric generator is considered as a promising plant.

Interest in the study of power plants based on free piston engines is caused by several advantages compared to conventional internal combustion engines with a crank mechanism: relative simplicity of the design, 40 % fewer elements, which reduces the overall capacity, specific gravity and metal content of the free piston engine in 2.5–3 times. In addition, the fuel consumption is 30 % lower. Also an important design advantage of power plants based on free piston engines is a relatively

simple modular construction. Reciprocating electric generators with transverse increment of the magnetic flux are the most commonly used ones in currently developed power plants based on free piston engines of foreign countries (USA, Russia, Germany, China, UK, Japan, Sweden, Israel, etc.) as the electrical AC machines. The main disadvantage of this type of generators are the absence of coordination of electrical and mechanical subsystems of the power plant at the extreme points of the operating cycle, which limits the efficiency of the free piston engine and reduces the reliability of the power plant.

To solve this problem it is proposed to use Electromechanical energy Converter with transverse and longitudinal increment of the magnetic flux (combo generator). However, currently there is no scientifically valid method of synthesis of this type of generator. To address this problem we have developed the methodology of structural and parametric synthesis of combined generator of the reciprocating type for a plant on the basis of free piston engine, which is based on the use of the specific gravity of the combined generator as the objective function. It allows synthesizing electric machine of the reciprocating type with the specified efficiency and minimum specific mass.

Key words: methods of structurally-parametrical synthesis, combined reciprocating generator, reciprocating electric generator, free piston engine

For citation. Menzhinski A. B., Malashin A. N. Methods of structural and parametric synthesis of combined generator of reciprocating power plants for robotic systems on the basis of a free piston engine. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 2, pp. 229–243 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-229-243>

Введение. Система энергоснабжения современных робототехнических комплексов требует разработки электромеханических преобразователей энергии с высокими энергетическими и минимальными массогабаритными показателями [1]. В связи с этим в качестве перспективной энергоустановки рассматривается свободнопоршневой двигатель (СПД) с электрическим генератором [2–4].

Основной особенностью такой системы является отсутствие кривошипно-шатунного механизма в конструкции двигателя. Это позволяет увеличить его КПД до 50–60 %, габаритную мощность – в 2,5–3 раза, снизить удельную массу и металлоемкость СПД [2], а также удельный расход топлива приводного двигателя до 140 г/кВт·ч, реализовать модульную структуру, увеличить ресурс до капитального ремонта до 50 тыс. ч [3, 4].

В разрабатываемых энергоустановках на базе СПД зарубежных стран (США, Россия, Германия, Китай, Великобритания, Япония, Швеция, Израиль и др.) в качестве электрической машины переменного тока чаще всего применяются возвратно-поступательные электрические генераторы с поперечным приращением магнитного потока (ВПЭГ с ПМП) [2–4]. Основным их недостатком являются отсутствие согласования ВПЭГ с ПМП и СПД в крайних точках рабочего цикла, что ограничивает эффективность использования СПД и снижает надежность энергоустановки.

Для решения проблемы согласования электрической и механической подсистем энергоустановки на базе СПД в крайних точках рабочего цикла в [5, 6] предлагалось использование электромеханического преобразователя энергии с поперечным и продольным приращением магнитного потока (комбинированного генератора). В [7] оценена эффективность использования такого генератора в энергоустановке на базе СПД в качестве электрической машины. Однако в настоящее время отсутствует научно обоснованная методика синтеза такого типа генератора. Для решения этой задачи была разработана методика структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора возвратно-поступательного типа для энергоустановки на базе свободнопоршневого двигателя, основанная на использовании удельной массы комбинированного генератора в качестве целевой функции. Это позволяет синтезировать электрическую машину возвратно-поступательного типа с заданным КПД и минимальной удельной массой.

Методика структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора. Блок-схема алгоритма методики структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора возвратно-поступательного типа для энергоустановки на базе СПД представлена на рис. 1.

Рассмотрим более подробно этапы методики структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора.

1. Расчет количества уравновешенных модулей ($N_{у.м.}$) и электрической мощности одного модуля ($P_{мод.}$) энергоустановки, проводится на основе графика потребляемой нагрузки ($P_{потр.}(t)$). Под уравновешенным модулем понимается совокупность двух СПД, с электрическим генератором работающих в противофазе [6].

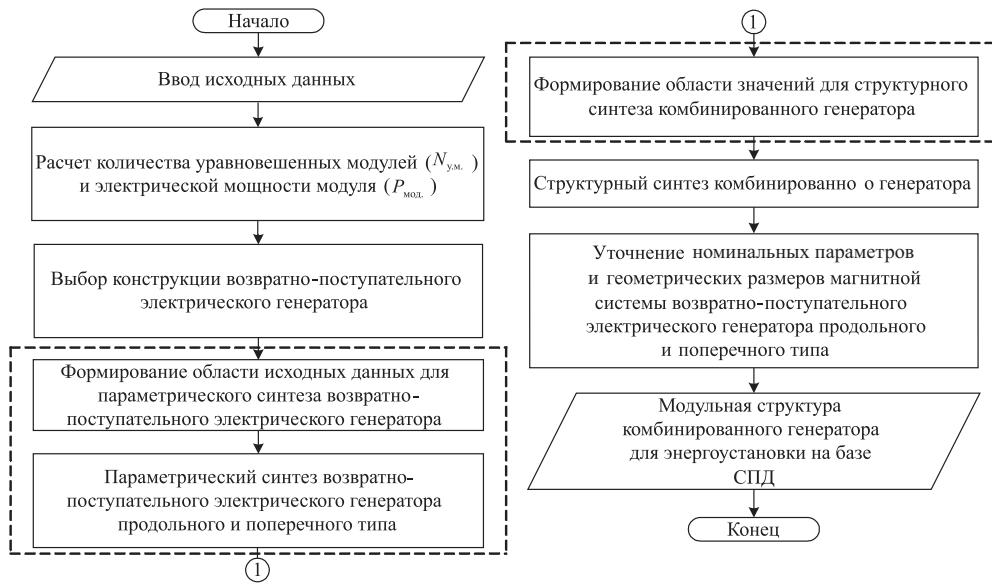


Рис. 1. Блок-схема алгоритма методики структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора возвратно-поступательного типа

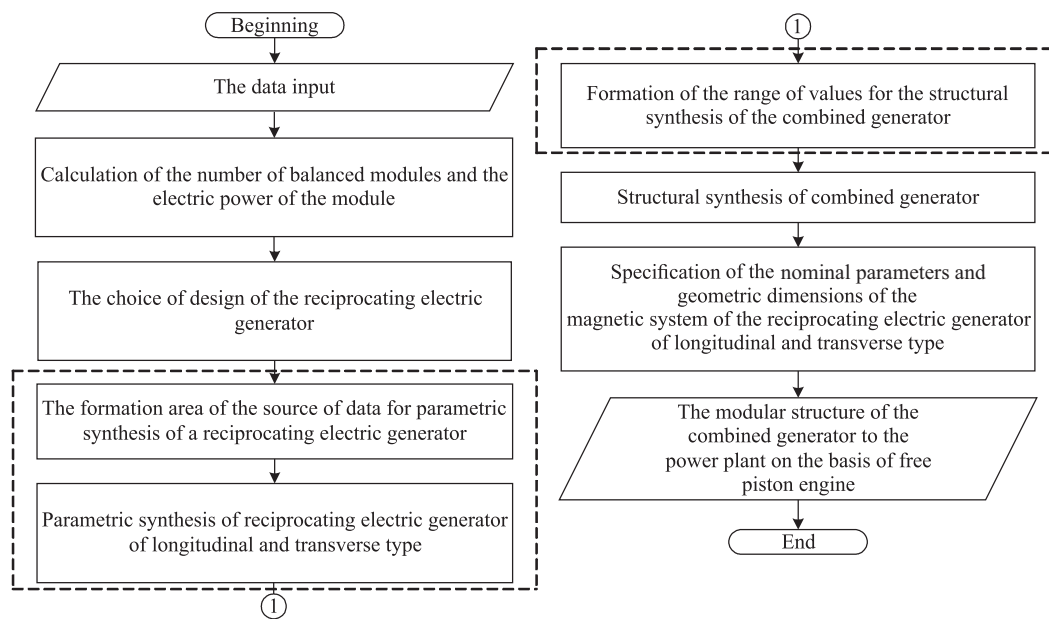


Fig. 1. Block diagram of the algorithm of methodology of structural and parametric synthesis of combined reciprocating generator

$$N_{y.m.} = \frac{P_{пол.}}{\frac{1}{t} \int_0^t P_{потр.}(t) dt}, \quad P_{мод.} = \frac{1}{2t} \int_0^t P_{потр.}(t) dt,$$

где $P_{пол.}$ – потребляемая активная электрическая мощность; $\frac{1}{t} \int_0^t P_{потр.}(t) dt$ – среднее значение потребляемой активной электрической мощности по графику потребляемой нагрузки.

2. Выбор конструкции ВПЭГ продольного типа осуществляется в соответствии с величиной рабочего хода СПД и эффективными интервалами применения ВПЭГ продольного типа. Эффективный интервал применения достигает: однополярного ВПЭГ продольного типа – 25–40 мм; разнополярного ВПЭГ продольного типа – 30–50 мм.

Конструкция ВПЭГ поперечного типа выбирается в соответствии с существующими конструктивными исполнениями этих типов генераторов [8].

3. Формирование области исходных данных для параметрического синтеза ВПЭГ осуществляется по алгоритму, блок-схема которого представлена на рис. 2.

При построении алгоритма формирования области исходных данных для параметрического синтеза ВПЭГ использовались подходы, изложенные в [9, 10] и дополненные расчетом магнитных систем с постоянными магнитами [8, 11].

Согласно алгоритму (рис. 2), на данном этапе методики проводится электромагнитный расчет ВПЭГ в мощностном диапазоне $[P_{\text{мин.}}, P_{\text{мод.}}]$, с некоторым шагом $\Delta = (P_{\text{мод.}} - P_{\text{мин.}})/D$, где $P_{\text{мин.}}$ – активная минимальная электрическая мощность одного модуля, значение которой целесообразно выбирать из интервала 300–2000 Вт. Погрешность расчетов будет тем меньше, чем меньше Δ .

Проблема синтеза оптимальной конструкции ВПЭГ сводится к нахождению оптимальных параметров их магнитной системы. Стремление обеспечить минимум критерия «удельная масса» в большинстве случаев приводит к заниженному уровню КПД генератора [8]. Поэтому целесообразно в качестве одного из ограничений при нахождении оптимальных параметров магнитной системы ВПЭГ использовать КПД генератора (η).

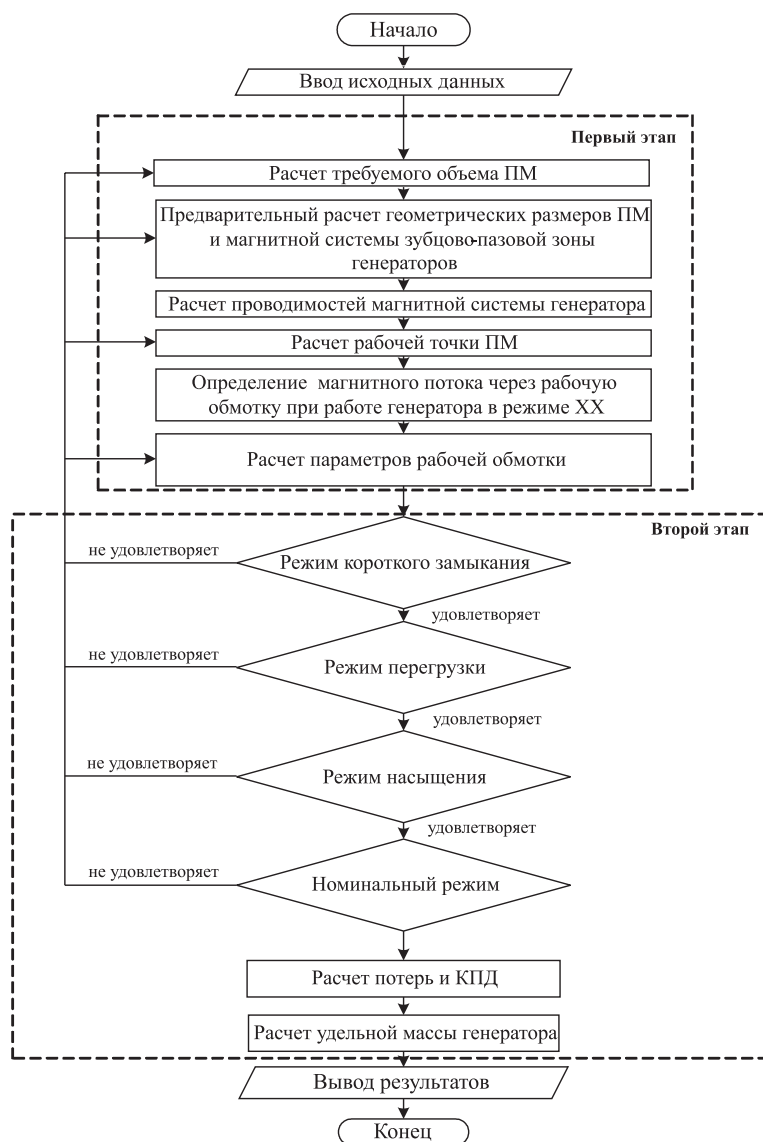


Рис. 2. Блок-схема алгоритма формирования области исходных данных для параметрического синтеза возвратно-поступательного электрического генератора

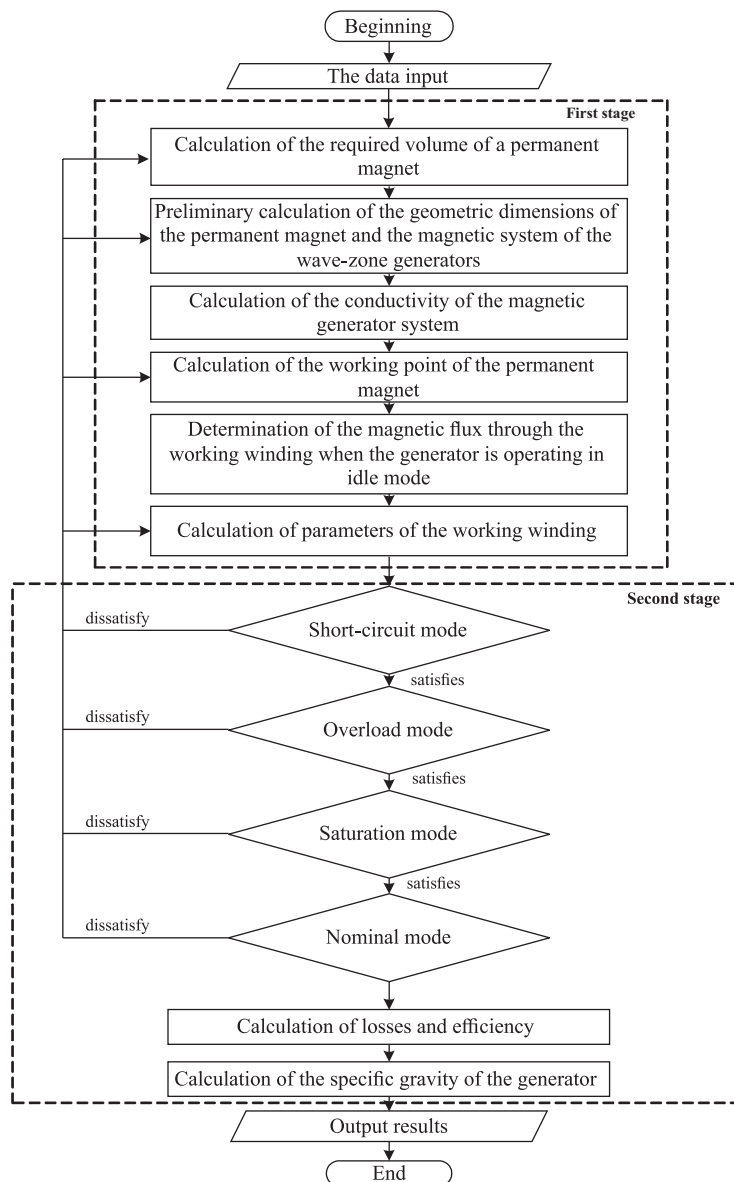


Fig. 2. Block diagram of algorithm of formation area of the source of data for parametric synthesis of a reciprocating electric generator

В качестве переменных параметров магнитной системы ВПЭГ приняты площадь поперечного сечения магнитопровода генератора (S) и количество витков рабочей обмотки генератора (w). Данные, полученные на основании алгоритма (рис. 2), представлены в виде зависимостей удельной массы ($\hat{M}_{уд.}$) и КПД ($\hat{\eta}$) ВПЭГ продольного типа от количества витков рабочей обмотки и величины площади поперечного сечения магнитопровода генератора, которые в нормированном виде показаны на рис. 3 и 4.

Из этих рисунков видно, что между S и w существует некоторое оптимальное соотношение, при котором удельная масса ВПЭГ продольного типа достигает минимального значения, а КПД соответствует заданному значению. Поэтому становится актуальной задача параметрического синтеза ВПЭГ, решение которой с заданными ограничениями и условиями работы позволит найти оптимальное соотношение S и w , а также соответствующую ему минимальную удельную массу ВПЭГ.

4. Проведенные в отчетах о НИР № 3061/17 «Разработка технических предложений по усовершенствованию фиксаторов мачты и антенного поста базовой мобильной быстроразвертываемой платформы типа МБРП-30-200» и № 3042/17 «Обоснование ТТТ для модернизации радиостанции

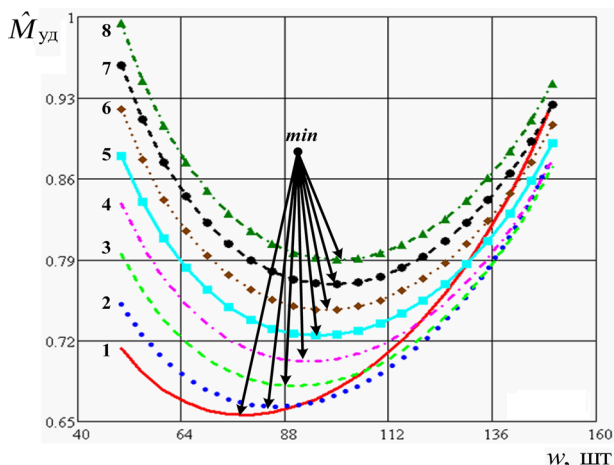


Рис. 3. Зависимость удельной массы от w при $S_7 > S_6 > S_5 > S_4 > S_3 > S_2 > S_1$

Fig. 3. Dependence of the mass from the w at $S_7 > S_6 > S_5 > S_4 > S_3 > S_2 > S_1$

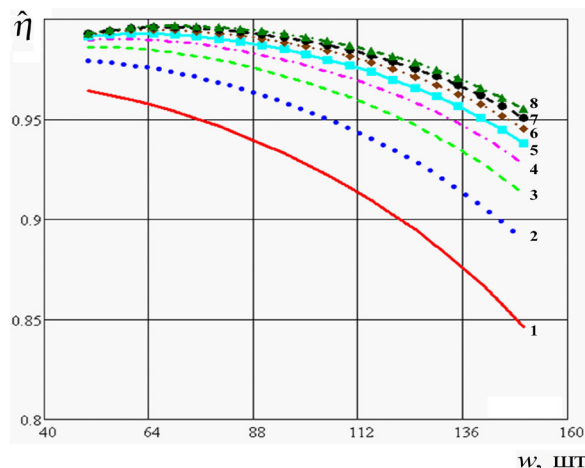


Рис. 4. Зависимость КПД от w при $S_7 > S_6 > S_5 > S_4 > S_3 > S_2 > S_1$

Fig. 4. Dependence of the efficiency on w if $S_7 > S_6 > S_5 > S_4 > S_3 > S_2 > S_1$

P-140-0,5 и P-140-M» (оба – Минск, 2017) рассуждения и общие соотношения позволяют записать целевую функцию «удельная масса» для решения задачи параметрического синтеза ВПЭГ продольного и поперечного типа в следующем виде:

$$\frac{M_{\Gamma}(S, w)}{E_{\text{эдс.хх}}(S, w)I_{\text{н}} - I_{\text{н}}^2 \sqrt{R_0^2(S, w) + X_{\text{ло}}^2(S, w)}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где S и w – переменные, $M_{\Gamma}(S, w)$ – полная масса генератора; $E_{\text{эдс.хх}}(S, w)$ – ЭДС холостого хода генератора, $I_{\text{н}}$ – действующий ток в цепи генератора, $R_0(S, w)$ – активное сопротивление рабочей обмотки, $X_{\text{ло}}(S, w)$ – индуктивное сопротивление рабочей обмотки генератора.

Отличия выражения (1) для ВПЭГ продольного и поперечного типа заключаются в составляющих, которые учитывают особенности продольного и поперечного приращения магнитного поля, а также в конструктивных размерах генераторов.

Системы ограничений параметров (*) и условий (**) работы генератора при этом записываются в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta(S, w) \geq \eta_{\text{зад.}}; \\ P_{\text{вых 1}} \leq P_{\text{вых}}(S, w) \leq P_{\text{вых 2}}; \\ U_{\text{вых 1}} \leq U_{\text{вых}}(S, w) \leq U_{\text{вых 2}}; \\ B_m(S) \leq B_{\text{макс.}}; \\ V_m(S) \geq V_{\text{м. треб.}} \end{array} \right\} *, \quad \left\{ \begin{array}{l} 3 \leq I_{\text{кз}}(S, w)/I_{\text{н}} \leq 4; \\ j(S, w) \leq j_{\text{зад.}}; \\ B_{\text{кз. зад. 2}} \leq B_{\text{кз}}(S, w) \leq B_{\text{кз. зад. 1}}; \\ B_{\text{р. зад. 2}} \leq B_{\text{р}}(S) \leq B_{\text{р. зад. 1}} \end{array} \right\} **, \quad (2)$$

где $\eta(S, w)$ и $\eta_{\text{зад.}}$ – расчетное и заданное значения КПД ВПЭГ; $P_{\text{вых}}(S, w)$, $P_{\text{вых 1}}$ и $P_{\text{вых 2}}$ – расчетное и заданные значения выходной активной электрической мощности ВПЭГ; $U_{\text{вых}}(S, w)$, $U_{\text{вых 1}}$ и $U_{\text{вых 2}}$ – расчетное и заданные значения действующего напряжения на зажимах ВПЭГ; $B_m(S)$ и $B_{\text{макс.}}$ – расчетное и заданное значения амплитуды магнитной индукции в магнитопроводе ВПЭГ; $V_m(S)$ и $V_{\text{м. треб.}}$ – расчетное и заданное значения объема постоянного магнита (позволяет обеспечить заданную перегрузку); $I_{\text{кз}}(S, w)$ – расчетное значение тока короткого замыкания; $j_{\text{зад.}}$ – плотность тока в рабочей обмотке; $B_{\text{кз}}(S, w)$, $B_{\text{кз. зад. 1}}$ и $B_{\text{кз. зад. 2}}$ – расчетное и заданные значения магнитной индукции рабочей точки ПМ при коротком замыкании; $B_{\text{р}}(S)$, $B_{\text{р. зад. 1}}$ и $B_{\text{р. зад. 2}}$ – расчетное и заданные значения магнитной индукции рабочей точки ПМ в номинальном режиме работы генератора.

Решение подобного класса задач может осуществляться одним из прямых методов оптимизации [12]. В разработанной методике применялся метод сканирования с ограничениями [13].

При этом начальные значения и границы интервалов поиска значений независимых переменных предварительно уточнялись в процессе электромагнитного расчета ВПЭГ, что значительно сократило время расчета. Блок-схема алгоритма параметрического синтеза ВПЭГ по критерию «минимум удельной массы» представлена на рис. 5. Алгоритм реализован в программной среде Mathcad 14.0.

Результатом решения задачи параметрического синтеза при заданных исходных данных является оптимальное соотношение между S и w , а также соответствующие ему минимальная удельная масса ($m_{уд}$) и заданный КПД (η) ВПЭГ, значения которых показаны в табл. 2 и являются необходимыми данными для структурного синтеза комбинированного генератора.

Таблица 2. Данные для структурного синтеза комбинированного генератора в мощностном диапазоне [$P_{мин.}$, $P_{мод.}$]

Table 2. Data for structural synthesis of the combined generator in the power range [$P_{min.}$, $P_{mod.}$]

P , Вт	ВПЭГ продольного типа			ВПЭГ поперечного типа		
	$m_{уд}$, кг/кВт	$P_{\Sigmaпот.}$, Вт	η , %	$m_{уд}$, кг/кВт	$P_{\Sigmaпот.}$, Вт	η , %
$P_{мин.}$	$m_{уд1}$	$P_{\Sigmaпот.1}$	η_1	$m_{уд1}$	$P_{\Sigmaпот.1}$	η_1
P_1	$m_{уд2}$	$P_{\Sigmaпот.2}$	η_2	$m_{уд2}$	$P_{\Sigmaпот.2}$	η_2
...
$P_{мод.}$	$m_{удn}$	$P_{\Sigmaпот.n}$	η_n	$m_{удn}$	$P_{\Sigmaпот.n}$	η_n

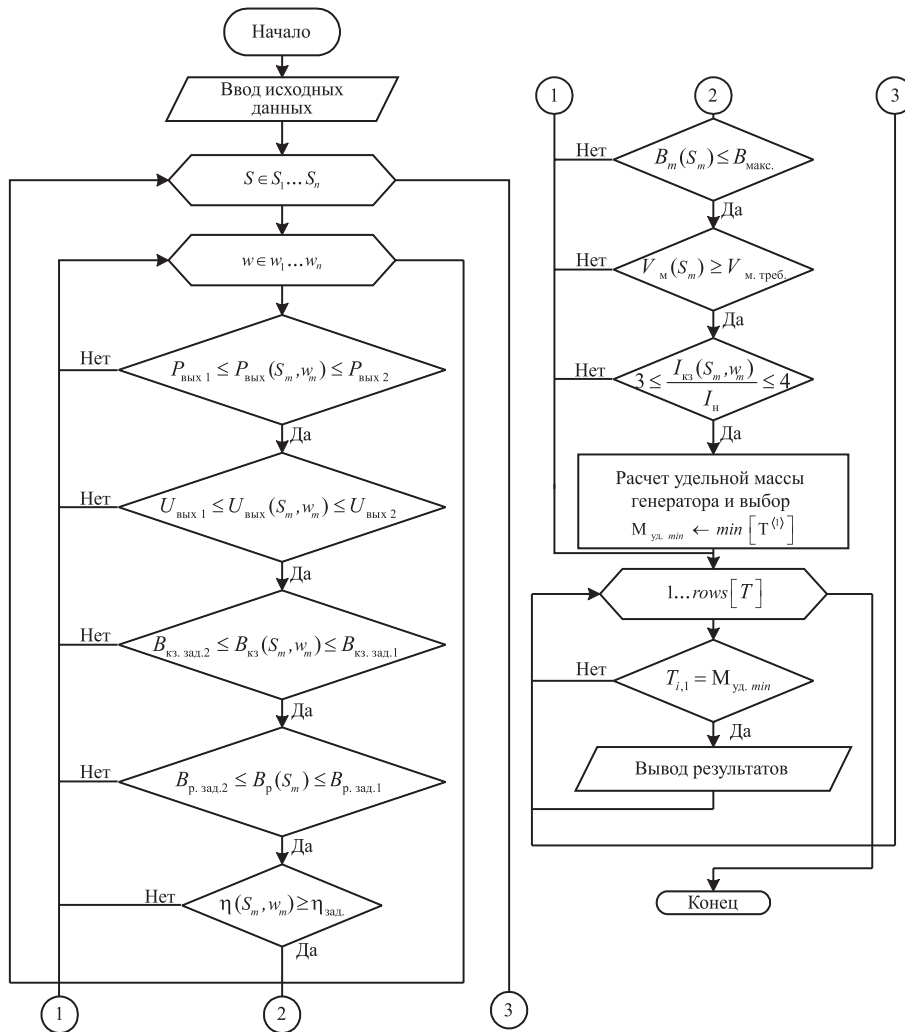


Рис. 5. Блок-схема алгоритма параметрического синтеза возвратно-поступательного электрического генератора по критерию «минимум удельной массы»

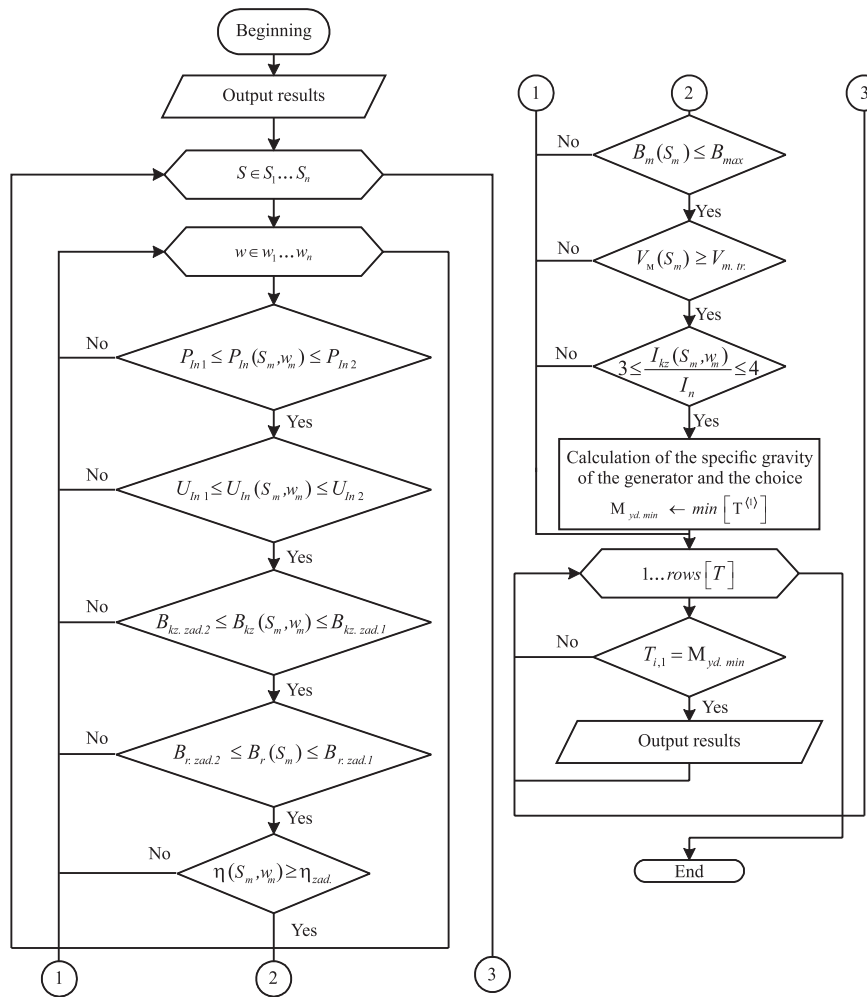


Fig. 5. Block diagram of the algorithm of parametric synthesis of a reciprocating electric generator according to the criterion of “minimum specific gravity”

В программной среде Mathcad 14.0 табл. 2 представляется в виде матриц: b – матрица ВПЭГ поперечного типа и q – матрица ВПЭГ продольного типа:

$$b = \begin{pmatrix} Y_1 & m_{\text{уд. ВПГ с Пр.МП}_1} & \eta_1 & P_{\Sigma\text{пот.1}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_n & m_{\text{уд. ВПГ с Пр.МП}_n} & \eta_n & P_{\Sigma\text{пот.n}} \end{pmatrix}, \quad q = \begin{pmatrix} X_1 & m_{\text{уд. ВПГ с ПМП}_1} & \eta_1 & P_{\Sigma\text{пот.1}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & m_{\text{уд. ВПГ с ПМП}_n} & \eta_n & P_{\Sigma\text{пот.n}} \end{pmatrix},$$

где $Y_1 \dots Y_n$ – активная мощность ВПЭГ поперечного типа, $X_1 \dots X_n$ – активная мощность ВПЭГ продольного типа, $P_{\Sigma\text{пот.}}$ – суммарные потери в рабочей обмотке и магнитопроводе ВПЭГ.

5. На основании области значений (табл. 2), полученных в процессе электромагнитного расчета и параметрического синтеза ВПЭГ продольного и поперечного типа, решается задача структурного синтеза комбинированного генератора. В процессе этого синтеза определяются оптимальное соотношение между активными мощностями ВПЭГ продольного (Y) и поперечного (X) типа и количество их модулей M и N , что обеспечивает минимум удельной массы синтезируемого комбинированного генератора с заданным КПД.

С учетом этого и [7] математическая запись целевой функции «удельная масса» для комбинированного генератора примет вид

$$\frac{NXm_{\text{уд. ВПЭГ с ПМП}} + MYm_{\text{уд. ВПЭГ с Пр.МП}}}{NX + MY} \rightarrow \min, \tag{3}$$

где $m_{уд.ВПЭГсПМП}$ – удельная масса ВПЭГ поперечного типа при активной мощности X ; $m_{уд.ВПЭГсПр.МП}$ – удельная масса ВПЭГ продольного типа при активной мощности Y ; N, M, X и Y – переменные.

С учетом возможной структуры комбинированного генератора возвратно-поступательного типа, системы ограничений были записаны в отчете о НИР № 3042/17 «Обоснование ТТТ для модернизации радиостанции Р-140-0,5 и Р-140-М» (Минск, 2017) в следующем виде:

для параллельно включенных генераторов:

$$\begin{cases} NX + MY = P_{зад.}; \\ \eta_{ВПЭГ с ПМП} \geq \eta_{зад.1}; \\ \eta_{ВПЭГ с Пр.МП} \geq \eta_{зад.2}. \end{cases}$$

для последовательно включенных генераторов:

$$\begin{cases} NX + MY = P_{зад.}; \\ \frac{P_{вых}}{P_{вых} + P_{\Sigma,потери. ВПЭГ с ПМП} + P_{\Sigma,потери. ВПЭГ с Пр.МП}} \geq \eta_{зад.} \end{cases}$$

Блок-схема алгоритма структурного синтеза комбинированного генератора по критерию «минимум удельной массы» представлена на рис. 6. Алгоритм реализован в программной среде Mathcad 14.0.

6. Уточнение геометрических размеров магнитной системы комбинированного генератора осуществляется посредством двумерной конечно-элементной модели ВПЭГ продольного и поперечного типа, построенных в программной среде ELCUT 5.1. В качестве примера рассмотрим двумерную конечно-элементную модель одноименнополюсного ВПЭГ продольного типа [7, рис. 1], которая представлена на рис. 7 при различном ходе подвижной части генератора.

Уточнение геометрических размеров магнитной системы генератора осуществляется посредством расчета интегральной физической величины – потокосцепления на один виток рабочей обмотки. Расчетное (на основе алгоритма, см. рис. 2) и экспериментальное (на основе двумерной конечно-элементной модели) средние значения потокосцепления на один виток рабочей обмотки

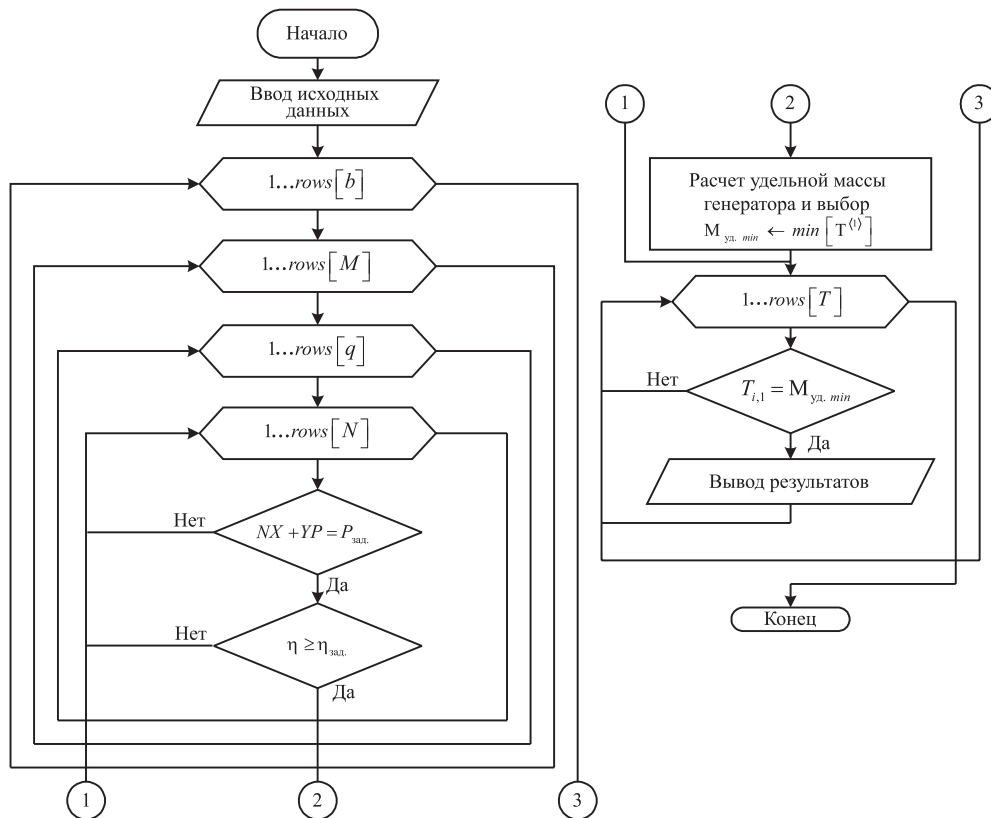


Рис. 6. Блок-схема алгоритма структурного синтеза комбинированного генератора возвратно-поступательного типа по критерию «минимум удельной массы»

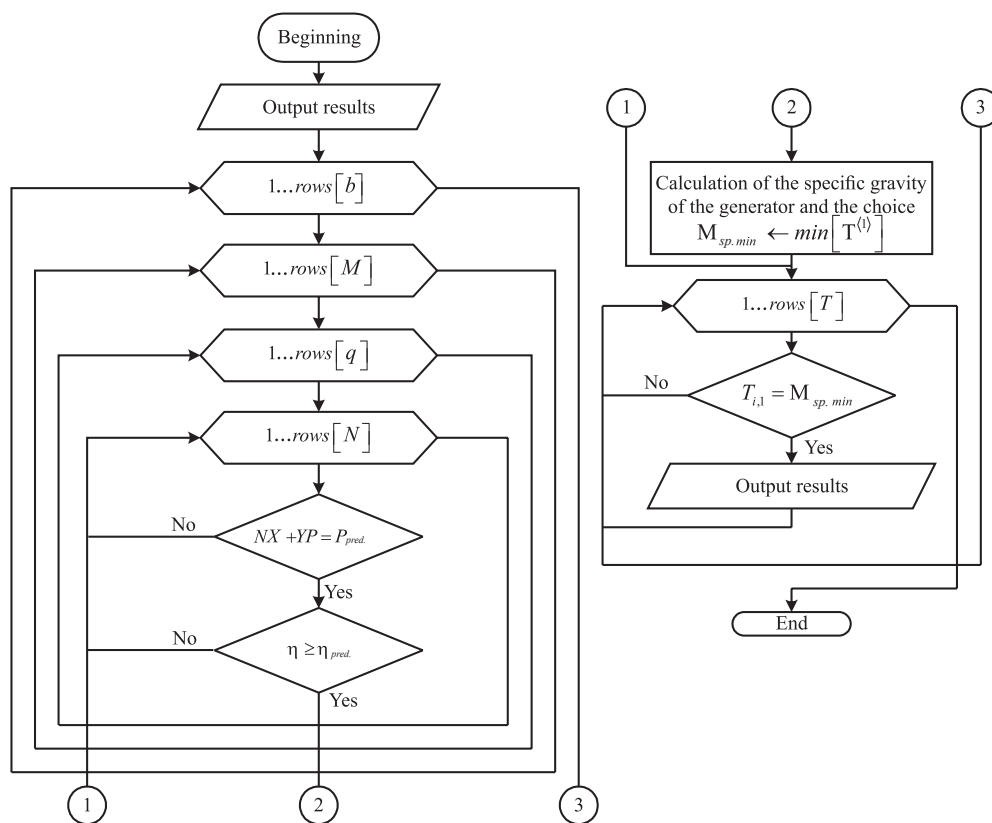


Fig. 6. Block diagram of the algorithm of structural synthesis of the combined generator of a reciprocating type according to the criterion of “minimum specific gravity”

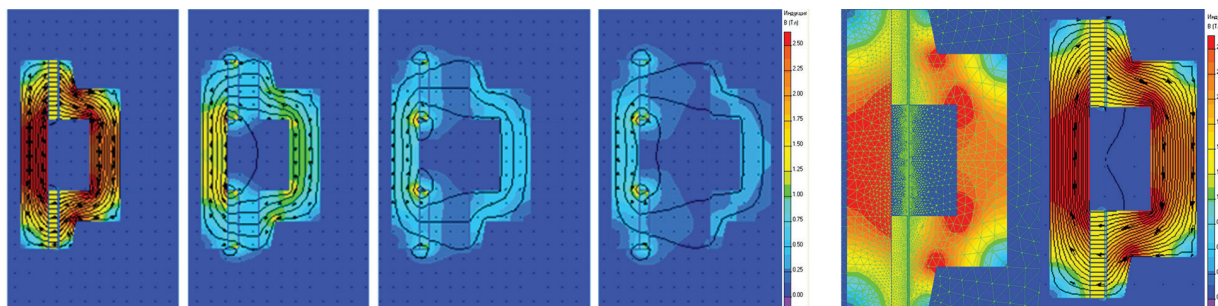


Рис. 7. Двумерная конечно-элементная модель одноименнополюсного ВПЭГ продольного типа

Fig. 7. Two-dimensional finite element model of same-name-pole reciprocating electric generator of longitudinal type

генератора соответственно равно $4,5 \cdot 10^{-3}$ Вб и $4,7 \cdot 10^{-3}$ Вб. Сравнение экспериментальных и расчетных значений показывает, что алгоритм (см. рис. 2) с достаточной точностью описывает последовательность расчетов электромагнитных процессов в генераторе. Погрешность расчетов связана с наличием в магнитной цепи генератора потоков рассеяния и выпучивания, учесть которые в полном объеме достаточно трудно.

Исследование распределения магнитного поля в магнитной системе одноименнополюсного ВПЭГ продольного типа на двумерной конечно-элементной модели, представленной на рис. 8, позволило выявить наиболее насыщенные участки магнитопровода, а также участки, характеризующиеся низкими значениями напряженности магнитного поля, обозначенные на рис. 8 цифрами 1 и 2 соответственно. С целью лучшего использования электротехнической стали магнитопровода уточнены геометрические размеры и форма зубцово-пазовой зоны магнитной системы генератора, что позволило уменьшить массу генератора на 7–10 % по сравнению с первоначальной конструкцией. Магнитная система одноименнополюсного ВПЭГ продольного типа после уточнения геометрических размеров представлена на рис. 9.

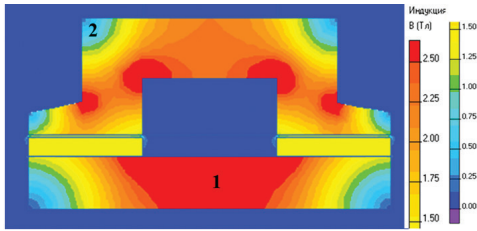


Рис. 8. Картина распределения магнитного поля одноименнополюсного ВПЭГ продольного типа
 Fig. 8. Pattern of distribution of the magnetic field of same-name-pole reciprocating electric generator of longitudinal type

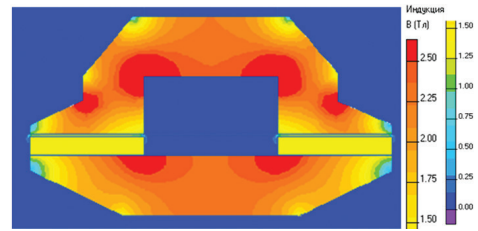


Рис. 9. Магнитная система одноименнополюсного ВПЭГ продольного типа после уточнения геометрических параметров
 Fig. 9. Magnetic system of same-name-pole reciprocating electric generator of longitudinal type after verification of geometrical parameters

В табл. 5 отражены результаты решения задачи структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора с параллельной схемой включения генераторов продольного и поперечного типа для энергоустановки на базе СПД. Исходные данные представлены в табл. 4 и на рис. 10. Полученная в результате синтеза модульная структура комбинированного генератора с параллельной схемой включения генераторов продольного и поперечного типа отражены на рис. 11.

Таблица 4. Исходные данные для структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора возвратно-поступательного типа

Table 4. Input data for structural-parametric synthesis of combined reciprocating generator

Наименование заданного параметра	Значение параметра
Рабочая частота СПД, Гц	100
Рабочий ход поршня СПД, мм	35
Потребляемая активная электрическая мощность, кВт	12
Номинальное напряжение, В	220
Коэффициент мощности	0,95–1
Перегрузка	2

Проведем сравнительную оценку по КПД и удельной массе энергоустановки на базе СПД и комбинированного генератора с современными зарубежными энергоустановками на базе СПД и ВПЭГ поперечного типа [14], а также двигателя внутреннего сгорания с кривошипно-шатунным механизмом и генератором вращательного типа [15, 16].

Выражение для расчета удельной массы энергоустановки имеет вид [7]

$$m_{уд. \text{ эу}} = ((1 \div 1,25)P_d m_{уд. д} + P_g m_{уд. г}) / P_g, \tag{4}$$

где P_d, P_g – номинальная мощность двигателя и генератора соответственно; $m_{уд.д}, m_{уд.г}$ – удельная масса двигателя и генератора соответственно.

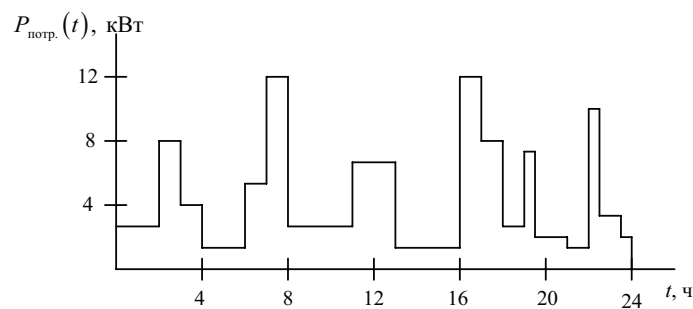


Рис. 10. График потребляемой нагрузки
 Fig. 10. Schedule of consumed load

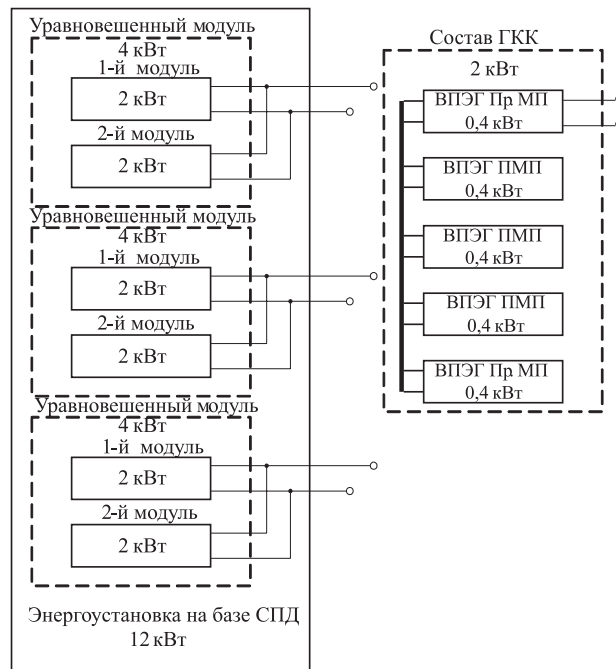


Рис. 11. Модульная структура синтезируемого комбинированного генератора с параллельной схемой включения

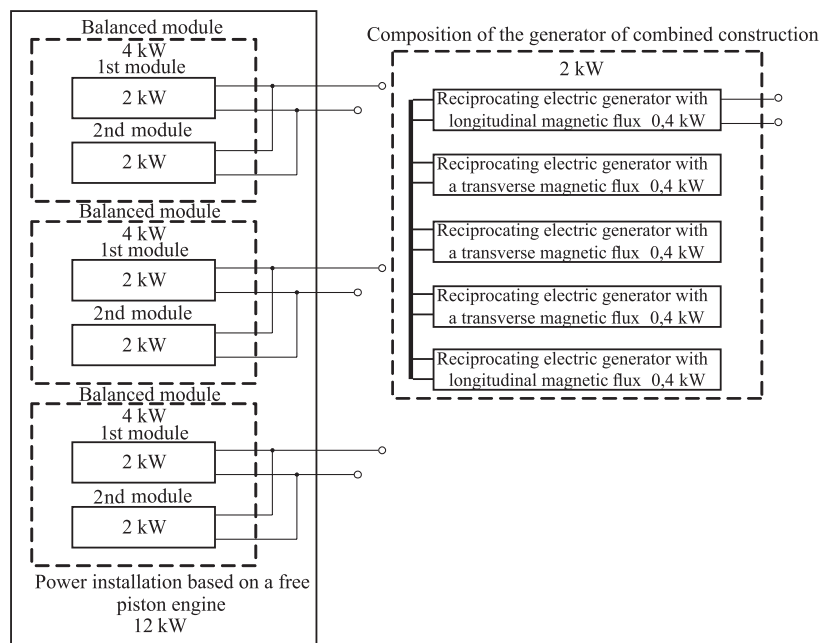


Fig. 11. Modular structure of the synthesized combined generator with parallel switching circuit

Общий КПД энергоустановки определяется по формуле [4]

$$\eta_o = \eta_d \eta_{эл.} 100 \%, \quad (5)$$

где η_d – КПД двигателя энергоустановки, $\eta_{эл.}$ – КПД электрогенератора.

С учетом результатов решения задачи структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора (табл. 5) и выражений (4) и (5) разность между КПД и отношение удельной массы составляют:

энергоустановки на базе комбинированного генератора и современных зарубежных энергоустановок на базе СПД и ВПЭГ поперечного типа

$$\eta_{\circ \text{ СПД с ГКК}} - \eta_{\circ \text{ СПД с ВПЭГ}} = 1,2 - 1,6 \%, \quad \frac{m_{\text{уд. эу. СПД с ВПЭГ}}}{m_{\text{уд. эу. СПД с ГКК}}} = 1,25 - 1,29;$$

энергоустановки на базе комбинированного генератора и современных зарубежных энергоустановок на базе двигателя внутреннего сгорания с кривошипно-шатунным механизмом и генератором вращательного типа

$$\eta_{\circ \text{ ДВС с КШМ}} - \eta_{\circ \text{ СПД с ВПЭГ}} = 8,5 - 18,5 \%, \quad \frac{m_{\text{уд. эу. ДВС с КШМ}}}{m_{\text{уд. эу. СПД с ГКК}}} = 1,29 - 4,6.$$

Таблица 5. Результаты решения задачи структурно-параметрического синтеза

Table 5. Results of solving the problem of structurally-parametric synthesis

Параметр	Тип ВПЭГ	
	продольный	поперечный
M, N	2	3
$P_{\text{вых.}}, \text{ кВт}$	0,8	1,2
$m_{\text{уд.}}, \text{ кг/кВт}$	1,7	1,65
<i>Комбинированный генератор</i>		
$P_{\text{вых.}}, \text{ кВт}$	2	
$m_{\text{уд.}}, \text{ кг/кВт}$	1,67	
$\eta, \%$	93,5	
<i>Уравновешенный модуль</i>		
$P_{\text{вых.}}, \text{ кВт}$	4	
$m_{\text{уд.}}, \text{ кг/кВт}$	1,67	
$\eta, \%$	93,5	
<i>Модульная структура</i>		
$P_{\text{вых.}}, \text{ кВт}$	12	
$m_{\text{уд.}}, \text{ кг/кВт}$	1,67	

Таким образом, применение в энергоустановках на базе СПД возвратно-поступательного генератора с комбинированным приращением магнитных потоков в разных магнитопроводах позволяет:

при повышении КПД на 1,2–1,6 % уменьшить удельную массу энергоустановки в 1,25–1,29 раза по сравнению с современными зарубежными энергоустановками на базе СПД и ВПЭГ поперечного типа;

при повышении КПД на 8,5–18,5 % уменьшить удельную массу энергоустановки в 1,29–4,6 раза по сравнению с современными зарубежными энергоустановками на базе двигателя внутреннего сгорания с кривошипно-шатунным механизмом и генератором вращательного типа.

Заключение. Полученные результаты дают основание утверждать, что разработанная методика структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора возвратно-поступательного типа для энергоустановки на базе СПД, отличающаяся использованием удельной массы комбинированного генератора в качестве целевой функции, позволяет синтезировать комбинированный генератор. Его применение в энергоустановке на базе СПД при повышении КПД до 1,6 % позволяет уменьшить удельную массу энергоустановки до 28,6 % по сравнению с современными аналогами (ВПЭГ поперечного типа); при повышении КПД до 18,5 % дает возможность уменьшить удельную массу энергоустановки не менее чем в 1,29 раза по сравнению с современными энергоустановками на базе ДВС с КШМ и генератором вращательного типа.

Список использованных источников

1. Отвага: военно-патриотический сайт Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.otvaga2004.ru/na-zemle/na-zemle-11/modern_land_robots_1/ – Дата доступа: 28.10.2017.
2. Пинский, Ф. И. Энергоустановки со свободнопоршневыми двигатель-генераторами / Ф. И. Пинский // Бортовая энергетика. – 2004. – № 2. – С. 13–17.
3. Cawthorne, W. R. Optimization of a Brushless Permanent Magnet Linear Alternator for Use with a Linear Internal Combustion Engine / W. R. Cawthorne. – Morgantown, 1999. – 113 p.
4. Темнов, Э. С. Разработка теоретических основ расчета и конструирования малоразмерных двигатель-генераторных установок как единой динамической системы: дис. ... канд. техн. наук / Э. С. Темнов. – Тула, 2005. – 134 л.
5. Использование возвратно-поступательной схемы электрического генератора для повышения эффективности энергоустановок автономных образцов вооружения / А. Б. Менжинский [и др.] // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2016. – № 4 (53). – С. 108–114.
6. Применение короткоходовой схемы возвратно-поступательного электрического генератора для повышения механического КПД и эффективной мощности энергоустановок на базе свободнопоршневых двигателей / А. Б. Менжинский [и др.] // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2017. – № 1 (54). – С. 101–108.
7. Применение возвратно-поступательного генератора комбинированной конструкции для повышения КПД и уменьшения удельной массы энергоустановок автономных образцов вооружения / А. Б. Менжинский [и др.] // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2017. – № 4 (57). – С. 62–72.
8. Хитерер, М. Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения / М. Я. Хитерер, И. Е. Овчинников. – СПб.: КОРОНА-принт, 2013. – 368 с.
9. Вольдек, А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – 2-е изд., испр. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
10. Балагуров, В. А. Проектирование специальных машин переменного тока / В. А. Балагуров. – М.: Высш. шк., 1982. – 272 с.
11. Балагуров, В. А. Электрические генераторы с постоянными магнитами / В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
12. Влияние исходных данных проектирования на оптимальные в симметричной двухкатушечной П-образной клапанной магнитной системе с цилиндрическими сердечниками и полюсными наконечниками / О. А. Никитина [и др.] // Вест. Чуваш. ун-та. – 2015. – № 1. – С. 81–90.
13. Абрамов, О. В. Методы и алгоритмы параметрического синтеза стохастических систем / О. В. Абрамов // Проблемы управления. – 2006. – № 4. – С. 3–8.
14. Линейный генератор с постоянными магнитами для систем электропитания автономных объектов / В. Е. Высоккий [и др.] // Изв. высш. учеб. заведений. Электромеханика. – 2010. – № 1 – С. 80–82.
15. Голубцов, С. Г. Электроснабжение узлов связи: учеб. пособие / С. Г. Голубцов, В. М. Калинин, Г. А. Леонович. – Минск: Воен. акад. Респ. Беларусь, 2016. – 176 с.
16. БМЕ-дизель [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.bme-diesel.ru. – Дата доступа: 19.01.2018.

References

1. Military-patriotic site of “Courage” of the Russian Federation. Available at: http://www.otvaga2004.ru/na-zemle/na-zemle-11/modern_land_robots_1/ (Accessed 28 October 2017) (in Russian).
2. Pinskiy F. I. Power plants with free piston engine generators. *Mobil'naya Tekhnika* [Mobile Technology], 2004, no. 2, pp. 13–17 (in Russian).
3. Cawthorne W. R. *Optimization of a Brushless Permanent Magnet Linear Alternator for Use with a Linear Internal Combustion Engine*. Morgantown, 1999. 113 p.
4. Temnov E. S. *Development of theoretical bases for the calculation and design of small-sized engine-generator sets as a single dynamic system*. Tula, 2005. 134 p. (in Russian).
5. Menzhinskii A. B., Malashin A. N., Kaleda A. E., Sidyako O. V. Using the reciprocating scheme of an electric generator to increase the efficiency of power plants of autonomous weapons. *Vestnik Voennoi akademii Respubliki Belarus' = Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus*, 2016, no. 4 (53), pp. 108–114 (in Russian).
6. Menzhinskii A. B., Malashin A. N., Kaleda A. E., Kolchin E. V. The use of a short-circuit scheme of a reciprocating electric generator to increase the mechanical efficiency and effective power of power plants based on free piston engines. *Vestnik Voennoi akademii Respubliki Belarus' = Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus*, 2017, no. 1 (54), pp. 101–108 (in Russian).
7. Menzhinskii A. B., Malashin A. N., Mityanov I. V. The use of a reciprocating generator of a combined design to increase the efficiency and reduce the specific weight of power plants of autonomous weapons. *Vestnik Voennoi akademii Respubliki Belarus' = Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus*, 2017, no. 4 (57), pp. 62–72 (in Russian).
8. Khiterer M. Ya., Ovchinnikov I. E. *Synchronous electric reciprocating machines*. Saint Petersburg, KORONA-print Publ., 2013. 368 p. (in Russian).
9. Vol'dek A. I. *Electric cars*. 2 ed. Leningrad, Energy Publ., 1974. 840 p. (in Russian).
10. Balagurov V. A. *Design of special machines for alternating current*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982. 272 p. (in Russian).
11. Balagurov V. A., Galteev F. F. *Elektricheskie generatory s postoyannymi magnitami*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 280 p. (in Russian).

12. Nikitina O. A., Petrov O. A., Russova N. V., Savin M. L., Svintsov G. P. Influence of initial design data on the optimal in a symmetrical two-coil P-shaped valve system with cylindrical cores and pole pieces. *Vestnik Chuvashskogo universiteta = Bulletin of the Chuvash University*, 2015, no. 1, pp. 81–90 (in Russian).

13. Abramov O. V. Methods and algorithms for the parametric synthesis of stochastic systems. *Problemy upravleniya*, 2006, no. 4, pp. 3–8 (in Russian).

14. Vysotskii V. E., Tarashev S. A., Sinitsin A. P. Linear generator with permanent magnets for power systems of autonomous objects. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*, 2010, no. 1, pp. 80–82 (in Russian).

15. Golubtsov S. G., Kalinin V. M., Leonovich G. A. *Power supply of communication centers*. Minsk, Military Academy of the Republic of Belarus Publ., 2016. 176 p. (in Russian).

16. *BME-dizel'*. Available at: www.bme-diesel.ru. (Accessed 19 January 2018) (in Russian).

Информация об авторах

Менжинский Андрей Борисович – адъюнкт (аспирант), кафедра электротехники и систем электропитания, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь). E-mail: volna05011990@mail.ru

Малашин Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры электротехники и систем электропитания, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь)

Information about the authors

Andrei B. Menzhinsky – Postgraduate Student, Chair of electrical equipment and power supply systems, Military Academy of Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volna05011990@mail.ru

Andrey N. Malashin – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Professor of the Chair of electrical equipment and power supply systems, Military Academy of Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus).

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKING

УДК 621.382
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-244-249>

Поступила в редакцию 30.11.2017
Received 30.11.2017

**В. Б. Оджаев¹, А. К. Панфиленко², А. Н. Петлицкий², В. С. Просолович¹,
С. В. Шведов², В. А. Филипеня², В. Ю. Явид¹, Ю. Н. Янковский¹**

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

²Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
Минск, Беларусь

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ БИПОЛЯРНОГО $n-p-n$ -ТРАНЗИСТОРА**

Аннотация. Загрязнение монокристаллического кремния технологическими примесями в процессе изготовления приборов оказывает существенное влияние на электрофизические характеристики биполярных $n-p-n$ -транзисторов. Выявление причин лабильной воспроизводимости основных характеристик биполярных планарных $n-p-n$ -транзисторов является актуальным с целью установления факторов, определяющих надежность и стабильность эксплуатационных параметров интегральных микросхем.

Исследованы вольт-амперные характеристики различных партий биполярных $n-p-n$ -транзисторов, изготовленных по эпитаксиально-планарной технологии по аналогичным технологическим маршрутам, при идентичных используемых технологических материалах, однако в различное время.

Установлено, что электрофизические характеристики биполярных $n-p-n$ -транзисторов существенным образом зависят от содержания технологических примесей в материале подложки. Наличие высокой концентрации генерационно-рекомбинационных центров, связанных с металлическими примесями, приводит как к увеличению обратного тока через переход коллектор–база транзисторов, так и к существенному снижению напряжения пробоя коллекторного перехода. Наиболее вероятной причиной ухудшения электрофизических параметров биполярных $n-p-n$ -транзисторов является загрязнение материала технологическими примесями (такими, как Fe, Cl, Ca, Cu, Zn и др.) во время производственного процесса изготовления приборов. Источниками загрязнений могут служить как детали и узлы технологических установок, так и используемые материалы и реактивы.

Ключевые слова: вольт-амперные характеристики, обратный ток $p-n$ -перехода, напряжение пробоя $p-n$ -перехода, биполярный транзистор, технологические примеси

Для цитирования. Влияние технологических примесей на вольт-амперные характеристики биполярного $n-p-n$ -транзистора / В. Б. Оджаев [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 2. – С. 244–249. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-244-249>

**V. B. Odzhaev¹, A. K. Panfilenko², A. N. Pyatlitski², V. S. Prosolovich¹, S. V. Shvedau²,
V. A. Filipenya², V. Yu. Yavid¹, Yu. N. Yankovsky¹**

¹Belarusian State University, Minsk, Belarus

²JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company, Minsk, Belarus

**INVESTIGATION OF INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL IMPURITIES
ON THE I–V CHARACTERISTICS OF THE BIPOLAR $n-p-n$ -TRANSISTOR**

Abstract. Contamination of the monocrystal silicon with technological impurities in the devices fabrication process exerts a considerable influence on the electro-physical characteristics of the bipolar $n-p-n$ -transistors. Revelation of the causes of the labile reproducibility of the basic characteristics of the bipolar planar $n-p-n$ -transistors is vital for the purpose of establishing the factors, determining reliability and stability of the operational parameters of the integrated circuits.

There were investigated I–V characteristics of the various lots of the bipolar $n-p-n$ -transistors, fabricated under the epitaxial-planar technology as per the similar process charts with the identical used technological materials, however, at different times.

It is established that the electro-physical characteristics of the bipolar $n-p-n$ -transistors substantially depend on the contents of the technological impurities in the substrate material. Availability of the high concentration of the generation-

recombination centers, related to the metallic impurities, results both in increase of the reverse current of the collector – base junction of the transistors and the significant reduction of the breakdown voltage of the collector junction. The most probable cause of deterioration of the electro-physical parameters of the bipolar $n-p-n$ -transistors is the material contamination with the technological impurities (such, as Fe, Cl, Ca, Cu, Zn and others) during the production process of the devices fabrication. The sources of impurity may be both the components and sub-assemblies of the technological units and the materials and reagents under usage.

Key words: I–V characteristics, reverse current of the $p-n$ -junction, breakdown voltage of the $p-n$ -junction, bipolar transistor, technological impurities

For citation. Odzhaev V. B., Panfilenko A. K., Pyatlitski A. N., Prosolovich V. S., Shvedau S. V., Filipenya V. A., Yavid V. Yu., Yankovsky Yu. N. Investigation of influence of technological impurities on the I–V characteristics of the bipolar $n-p-n$ -transistor. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 2, pp. 244–249 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-244-249>

Введение. Повышенное содержание в монокристаллическом кремнии технологических примесей (Fe, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Cu, Zn и др.) оказывает существенное влияние как на качество подзатворного диэлектрика, так и на электрофизические характеристики МОП-транзисторов в процессе изготовления приборов [1]. В то же время одним из наиболее важных полупроводниковых приборов является биполярный транзистор, который используется в электронике в качестве дискретного активного элемента и в интегральных схемах. В настоящее время при создании приборов по планарной технологии применяется метод ионной имплантации с последующей термообработкой. При этом вблизи $p-n$ -переходов в областях обеднения барьерных структур происходит аккумуляция генерационно-рекомбинационных центров (ГРЦ), которая возникает в результате миграции и активации технологических примесей вследствие формирования остаточных протяженных нарушений типа стержнеобразных дефектов $\{113\}$, дефектов упаковки и дислокационных петель. Эти структурные нарушения имеют междоузельную природу и обладают глубокими энергетическими уровнями в запрещенной зоне кремния, что в значительной степени влияет на генерационно-рекомбинационные процессы, ухудшает эксплуатационные параметры полупроводниковых приборов и интегральных микросхем и приводит к снижению процента выхода годных приборов микроэлектроники [2]. В связи со сказанным актуальным является выявление причин лабильной воспроизводимости основных характеристик биполярных планарных $n-p-n$ -транзисторов с целью выявления физических факторов, определяющих надежность и стабильность эксплуатационных параметров полупроводниковых приборов.

Объекты и методы исследований. Нами были проведены исследования биполярных $n-p-n$ -транзисторов в интегральных схемах, сформированных ионным легированием (серии *A* и *B*) по аналогичным технологическим маршрутам с использованием идентичных материалов с помощью метода измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ), однако в различное время. Представленные результаты получены на измерителе параметров полупроводниковых приборов Agilent B 1500A с применением зондовой станции Cascade Summit 11000 (минимальный измеряемый ток $\sim 10^{-15}$ А) в интервале температур от -60 до 120 °С. Легированные слои создавались в пластинах кремния p -типа проводимости с удельным сопротивлением 10 Ом \cdot см ионной имплантацией бора при формировании p -слоя, фосфора – при формировании n -слоя. Содержание технологических примесей на поверхности пластин кремния исследовалось методом полного внешнего отражения рентгеновского излучения на установке Rigaku TXRF 3750 [3].

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Установлено, что обратный ток через $p-n$ -переход коллектор–база транзисторов из партии *A* более чем на порядок ниже значений тока для приборов из партии *B* (рис. 1). Напряжение пробоя коллекторного перехода транзисторов из партии *A* почти на 15 В выше, чем из партии *B*. Полный обратный ток для резкого $p-n$ -перехода можно приблизительно представить суммой диффузионного тока в нейтральной области и генерационного тока в обедненной области [4]:

$$I_R = q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p} \frac{n_i^2}{N_d}} + \frac{qn_i W}{\tau_e}, \quad (1)$$

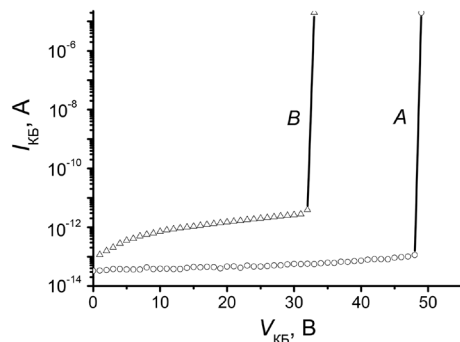


Рис. 1. Обратные вольт-амперные характеристики коллекторных переходов $n-p-n$ -транзисторов при $T = 20^\circ\text{C}$ партий A и B
 Fig.1 The reverse current-voltage characteristics of collector junction of $n-p-n$ -transistors at $T = 20^\circ\text{C}$ parties A and B

где D_p – коэффициент диффузии дырок, N_d – концентрация доноров, τ_p – время жизни дырок, τ_e – эффективное время жизни носителей заряда, определяемое скоростью генерации электронно-дырочных пар (U) в обедненной области $p-n$ -перехода толщиной W .

В широкозонных полупроводниках с низкой концентрацией собственных носителей заряда n_i (таких, как кремний) и большой концентрацией ГРЦ (низкое значение τ_e) при комнатной температуре преобладает генерационный ток ($I_{\text{ген}}$):

$$I_{\text{ген}} = \int_0^W q|U|dx \approx q|U|W = \frac{qn_iW}{\tau_e}, \quad (2)$$

$$I_{\text{ген}} \sim \frac{1}{\tau_e}; I_{\text{ген}} \sim W \sim (V_{bi} + V)^{1/2},$$

где V_{bi} – контактная разность потенциалов. Таким образом, при заданной температуре следует ожидать для резкого $p-n$ -перехода степенную зависимость $I_{\text{ген}}$ от приложенного напряжения с показателем степени 0,5.

При построении ВАХ в двойном логарифмическом масштабе (рис. 2) наблюдается наличие двух областей для ВАХ $p-n$ -переходов при обратном смещении. Для приборов из партии A (рис. 2, a) при напряжении меньше 10 В ток коллектора (I_{KB}) практически не зависит от приложенного напряжения, что свидетельствует о преобладании в I_{KB} диффузионной составляющей. Это обусловлено как низкой концентрацией ГРЦ в исходном материале, так и малой скоростью возникновения данных центров в процессе формирования $p-n$ -структур. Для партии B (рис. 2, b) в этом интервале напряжений имеет место степенная зависимость тока от напряжения $I \sim V^n$, что характерно для обратной ВАХ $p-n$ -перехода, в области пространственного заряда которого преобладает генерация электронно-дырочных пар [5]. Однако в отличие от значения показателя степени $n = 0,5$ в классическом выражении в соответствии с (2), в нашем случае экспериментально получено значение показателя $n = 1$.

Данное отличие может иметь целый ряд причин, среди которых, прежде всего, следует выделить высокую концентрацию ГРЦ и их неравномерное распределение по объему кристалла. Кроме того, как было ранее установлено [6], эти центры могут входить в состав протяженных дефектов, дислокаций или областей скопления, которые формируются в процессе создания приборов.

Следует отметить, что высокие значения $n (\geq 0,5)$ наблюдались ранее в приборах, изготовленных по стандартной технологии, и характерны для диодов с дислокациями в области $p-n$ -перехода [6]. Дислокации заметно увеличивают токи утечки $p-n$ -перехода, что особенно губи-

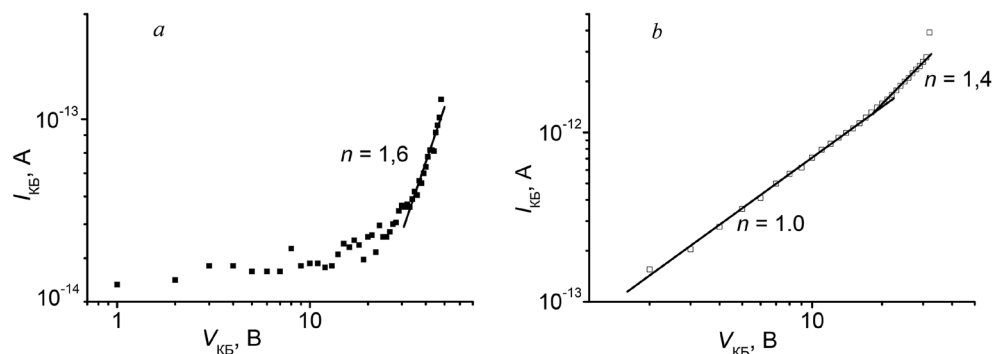


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики коллекторного $n-p-n$ -перехода при обратном смещении для партий A (a) и B (b)

Fig. 2. The reverse current-voltage characteristics of collector junction of $n-p-n$ -transistors for the batch A (a) and B (b)

тельно для приборов при наличии дислокаций и примесей металлов с большими коэффициентами диффузии. В p – n -переходах, сформированных на кремнии, при декорировании дислокаций металлическими примесями наблюдалось увеличение токов утечки вплоть до короткого замыкания p – n -перехода [6].

В настоящее время существует лишь качественное объяснение результатов экспериментов, в которых наблюдалось увеличение токов утечки. Это явление связывается авторами [6] с образованием по дислокациям «мостиков» повышенной проводимости через область пространственного заряда p – n -перехода. Данная интерпретация опирается на известный факт осаждения примесей на дислокациях с формированием атмосфер Коттрелла. Оценки авторами [7] величины сопротивления этих «мостиков» дают значения от нескольких Ом до 20 МОм. Наиболее распространенное объяснение влияния дислокаций на токи утечки основывается на исследованиях, в которых показано, что дислокация в кремнии n -типа ведет себя как цепочка акцепторов, а в p -кремнии – как цепочка доноров. Поэтому исходя из условий электронейтральности дислокация должна образовывать вокруг себя трубку повышенной концентрации основных носителей заряда [6].

При напряжении на коллекторе выше 10–12 В для всех образцов в предпробойной области ВАХ наблюдается сверхлинейная зависимость ($n = 1,4$ – $1,6$) тока от напряжения.

Описанные состояния могут быть связаны с присутствием как в объеме кремниевых подложек, так и адсорбированными на их поверхности ионами щелочных (Na^+ , K^+ , Li^+) и тяжелых металлов, а также ионами H_3O^+ , кислородными вакансиями, полярными молекулами, попадающими из окружающей среды и материалов, используемых в технологическом процессе. С учетом этого нами было проведено изучение распределения по поверхности пластин различных технологических примесей. Исследования содержания различных примесей на поверхности пластин методом полного внешнего отражения рентгеновского излучения показали, что вся поверхность пластин из серии *B* покрыта слоем Fe со средней концентрацией $3,4 \cdot 10^{11}$ ат/см². Наблюдаются также пятна Cl, K, Ca, Ti, Cr, Cu, Zn. Топограммы распределения технологических примесей по поверхности пластин, на которых были изготовлены приборы серии *B*, представлены на рис. 3.

Расчет на основе полученных экспериментальных данных показывает, что если поверхностную концентрацию железа $3,4 \cdot 10^{11}$ ат/см² распределить по объему пластины, то средняя объемная концентрация железа составит $1,2 \cdot 10^{13}$ ат/см³. Такая высокая объемная концентрация технологической примеси железа оказывает существенное воздействие на генерационно-рекомбинационные процессы в биполярных транзисторах. На пластинах серии *A* наблюдаются только пятна Cl по периферии пластины. Содержание всех остальных примесей было ниже предела обнаружения (по Fe $< 4,0 \cdot 10^9$ ат/см²).

Таким образом, наблюдаемое превышение величины обратного тока (I_R) через коллекторный переход в приборах из партии *B* над приборами из партии *A* однозначно связано с более высокими значениями концентрации ГРЦ в структурах из партии *B*. Данные центры возникают или активируются в процессе создания полупроводниковых приборов, например при ионной имплантации или термическом воздействии. Другая возможная причина их проявления может состоять в значительном содержании в исходном монокристаллическом кремнии остаточных технологических примесей. Однако использовавшиеся в экспериментах пластины монокристаллического кремния были изготовлены из материала, который выращивался с соблюдением соответствующих стандартов, и содержание в нем

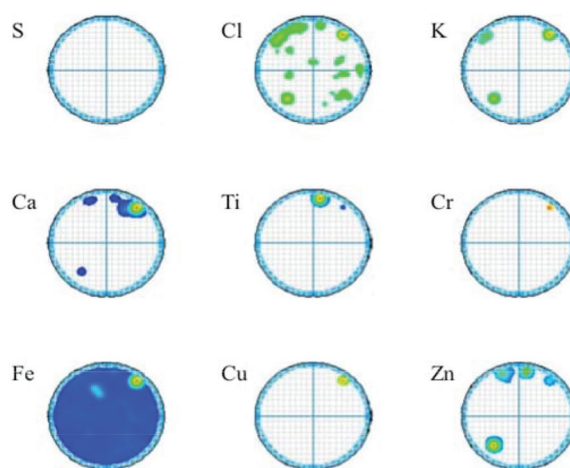


Рис. 3. Распределение технологических примесей по поверхности исходных кремниевых пластин, на которых были изготовлены приборы серии *B*

Fig. 3. The distribution of technological impurities on the surface of the original silicon wafers, which were made instruments of the series *B*

технологических примесей было строго регламентировано. Данное обстоятельство позволяет однозначно заключить, что формирование ГРЦ в приборах из серии *B* происходит вследствие адсорбции и последующей диффузии вглубь кремниевых подложек технологических примесей из промышленного оборудования и/или окружающей среды в процессе изготовления полупроводниковых приборов. Основными источниками загрязнений могут служить как детали и узлы технологических установок, так и используемые материалы и реактивы.

Заключение. Установлено, что электрофизические характеристики биполярных *n-p-n*-транзисторов существенным образом зависят от содержания технологических примесей в материале подложки. Наличие высокой концентрации ГРЦ, связанных с металлическими примесями, приводит как к увеличению обратного тока через переход коллектор–база транзисторов, так и к существенному снижению напряжения пробоя коллекторного перехода. Наиболее вероятной причиной ухудшения электрофизических параметров биполярных *n-p-n*-транзисторов является загрязнение материала технологическими примесями (такими, как Fe, Cl, Ca, Cu, Zn и др.) во время производственного процесса изготовления приборов. Источниками загрязнений могут служить как детали и узлы технологических установок, так и используемые материалы и реактивы.

Список использованных источников

1. Влияние технологических примесей на электрофизические параметры МОП-транзистора / В. Б. Оджаев [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2014. – № 4. – С. 14–17.
2. Челябинский, А. Р. Дефектно-примесная инженерия в имплантированном кремнии / А. Р. Челябинский, Ф. Ф. Комаров // Успехи физ. наук. – 2003. – Т. 173, № 8. – С. 813–846. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0173.200308b.0813>
3. Surface analysis for Si-Wafers using total reflection X-ray fluorescence analysis / W. Berneike [et al.] // Fresenius Z. Anal. Chem. – 1989. – Vol. 333, iss. 4–5. – P. 524–526. <https://doi.org/10.1007/BF00572369>
4. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 кн. / С. Зи. – М.: Мир, 1984. – Кн. 1. – 456 с.
5. Improved device performance by multistep or carbon co-implants / R. Liefing [et al.] // IEEE Trans. Electron Devices. – 1994. – Vol. 41, iss. 1. – P. 50–55. <https://doi.org/10.1109/16.259619>
6. Сорокин, Ю. Г. Влияние дислокаций на электрические параметры *p-n*-переходов / Ю. Г. Сорокин // Труды ВЭИ. – М.: Энергия, 1980. – Вып. 90. – С. 91–101.
7. Plantinga, G. H. Effect dislocations on the transistors parameters fabricated by shallow diffusion / G. H. Plantinga // IEEE Trans. Electron Devices. – 1969. – Vol. 16, № 4. – P. 394–400. <https://doi.org/10.1109/t-ed.1969.16763>

References

1. Odzhaev V. B., Petlitskii A. N., Prosolovich V. S., Turtsevich A. S., Shvedov S. V., Filipenya V. A., Chernyi V. V., Yavid V. Yu., Yankovskii Yu. N., Dubrovskii V. A. The influence of technological impurities on the electrophysical parameters of a MOS transistor. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2014, no. 4, pp. 14–17 (in Russian).
2. Chelyadinskii A. R., Komarov F. F. Defect-impurity engineering in implanted silicon. *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*, 2003, vol. 46, pp. 789–820. <https://doi.org/10.1070/PU2003v046n08ABEH001371>
3. Berneike W., Knoth J., Schwenke H., Weisbrod U., Fresenius Z. Surface analysis for Si-Wafers using total reflection X-ray fluorescence analysis. *Fresenius Zeitschrift für Analytische Chemie*, 1989, vol. 333, iss. 4–5, pp. 524–526. <https://doi.org/10.1007/BF00572369>
4. Sze S. M. *Physics of Semiconductor Devices*. New Jersey, John Wiley & Sons, 1969. 812 p.
5. Liefing R., Wijburg R., Custer J. C., Wallinga H., Saris F. W. Improved device performance by multistep or carbon co-implants. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1994, vol. 41, iss. 1, pp. 50–55. <https://doi.org/10.1109/16.259619>
6. Sorokin Yu. G. The influence of dislocations on the electrical parameters of p-n junctions. *Trudy Vserossiiskogo elektrotekhnicheskogo instituta [Proceedings of the All-Union Electrotechnical Institute]*. Moscow, Energiya Publ., 1980, iss. 90, pp. 91–101 (in Russian).
7. Plantinga G. H. Effect dislocations on the transistors parameters fabricated by shallow diffusion. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1969, vol. 16, iss. 4, pp. 394–400. <https://doi.org/10.1109/t-ed.1969.16763>

Информация об авторах

Оджаев Владимир Борисович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: odzhaev@bsu.by

Панфиленко Анатолий Кузьмич – главный инженер, ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга

Information about the authors

Vladimir B. Odzhaev – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: odzhaev@bsu.by

Anatoliy K. Panfilenko – Chief Engineer, JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company (121a, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: office@integral.by

«ИНТЕГРАЛ» (ул. Казинца, 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: office@integral.by

Петлицкий Александр Николаевич – кандидат физико-математических наук, директор центра, ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ул. Казинца, 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: petan@tut.by

Просолович Владислав Савельевич – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: prosolovich@bsu.by

Шведов Сергей Васильевич – директор филиала, ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ул. Казинца, 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: office@bms.by

Филипеня Виктор Анатольевич – ведущий инженер, ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ул. Казинца, 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: office@integral.by

Явид Валентин Юльянович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: yavid@bsu.by

Янковский Юрий Николаевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: yankouski@bsu.by

Alyaxandr N. Pyatlitski – Ph. D. (Physics and Mathematics), Director of the Center, JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company (121а, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: petan@tut.by

Vladislav S. Prosolovich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Head of the Laboratory, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: prosolovich@bsu.by

Sergey V. Shvedau – Director of Design Center, JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company (121а, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: office@bms.by

Victor A. Filipenya – Leading Engineer, JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company (121а, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: office@bms.by

Valentin Yu. Yavid – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yavid@bsu.by

Yury N. Yankovsky – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yankouski@bsu.by

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
УДК 550.837.75:553.98
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-250-256>

Поступила в редакцию 15.12.2016
Received 15.12.2016

В. Ф. Янушкевич, К. И. Иванова, М. М. Иванов

Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН С АНИЗОТРОПНЫМИ СРЕДАМИ НАД УГЛЕВОДОРОДНЫМИ ЗАЛЕЖАМИ В РЕЖИМЕ ВИДЕОИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

Аннотация. Приводится моделирование взаимодействия электромагнитных волн в режиме видеоимпульсных сигналов со средой над углеводородными залежами. Осуществлен анализ спектров отраженных видеоимпульсных сигналов от среды над углеводородами. Исследование распространения радиоволн над углеводородами проводится в рамках квазигидродинамического приближения. Выбор частот видеоимпульсных сигналов обусловлен определением характеристик сред над залежами на больших глубинах по сравнению поверхностью Земли. Спектр отраженных сигналов от анизотропной среды над углеводородной залежью в режиме видеоимпульсных сигналов может быть использован для определения электродинамических характеристик среды над залежью в широком диапазоне частот зондируемых сигналов, диэлектрических проницаемостей и удельных проводимостей сред. Возможность перестройки устройства георазведки с одного режима на другой (регулировка длительности импульса) при наличии залежи дополняет функциональные возможности для поиска углеводородных залежей. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородов могут быть усовершенствованы за счет получения информации об объектах по нескольким информационным каналам, что позволяет с достаточно высоким уровнем достоверности выделять их границы на фоне подстилающей среды. Определены глубины залегания, разрешающая способность в исследуемом диапазоне частот. Результаты исследований могут быть использованы для разработки новых электромагнитных методов поиска углеводородных залежей.

Ключевые слова: видеоимпульсный сигнал, анизотропная среда, углеводородная залежь, длительность импульса

Для цитирования. Янушкевич, В. Ф. Моделирование взаимодействия электромагнитных волн с анизотропными средами над углеводородными залежами в режиме видеоимпульсных сигналов / В. Ф. Янушкевич, К. И. Иванова, М. М. Иванов // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 2. – С. 250–256. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-250-256>

V. F. Yanyshkevich, K. I. Ivanova, M. M. Ivanov

Polotsk State University, Novopolotsk, Belarus

SIMULATION OF INTERACTION OF ELECTROMAGNETIC WAVES WITH ANISOTROPIC MEDIA UNDER HYDROCARBON DEPOSITS IN THE MODE OF VIDEO-PULSE SIGNALS

Abstract. The article presents the simulation of the interaction of electromagnetic waves in the mode of video pulse signals with the medium over hydrocarbon deposits. The analysis of the spectra of reflected video pulse signals from the medium over hydrocarbons is carried out. A study of the propagation of radio waves over hydrocarbons is carried out within the framework of a quasihydrodynamic approximation. The choice of the frequencies of video pulse signals is due to the determination of media characteristics over deposits at great depths compared to the surface of the earth. The spectrum of reflected signals from an anisotropic medium above a hydrocarbon deposit in the mode of video pulse signals can be used to determine the electrodynamic characteristics of the medium over the deposit over a wide range of frequencies of probed signals, dielectric permittivities and conductivity of media. The ability to reconfigure a geo-prospecting device from one mode to another (pulse width adjustment) in the presence of a deposit complements the functionality to search for hydrocarbon deposits. Electromagnetic methods for the search for and identification of hydrocarbons can be improved by obtaining information about objects through several information channels, which allows them to be identified with a sufficiently high level of reliability on the background of the underlying environment. The depths of occurrence, the resolving power in the investigated frequency range are determined. The results of the research can be used to develop new electromagnetic methods for the search for hydrocarbon deposits.

Keywords: pulse signal, anisotropic medium, a hydrocarbon reservoir, pulse width

For citation. Yanyshkevich V. F., Ivanova K. I., Ivanov M. M. Simulation of interaction of electromagnetic waves with anisotropic media under hydrocarbon deposits in the mode of video-pulse signals. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 2, pp. 250–256 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-250-256>

Введение. Вопросы поиска, выделения и оконтуривания анизотропных сред плазмоподобного типа представляют интерес во многих областях науки и техники. Одним из приоритетных направлений является георазведка углеводородных залежей (УВЗ). Подобие многих процессов, происходящих над месторождениями нефти и газа, со свойствами анизотропных сред (АС) позволяет использовать теоретические и практические наработки в области исследования плазмы и плазмоподобных сред при разработке современных электромагнитных методов (ЭММ) георазведки углеводородов [1].

Результаты анализа взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с УВЗ и его экспериментального исследования представлены во многих работах, например [2–5]. Вместе с тем для реализации новых ЭММ представляет теоретический и практический интерес анализ процесса взаимодействия импульсных ЭМВ с АС, образующимися над залежами и скоплениями углеводородов [6–9].

Исследование распространения радиоволн (РРВ) над УВЗ проводится в рамках квазигидродинамического приближения, так как учет постоянного магнитного поля, взаимодействия частиц в широких пределах изменения параметров АС делает весьма громоздким последующий анализ взаимодействия со средой на основе кинетического и гидродинамического рассмотрения [5, 10].

Цель работы заключается в обосновании выбора характеристик ЭМВ для разработки методов и аппаратурных средств при видеоимпульсном взаимодействии со средой над УВЗ для качественного повышения уровня достоверности поиска и выделения залежей углеводородов.

Объекты и методы исследования. Модель многослойной среды включает слой 2 толщиной h с плоскими границами раздела, имеющий относительную диэлектрическую проницаемость ϵ_2 , расположенный между полубесконечными средами 1 и 3 с относительными диэлектрическими проницаемостями $\epsilon_1 = 1$ и ϵ_3 (рис. 1).

Спектр зондирующего видеоимпульса (рис. 2) рассчитывается по формуле

$$S(f) = \frac{\sin(\pi f \tau_{\text{и}})}{\pi f \tau_{\text{и}}}, \quad (1)$$

где $\tau_{\text{и}}$ – длительность импульса, f – частота.

Спектр отраженного видеоимпульса от нижней границы слоя h определяется выражением

$$\dot{S}_{\text{отр}} = (1 - \dot{R}_{1-2})^2 \dot{R}_{2-3} e^{-2\alpha_2 h} \dot{S}(f). \quad (2)$$

Примем амплитуду нормально падающей ЭМВ за условную единицу $\dot{E}_{\text{П}} = 1$. На практике же значение напряженности поля будет определяться реализуемой радиотехнической системой для поиска, к которой предъявляются требования при решении конкретной геоинформационной задачи.

С учетом принятого значения падающей ЭМВ комплексная амплитуда волны, отраженной от границы сред 1–2, определяется коэффициентом отражения от верхней границы \dot{R}_{1-2} как [11]

$$\dot{E}_{1-2} = \dot{E}_n \dot{R}_{1-2} = \dot{R}_{1-2}, \quad (3)$$

а коэффициент отражения – волновыми сопротивлениями сопряженных сред:

$$\dot{R}_{1-2} = \frac{\dot{Z}_{\text{вх}} - \dot{Z}_1}{\dot{Z}_{\text{вх}} + \dot{Z}_1}, \quad (4)$$

где $\dot{Z}_1 = 377 \text{ Ом}$ – волновое сопротивление воздуха (среды 1).

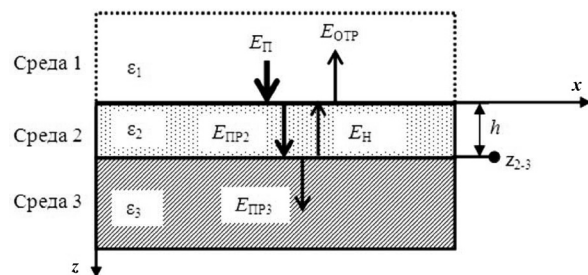


Рис. 1. Отражения электромагнитной волны в фрагменте слоистой среды

Fig. 1. Reflections of an electromagnetic wave in layered media fragment

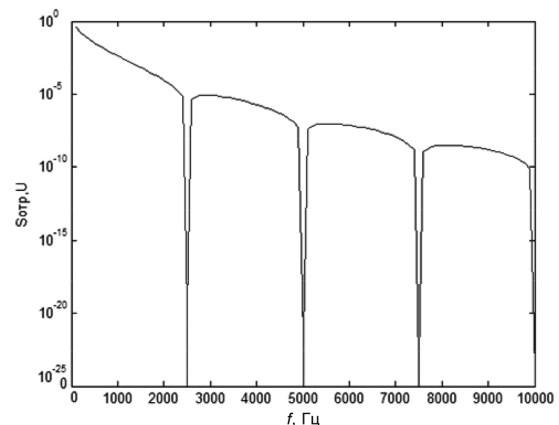


Рис. 2. Спектр зондирующего видеоимпульса

Fig. 2. Spectrum of sounding video impulse

Коэффициент отражения от 3-го слоя равен

$$\dot{R}_{2-3} = \frac{\dot{Z}_3 - \dot{Z}_2}{\dot{Z}_3 + \dot{Z}_2}, \quad (5)$$

где \dot{Z}_2 – волновое сопротивление 2-го слоя, \dot{Z}_3 – волновое сопротивление 3-го слоя.

Входной импеданс на верхней границе 2-го слоя представим как

$$\dot{Z}_{\text{вх}} = \frac{(\dot{Z}_3 + \dot{Z}_2) + (\dot{Z}_3 - \dot{Z}_2)e^{-2\dot{\gamma}_2 h}}{(\dot{Z}_3 + \dot{Z}_2) - (\dot{Z}_3 - \dot{Z}_2)e^{-2\dot{\gamma}_2 h}} \dot{Z}_2, \quad (6)$$

где $\dot{\gamma}_2$ – постоянная распространения волны во 2-м слое, характеризующая затухание и коэффициент фазы ЭМВ.

Волновое сопротивление 2-го и 3-го слоев определяются следующим образом:

$$\dot{Z}_2 = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_2}{\dot{\epsilon}_2 \epsilon_0}}, \quad (7)$$

$$\dot{Z}_3 = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_3}{\dot{\epsilon}_3 \epsilon_0}}, \quad (8)$$

где $\dot{\epsilon}_3 = 2,5$ – относительная диэлектрическая проницаемость 3-го слоя (слой нефти), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ом/м.

Относительные магнитные проницаемости (считаем, что среды немагнитные) $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 1$.

Постоянная распространения волны равна

$$\dot{\gamma}_2 = j \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\dot{\epsilon}_2}. \quad (9)$$

Определим комплексную относительную диэлектрическую проницаемость 2-го слоя:

$$\dot{\epsilon}_2 = \epsilon_r - j \frac{\sigma_r}{2\pi f \epsilon_0} - \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{ni}}{V_i^2 + \omega^2} \left[1 + j \frac{V_i}{\omega} \right] \right\}, \quad (10)$$

где ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость наполнителя 2-го слоя без учета анизотропных свойств, $\sigma_r = 10^{-2}$ См/м – удельная проводимость 2-го слоя, $\omega = 2\pi f$ – частота ЭМВ, ω_{ni} – плазменная частота, V_i – частота столкновения частиц.

Частота столкновения ионов для среды над УВЗ определяется по следующей формуле:

$$V_u = \frac{V_e}{\left(\frac{m_u}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (11)$$

где $V_e = 2\pi \cdot 10^9$ рад/с – частота столкновения электронов, $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона, $m_u = 5 \cdot 10^{-4} \cdot m_e$ – масса иона.

Плазменная частота определяется выражением

$$\omega_{ni} = g_i \left(\frac{N_i}{m_i \cdot \epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

в котором $i = 1 = e$ – электроны, $i = 2 = u$ – ионы, $g_e = g_u = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – величина зарядов электрона и иона, $N_e = N_u = 10^{16}$ м⁻³ – концентрация частиц.

Фазовая скорость распространения волны равна

$$v = \frac{c}{\operatorname{Re}(\sqrt{\epsilon_2 \mu_2})}, \quad (13)$$

где c – скорость света.

Коэффициент затухания ЭМВ в слое h может быть определен по следующей формуле:

$$\alpha_2 = \operatorname{Im}(\dot{\gamma}_2). \quad (14)$$

Данный коэффициент входит в экспоненту выражения (2) и является сложной функцией характеристик среды над УВЗ, определяемой выражениями (9) и (10).

Результаты и их обсуждение. Проведен анализ зависимостей амплитуды видеоимпульса от частоты f при длительности импульса $\tau_u = 1$ мс для различных глубин h . Рис. 3, $a-c$ представлены в логарифмическом масштабе, так как значение амплитуды отраженного импульса $S_{\text{отр}}$ очень мало. Как видно из рис. 3, при увеличении частоты видеоимпульса уменьшается амплитуда. Формулы (1), (8), (14) показывают, что при возрастании частоты увеличивается коэффициент распространения волны γ_2 , вследствие чего увеличивается коэффициент затухания α , что ведет к уменьшению амплитуды отраженного видеоимпульса.

Также с увеличением глубины амплитуда отраженного видеоимпульса резко уменьшается и шаг уменьшения амплитуды с увеличением частоты становится больше.

При уменьшении длительности видеоимпульса затухание ЭМВ возрастает: приведенные на рис. 4 зависимости амплитуды видеоимпульса от глубины h и частоты f при $f_u = 25 \cdot 10^2$ Гц свидетельствуют об этом.

При разработке аппаратуры для поиска и выделения УВЗ приходится сталкиваться с проблемами обеспечения требуемых затуханий ЭМВ и разрешающей способности по глубине обнаружения. Минимально измеряемая толщина слоя определяется минимально измеряемым ин-

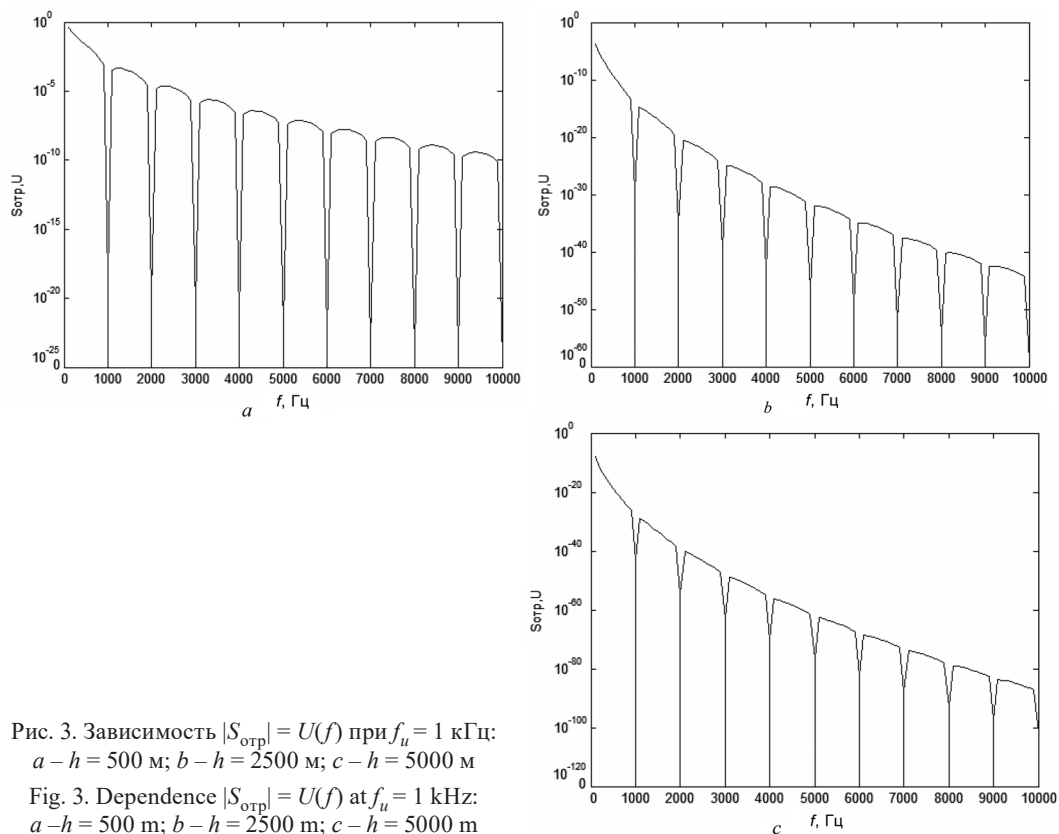


Рис. 3. Зависимость $|S_{\text{отр}}| = U(f)$ при $f_u = 1$ кГц:
 $a - h = 500$ м; $b - h = 2500$ м; $c - h = 5000$ м
 Fig. 3. Dependence $|S_{\text{отр}}| = U(f)$ at $f_u = 1$ kHz:
 $a - h = 500$ m; $b - h = 2500$ m; $c - h = 5000$ m

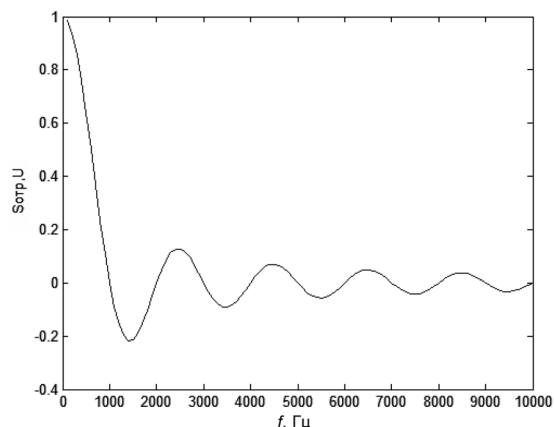


Рис. 4. Зависимость $|S_{отр}| = U(f_u)$: $h = 500$ м,
 $f_u = 2,5$ кГц

Fig. 4. Dependence $|S_{отр}| = U(f_u)$: $h = 500$ m, $f_u = 2,5$ kHz

тервалом Δt_{min} , который согласно критерию Рэлея формируется длительностью радиоимпульсов на половинном уровне от минимальной амплитуды, то есть $\Delta t_{min} = \tau_{0,5}$ и, следовательно,

$$h_{min} = \frac{v\tau_{0,5}}{2}. \quad (15)$$

Результаты проведенного анализа отражены в таблице.

Таким образом, при затухании ЭМВ 100 дБ параметры второй строки таблицы обеспечивают проникновение сигнала на глубины 396,82 и 5803 м при разрешающей способности 49,9 и 3160 м соответственно. Данные третьей и четвертой строк свидетельствуют о низкой глубине зондирования.

Характеристики ЭМВ для различных участков земной поверхности Characteristics of an electromagnetic wave for different parts of the earth's surface

Исследуемая среда	σ_r , См/м	f , Гц	ϵ_r	h_{min} , м	h , м
Глинистая почва сухая	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^6$	10	49,9	396,82
		$1 \cdot 10^3$		3160	5803
Глинистая почва влажная	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^6$	3	14,27	250,6
Песчаная почва влажная	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^6$	10	26,33	58,07

Заключение. Проведенный анализ показал, что амплитуда видеоимпульса для различных глубин h имеет частотную зависимость. Сравнение режимов видеоимпульсного РРВ выявило различия в исследуемых характеристиках. Полученные зависимости свидетельствуют о следующем: большие глубины залегания УВЗ требуют применения для зондирования видеоимпульсных сигналов большей длительности. Для обнаружения углеводородных залежей на территории Республики Беларусь (глубины залегания 2000–5000 м) можно рекомендовать для повышения информативности ЭММ разведки нефти и газа применение зондирующих сигналов с частотой 100 кГц. Различие участков земной поверхности по диэлектрической проницаемости, удельной проводимости, структуре слоев требует от устройства георазведки запаса по излучаемой мощности в пределах 20–50 % для перекрытия по величине возможного затухания сигналов. Допустимость перестройки устройства георазведки с одного режима на другой (регулировка длительности импульса) при наличии залежи дополняет функциональные возможности для поиска УВЗ. Результаты исследований могут быть применены для разработки радиотехнических систем ближней и дальней радиолокации, для повышения точности и уровня достоверности методов георазведки.

Список использованных источников

1. Moskvichew, V. N. Interaction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line / V. N. Moskvichew // 9th Microw. Conf. «NICON-91», Rydzyna, May 20–22, 1991. – Rydzyna, 1991. – Vol. 1. – P. 240–244.
2. Гололобов, Д. В. Радиотехнические системы поиска и идентификации углеводородных залежей в режиме двухчастотного взаимодействия / Д. В. Гололобов, В. Ф. Янушкевич // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2002. – № 1. – С. 49–54.
3. Гололобов, Д. В. Поверхностный импеданс углеводородной залежи в режиме двухчастотного взаимодействия / Д. В. Гололобов, К. В. Цывис, В. Ф. Янушкевич // Изв. Белорус. инженер. акад. – 2001. – № 1 (11). – С. 101–104.
4. Гололобов, Д. В. Поверхностный импеданс углеводородной залежи в режиме частотно-модулированных сигналов / Д. В. Гололобов, С. В. Калинин, В. Ф. Янушкевич // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2010. – № 4. – С. 98–101.

5. Москвичев, В. Н. Исследование взаимодействия электромагнитных волн с углеводородной залежью / В. Н. Москвичев // Радиотехника и электроника: Респ. межведомств. сб. – Минск: Выш. шк., 1989. – Вып. 18. – С. 91–96.
6. Adamovskiy, E. Simulation of electromagnetic waves interaction with hydrocarbon deposits / E. Adamovskiy, V. Yanushkevich // 8 Junior Researchers Conference European and National Dimension in Research: in 3 parts. – Novopolotsk: PSU, 2016. – Part 3: Technology. – P. 179–183.
7. Взаимодействие электромагнитных волн с анизотропными средами над углеводородными залежами в режиме радиоимпульсных сигналов / В. Ф. Янушкевич [и др.] // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. С, Фундаментальные науки. Физика. – 2016. – № 12. – С. 45–50.
8. Иванова, К. И. Способ геоэлектроразведки углеводородной залежи с использованием радиоимпульсных сигналов / К. И. Иванова, В. Ф. Янушкевич // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире: материалы XV междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 4 окт. 2016 г.: в 2 т. / Федеральная служба по надзору в сфере связи, информ. технологий и массовых коммуникаций; редкол.: А. В. Воронцов [и др.]. – СПб., 2016. – Т. 1. – С. 107–111.
9. Грибик, Я. Г. Признаки проявления современной аккумуляции углеводородов в условиях Припятского прогиба / Я. Г. Грибик // Потенциал добычи горючих ископаемых в Беларуси и прогноз его реализации в первой половине XXI века: материалы междунар. науч.-практ. конф. (25–27 мая 2011 г.) / [гл. ред. В. Н. Бескопыйный]. – Гомель: Полеспечать, 2012. – С. 275–280.
10. Shkarofsky, I. P. New representations of dielectric tensor elements in magnetized plasma / I. P. Shkarofsky // J. Plasma Phys. – 1986. – Vol. 35, iss. 2. – P. 319–331. <https://doi.org/10.1017/S0022377800011363>
11. Финкельштейн, М. И. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии / М. И. Финкельштейн, В. А. Кутев, В. П. Золоторев. – М.: Недра, 1986. – 182 с.

References

1. Moskvichew V. N. Interaction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line. *9th Microwave Conference "NICON-91", Rydzyna, May 20–22, 1991*. Rydzyna, 1991, vol. 1, pp. 240–244.
2. Gololobov D. V., Yanushkevich V. F. Radio search and identification systems for hydrocarbon deposits in two-frequency interaction mode. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2002, no. 1, pp. 49–54 (in Russian).
3. Gololobov D. V., Tsyivis K. V., Yanushkevich V. F. Surface impedance of the hydrocarbon deposit interaction in a two-frequency mode. *Izvestiya Belorusskoy inzhenernoy akademii* [Proceedings of the Belarusian Engineering Academy], 2001, no. 1 (11), pp. 101–104 (in Russian).
4. Gololobov D. V., Yanushkevich V. F., Kalintsev S. V. Surface impedance of the medium above the hydrocarbon deposits in frequency mode-modulated signals. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2010, no. 4, pp. 98–101 (in Russian).
5. Moskvichew V. N. Investigation of the interaction of electromagnetic waves with a hydrocarbon deposit. *Radiotekhnika i elektronika. Rosp. mezhved. sb.* [Radio Engineering and Electronics: Republican interdepartmental collection]. Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 1989, iss. 18, pp. 91–96 (in Russian).
6. Adamovskiy E., Yanushkevich V. Simulation of electromagnetic waves interaction with hydrocarbon deposits. *8 Junior Researchers Conference European and National Dimension in Research. Part 3. Technology*. Novopolotsk, Polotsk State University, 2016, pp. 179–183.
7. Yanushkevich V. F., Kremeny K. I., Ivanov M. M., Maladzechkina T. V. Interaction of electromagnetic waves with anisotropic environments over hydrocarbonic deposits in the mode of radio pulse signals. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Fundamentalnyie nauki. Fizika* [Proceedings of the Polotsk State University. Fundamental Sciences. Physics], 2016, no. 12, pp. 45–50 (in Russian).
8. Ivanova K. I., Yanushkevich V. F. Geoelectrical exploration method of hydrocarbon deposits using radio pulse signals. *Materialy XV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Fundamentalnyie i prikladnyie issledovaniya v sovremennoy mire"*, Sankt-Peterburg, 4 okt. 2016 g. T. 1 [Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference "Fundamental and applied research in the modern world", Saint-Petersburg, 4 October 2016. Vol. 1]. Saint Petersburg, 2016, pp. 107–111 (in Russian).
9. Gribik Ya. G. Signs of manifestation of the modern accumulation of hydrocarbons in the conditions of the Pripyat Trough. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Potentsial dobyichi goryuchih iskopaemykh v Belarusi i prognoz ego realizatsii v pervoy polovine XXI veka"* [Proceedings of the international scientific-practical conference "The potential of mining of fossil fuels in Belarus and the forecast of its implementation in the first half of the 21st century"]. Gomel, Polespechat' Publ., 2012, pp. 275–280 (in Russian).
10. Shkarofsky I. P. New representations of dielectric tensor elements in magnetized plasma. *Journal of Plasma Physics*, 1986, vol. 35, iss. 2, pp. 319–331. <https://doi.org/10.1017/S0022377800011363>
11. Finkelshteyn M. I., Kutev V. A., Zolotarev V. P. *The use of radar subsurface sounding in engineering geology*. Moscow, Nedra Publ., 1986. 182 p. (in Russian).

Информация об авторах

Янушкевич Виктор Францевич – кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники, Полоцкий государственный университет (ул. Блохина, 29, 211440, Новополоцк, Витебская обл., Республика Беларусь). E-mail: yanushkevich-09@mail.ru

Иванова Карина Игоревна – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры радиоэлектроники, Полоцкий государственный университет (ул. Блохина, 29, 211440, Новополоцк, Витебская обл., Республика Беларусь). E-mail: kamejiia@mail.ru

Иванов Михаил Михайлович – магистр технических наук, ассистент кафедры радиоэлектроники, Полоцкий государственный университет (ул. Блохина, 29, 211440, Новополоцк, Витебская обл., Республика Беларусь). E-mail: misha.iwanow@mail.ru

Information about the authors

Viktor F. Yanushkevich – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor of the Department of Radio Electronics, Polotsk State University (29, Blohin Str., 211440, Novopolotsk, Vitebsk Region, Republic of Belarus). E-mail: yanushkevich-09@mail.ru

Karina I. Ivanova – Master of Engineering, Senior Lecturer of the Department of Radio Electronics, Polotsk State University (29, Blohin Str., 211440, Novopolotsk, Vitebsk Region, Republic of Belarus). E-mail: kamejiia@mail.ru

Mihail Mihaylovich Ivanov – Master of Engineering, Assistant of the Department of Radio Electronics, Polotsk State University (29, Blohin Str., 211440, Novopolotsk, Vitebsk Region, Republic of Belarus). E-mail: misha.iwanow@mail.ru